

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده پردیس خوارزمی

رشته عمران گرایش ژئوتکنیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

ارزیابی تاثیر نانورس بر خصوصیات پلاستیسیته و مقاومت برشی خاک رس

اصلاح شده با آهک

نگارنده: مهدی عرب علی محمدی

استاد راهنما:

دکتر سید مهدی حسینی

شهریور ۱۳۹۵

شماره: ۲/۲۲۳۷  
تاریخ: ۲۹، ۲، ۱۳۹۵  
ویرایش:

باسمه تعالی



فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای مهدی عرب علی محمدی.. به شماره دانشجویی-۹۳۱۲۰۰۴.. رشته - عمران - گرایش : ژئوتکنیک. تحت عنوان ارزیابی تاثیر نانورس بر خصوصیات پلاسیسیته و مقاومت برشی خاک رس اصلاح شده با آهک که در تاریخ ۱۳۹۵/۰۶/۱۵- با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: خوب امتیاز: ۱۷/۹۹)  دفاع مجدد  مردود

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶)

۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبۀ علمی	امضاء
۱- استاد اهنما	دکتر سید مهدی حسینی	استادیار	
۲- استاد مشاور			
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر علی عباسزاد	استادیار	
۴- استاد ممتحن	دکتر امیر پسر افشان مقدم	استادیار	
۵- استاد ممتحن	دکتر مهدی عجمی	استادیار	

رئیس دانشکده  
امضاء



تقدیم به

روح پدرم و مادر بزرگوادم وهمسر فداکار ودختران عزیزم.

همواره سعی کردم با تلاش و درستکاری قسمتی از زحمات شما عزیزان را پاسخ دهم اگر میسر نشده طلب بخشش دارم.

لحظه ها میگذرد آنچه بگذشت نمی آید باز

قصه ای هست که هرگز دیگر نتواند شد آغاز

## لا تقف ماليس لك به علم. اسراء ۳۶

فقط از علم پیروی کن و بدون شناخت قدمی بردار.

برسم ادب و احترام از همه سروران گرامی که در مسیر دانش آموزی مرا یاری کردند تشکر میکنم و دست همگی را میبوسم.

تشکر و قدردانی فراوان از جناب آقای دکتر حسینی که با اخلاق و دانش خودبهترین ها را به من هدیه دادند.

سپاسگذار از اساتید گرامی جناب آقای دکتر بذر افشان و جناب آقای دکتر عجمی و جناب آقای دکتر عباس نژاد به خاطر راهنمایی و ارایه نظرات سودمندشان می‌باشم.

با تشکر و قدردانی از دوستان بزرگوار، کارشناسان محترم آزمایشگاههای مکانیک خاک و مقاومت و تجزیه مواد معدنی (XRF و XRD) دانشگاه صنعتی شاهرود آقای مهندس سید جمال کلانتری، آقای مهندس محمد مزینان، آقای مهندس محمد کبیریان و جناب آقای مهندس مهدی اردیانی و باتشکر از همه اساتید بزرگوار در دوره کارشناسی ارشد.

## تعهد نامه

اینجانب مهدی عرب علی محمدی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته عمران - ژئوتکنیک دانشکده پردیس خوارزمی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه ارزیابی تاثیر نانو رس بر خصوصیات پلاستیسیته و مقاومت برشی خاک رس اصلاح شده با آهک تحت راهنمایی آقای دکتر سید مهدی حسینی متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در 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 می باشد 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 پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، 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 ۱۳۹۵/۰۵/۰۱ امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده

به منظور اصلاح رفتار و بهسازی خاک بستر پروژه ها و تاسیساتی که بر روی لایه های خاک رسی باید احداث گردند، توجه به وجود خاک های حساس و نباتی و گاه بی کیفیت از نظر ساختار و همچنین برای تعدیل هزینه های اجرا به همراه ایمن نمودن بیشتر پروژه در مقابل خطراتی همچون نشست، تخریب و... ضرورت تحقیق پارامترهای اصلاحی مناسب برای خاکی از نوع رس مشخص می شود. در این تحقیق اثر توام افزودن درصد های مختلف نانو رس و آهک بر خاک رس و تغییرات پارامترهای مقاومت برشی خاک رس مورد نظر به وسیله آزمایش برش مستقیم رامورد ارزیابی قرار داده ایم بدین منظور پس از انجام آزمایش های شناسائی و طبقه بندی، مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک، آزمایش برش مستقیم بر روی خاک مورد نظر با درصد های مختلف ۱۱ الی ۴ درصد آهک و سپس ۱۱ الی ۳ درصد نانو رس و آهک نتایج حاکی از بهبود پارامترهای مقاومت برشی خاک رس اصلاح شده توسط نانو رس و آهک می باشد.

**کلمات کلیدی:** نانو رس، آهک، پارامترهای مقاومت برشی، برش مستقیم، بهسازی خاک

فصل اول_مقدمه و کلیات	۱
۱-۱-تاریخچه موضوع:	۲
۱-۱-۱-تعریف و ضرورت انجام تحقیق:	۲
۱-۱-۲-مروری بر کارهای پیشین:	۳
۲-۱-اهداف تحقیق:	۶
۳-۱-ساختار تحقیق:	۶
فصل دوم_مقاومت برشی و بهسازی خاک, نانو فناوری	۷
۱-۲-مقدمه:	۸
۱-۱-۲-بررسی مقاومت برشی در خاکها	۸
۲-۱-۲-شرح مختصری از معیار گسیختگی مور-کولمب	۸
۳-۱-۲-زاویه گسیختگی در خاک	۹
۴-۱-۲-پارامترهای مقاومت برشی (آزمایش برش مستقیم)	۱۱
۲-۲-معرفی نانو:	۱۴
۱-۲-۲-نانو چیست؟	۱۵
۲-۲-۲-بررسی نانو تکنولوژی	۱۵
۳-۲-۲-نانو تکنولوژی چه کاربردی دارد؟	۱۶
۴-۲-۲-ریچارد فایمن و ایده های بنیادیش	۱۹



- ۲۰-۲-۵- نانو فناوری چیست و چگونه به آن دست پیدا کرده ایم؟..... ۲۰
- ۲۲-۲-۶- علم نانو و محدودده پیشرفت ..... ۲۲
- ۲۳-۲-۷- کشف نانو در طبیعت ..... ۲۳
- ۳۰-۲-۸- تاریخچه نانو فن آوری ..... ۳۰
- ۳۱-۲-۹- رویدادهای مهم تاریخی در شکل گیری علوم نانو ..... ۳۱
- ۳۲-۲-۱۰- معرفی نانو ذرات رس ..... ۳۲
- ۳۳-۲-۱۰-۱- کاربرد نانو ذرات رس ..... ۳۳
- ۳۴-۲-۱۰-۲- خواص نانو ذرات رس ..... ۳۴
- ۳۹-۲-۳- بهسازی و روشهای تثبیت خاک ..... ۳۹
- ۳۹-۲-۳-۱- مقدمه ..... ۳۹
- ۳۹-۲-۳-۲- خاکهای مشکل آفرین و روش بهسازی آن ..... ۳۹
- ۴۰-۳-۳- بررسی علل عدم گسترش استفاده از روش های تثبیت خاک در ایران ..... ۴۰
- ۴۱-۳-۴- تثبیت خاک با آهک و بررسی ویژگی های واکنش آن ..... ۴۱
- ۴۴-۳-۵- انواع واکنش های خاک رس با آهک ..... ۴۴
- ۴۶-۳-۶- خاک های مناسب اختلاط با آهک ..... ۴۶
- ۴۶-۳-۷- بهسازی بهترین گزینه مکمل پی سازی ..... ۴۶
- ۴۷-۳-۸- تکنیک های تثبیت خاکهای مساله دار: ..... ۴۷
- ۴۸-۳-۹- انواع روش طرح تثبیت خاک با آهک: ..... ۴۸

- ۴۸-۲-۴- نتیجه گیری از بخش و مروری بر کارهای گذشته: ..... ۴۸
- ۴۸-۲-۴-۱- مقایسه با کارهای مشابه انجام شده: ..... ۴۸
- ۵۱-۲-۴-۲- جمع بندی: ..... ۵۱
- ۵۳- فصل سوم\_ آزمایشهای فیزیکی و مکانیکی مصالح تحقیق ..... ۵۳
- ۵۴-۳-۱- مقدمه: ..... ۵۴
- ۵۴-۳-۱-۱- روش تحقیق ..... ۵۴
- ۵۴-۳-۲- مصالح مورد استفاده: ..... ۵۴
- ۵۴-۳-۲-۱- خاک رس : ..... ۵۴
- ۵۵-۳-۲-۱-۱- نمونه برداری دست خورده از خاک: ..... ۵۵
- ۵۶-۳-۲-۱-۲- نمونه برداری دست نخورده از خاک: ..... ۵۶
- ۵۷-۳-۲-۱-۳- نمونه باز سازی شده خاک: ..... ۵۷
- ۵۸-۳-۲-۱-۴- آزمایشات شناسایی و طبقه بندی بر روی خاک مورد مطالعه: ..... ۵۸
- ۵۹-۳-۲-۱-۴-۱- آزمایش دانه بندی خاک به روش الک و هیدرومتری برای بخش گذرا از الک شماره ۱۰ ( ۲/۰ MM ) . استاندارد - 422 : ASTM D ..... ۵۹
- ۵۹-۳-۲-۱-۴-۲- آزمایش حدود اتربرگ : استاندارد - 3418 : ASTM D ..... ۵۹
- ۵۹-۳-۲-۱-۴-۳- آزمایش رده بندی خاک ها برای مقاصد مهندسی (سیستم رده بندی متحد USCS) ..... ۵۹
- ۶۲- استاندارد - 2487 : ASTM D ..... ۶۲
- ۶۴-۳-۲-۱-۵- آزمایشات مشخصات فیزیکی بر روی خاک مورد مطالعه: ..... ۶۴
- ۶۴-۳-۲-۱-۵-۱- آزمایش تعیین چگالی ویژه بخش جامد بوسیله پیکنومتر آب: ..... ۶۴

- ..... ASTM D :2216 - استاندارد - ۲-۵-۱-۲-۳ آزمایش تعیین رطوبت به روش جرمی: استاندارد - ۲-۵-۱-۲-۳
- ..... ASTM D :854 استاندارد - ۶۵
- ..... ASTM D :3080 - استاندارد - ۳-۵-۱-۲-۳ آزمایش تعیین دانسیته خشک طبیعی (FD) بوسیله پارافین: ۶۶
- ..... ASTM D :698 استاندارد - ۶-۱-۲-۳ آزمایشات مشخصات مکانیکی بر روی خاک مورد مطالعه: ۶۶
- ..... ASTM D :3080 - استاندارد - ۱-۶-۱-۲-۳ آزمایش تعیین مشخصات تراکم آزمایشگاهی خاک با استفاده از تلاش استاندارد: ۶۷
- ..... ASTM D :3080 - استاندارد - ۲-۶-۱-۲-۳ آزمایش برش مستقیم استاندارد - ۶۸
- ..... ASTM D :2435 - استاندارد - ۷-۱-۲-۳ آزمایشات تکمیلی: ۷۰
- ..... ASTM D :2435 - استاندارد - ۲-۶-۱-۲-۳ آزمایش تحکیم یک بعدی (ادئو متر): استاندارد - ۷۰
- ..... ASTM D :2435 - استاندارد - ۱-۲-۶-۱-۲-۳ آزمایش تحکیم ساده: ۷۰
- ..... ASTM D :2435 - استاندارد - ۷-۱-۲-۳ آزمایشهای شناسایی خاک ، (آنالیز فازی و عنصری): ۷۴
- ..... ASTM D :2435 - استاندارد - ۱-۷-۱-۲-۳ طیف سنج پراش اشعه ایکس XRD ۷۴
- ..... ASTM D :2435 - استاندارد - ۲-۷-۱-۲-۳ طیفسنجی فلورسانس اشعه ایکس XRF ۷۵
- ..... ASTM D :2435 - استاندارد - ۱-۲-۷-۱-۲-۳ نتایج آزمایشات XRD و XRF بر روی خاک رس. ۷۸
- ..... ASTM D :2435 - استاندارد - ۲-۲-۳ آنالیز آهک ساختمانی: ۷۸
- ..... ASTM D :2435 - استاندارد - ۳-۲-۳ مشخصات نانو رس تهیه شده ۸۰
- ..... ASTM D :2435 - استاندارد - ۴-۲-۳ آب: ۸۲
- ..... ASTM D :2435 - استاندارد - فصل چهارم نتایج و بحث بر روی آزمایشهای انجام شده ۸۳
- ..... ASTM D :2435 - استاندارد - ۱-۴ مقدمه ۸۴

۱-۴-۱- تعیین پارامترهای مقاومت برشی .....	۸۴
۴-۲- شرح نتایج و تفسیر آزمایشات برش مستقیم .....	۸۸
فصل پنجم جمع بندی، نتیجه گیری و پیشنهادات .....	۸۹
۵-۱- نتایج آزمون برش مستقیم و آتبرگ: .....	۹۰
۵-۲- پیشنهادات: .....	۹۰
فصل ششم ضمیمه .....	۹۱
مراجع: .....	۹۵

## فهرست اشکال

- شکل ۲-۱: روابط معیار گسیختگی مور کلمب ..... ۸
- شکل ۲-۲: بررسی زاویه گسیختگی در خاک ..... ۱۰
- شکل ۲-۳: شماتیک دستگاه برش مستقیم ..... ۱۱
- شکل ۲-۴: قالبهای دستگاه برش مستقیم (مربعی و دایره ای) ..... ۱۲
- شکل ۲-۵: دستگاه برش مستقیم آزمایشگاه مکانیک خاک ..... ۱۲
- شکل ۲-۶: نمودار تنش برشی مقابل تنش قائم برای خاک رس بدون نانو رس و آهک در آزمون برش مستقیم، ..... ۱۴
- شکل ۲-۱: ساختار سلسله مراتب سیستم چسبناک پای مارمولک ..... ۲۴
- شکل ۲-۲: موهای نانو مشابه پای مارمولک ..... ۲۵
- شکل ۲-۳: شکل هندسی رابطه بین سطح صاف و زبر خودتمیزکنندگی ..... ۲۶
- شکل ۲-۴: افزایش بزرگنمایی بال پروانه مورفور تنور ..... ۲۸
- شکل ۲-۵: محافظ در برابر رطوبت و گازها ..... ۳۵
- شکل ۲-۶: مقاومت ذرات نانو در مقابل حرارت ..... ۳۷
- شکل ۲-۷: جلوگیری از عبور گازها ..... ۳۷
- شکل ۲-۸: ظرف نانو مانع فاسد شدن ..... ۳۸
- شکل ۲-۹: ظرف مستحکم ساخته شده از نانو ..... ۳۸
- شکل ۲-۱۰: تثبیت بروش جایگزینی ..... ۴۷
- شکل ۳-۱: نمایی از سایت مورد نظر ..... ۵۵

- شکل ۳-۱-۱: روش نمونه برداری دست خورده از خاک مورد نظر ..... ۵۶
- شکل ۳-۱-۲: روش نمونه برداری دست نخورده از خاک مورد نظر ..... ۵۷
- شکل ۳-۲: نمونه بازسازی شده از خاک دست خورده از وسط قالب تراکم ..... ۵۷
- شکل ۳-۳: الکهای آزمایش دانه بندی به روش تر (قسمت درشت دانه) ..... ۵۸
- شکل ۳-۴: نمودار دانه بندی خاک مورد مطالعه ..... ۵۹
- شکل ۳-۵: نمودار حد روانی ..... ۶۰
- شکل ۳-۶: جام کاساگرانده وسایل آزمایش حد روانی ومراحل انجام آزمایش ..... ۶۰
- شکل ۳-۷: وسایل آزمایش حد پلاستیک ومراحل انجام آزمایش ..... ۶۱
- شکل ۳-۸: مرز حد انقباض، حد خمیری، حدروانی ..... ۶۱
- شکل ۳-۹: نمودار کاساگرانده برای رده بندی خاک های رسی ..... ۶۳
- شکل ۳-۹-۱: نمودار رده بندی خاک های ریز دانه ۵۰ یا بیش از ۵۰٪ ذرات از الک شماره ۲۰۰ رد شده اند ..... ۶۳
- شکل ۳-۱۰: برخی از وسایل آزمایش تعیین چگالی ویژه بخش جامد خاکهای ریزدانه ..... ۶۴
- شکل ۳-۱۱: لوازم آزمایش تعیین دانسیته خشک طبیعی وکلوخه های آغشته به پارافین ..... ۶۶
- شکل ۳-۱۲: نمودار تراکم آزمایشگاهی خاک مورد مطالعه ..... ۶۸
- شکل ۳-۱۳: گرفتن نونه های باز سازی شده از میان قالب تراکم ..... ۶۹
- شکل ۳-۱۴: نمونه ی پس از برش در دستگاه برش مستقیم (قالب مربعی) ..... ۷۰
- شکل ۳-۱۵: دستگاه تحکیم یک بعدی (ادئومتر) و رینگ آن ..... ۷۱
- شکل ۳-۱۶: نمودار تحکیم یک بعدی (ادئومتر) - تنش قائم در مقابل درصد تغییر مکان نسبی ..... ۷۲

- شکل ۳-۱۶-A: نمودار تحکیم یک بعدی (ادئومتر)، تخلخل در مقابل لگاریتم تنش قائم آزمایشگاهی  
 A: آزمایشگاهی..... ۷۲
- شکل ۳-۱۶-B: نمودار تحکیم یک بعدی (ادئومتر)، تخلخل در مقابل لگاریتم تنش قائم  
 آزمایشگاهی، B: اصلاح شده..... ۷۳
- شکل ۳-۱۷: شمایی از عمل کرد دستگاه XRD (رابطه براگ)..... ۷۵
- شکل ۳-۱۸: شمایی از عمل کرد دستگاه XRF..... ۷۵
- شکل ۳-۱۹: آزمایشگاه تجزیه مواد معدنی XRF دانشگاه صنعتی شاهرود..... ۷۶
- شکل ۳-۲۰: آزمایشگاه تجزیه مواد معدنی XRD دانشگاه صنعتی شاهرود..... ۷۷
- شکل ۳-۲۱: نمودار XRD خاک رس مورد مطالعه..... ۷۷
- شکل ۳-۲۲: آنالیز آهک ساختمانی..... ۷۹
- شکل ۳-۲۳: نمودار XRD آهک ساختمانی..... ۸۰
- شکل ۳-۲۴: نانورس مورد استفاده..... ۸۱
- شکل ۳-۲۵: نمودار XRD نانورس مورد استفاده..... ۸۱
- شکل ۴-۱: تاثیر افزودن نانورس و آهک به خاک برای یافتن درصد افزودنی بهینه به منظور افزایش  
 پارامتر چسبندگی..... ۸۵
- شکل ۴-۲: تاثیر افزودن نانورس و آهک به خاک برای یافتن درصد افزودنی بهینه به منظور افزایش  
 پارامتر زاویه اصطکاک داخلی..... ۸۶
- شکل ۴-۳: تاثیر افزودن نانورس به خاک برای یافتن درصد افزودنی بهینه به منظور افزایش پارامتر  
 چسبندگی..... ۸۷

شکل ۴-۴: مقایسه تاثیر نانورس بدون حضور آهک و باحضور آهک بر روی پارامتر چسبندگی.....۸۸



## فهرست جداول

- جدول A-۱: نتایج تحقیقات مختلف بر خاکهای رسی CL بهسازی شده با نانورس, سیلیس در نقاط مختلف. ۵۰.....
- جدول ۳-۱: نتایج آزمایش حدود اتربرگ ..... ۶۱
- جدول ۳-۲: طبقه بندی خاک ( روش یونیفاید) ..... ۶۲
- جدول ۳-۳: طبقه بندی چگالی ویژه بخش جامد خاک ..... ۶۵
- جدول ۳-۴: جدول مقایسه مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی ..... ۷۰
- جدول ۳-۵: نتایج آزمایش تحکیم یک بعدی از آزمایش تحکیم ..... ۷۳
- جدول ۳-۶: نتایج بخشی از بارگذاری آزمایش تحکیم یک بعدی ..... ۷۳
- جدول ۳-۷: نتایج آزمایش XRF بر روی خاک مورد مطالعه..... ۷۸
- جدول ۳-۸: نتایج آزمایش XRF بر روی آهک مورد مطالعه..... ۷۹
- جدول ۳-۹: مشخصات نانو رس مورد مطالعه ارائه شده از طرف شرکت سازنده ..... ۸۰
- جدول ۳-۱۰: نتایج آزمایش XRF بر روی نانو رس مورد مطالعه ..... ۸۱
- جدول ۳-۱۱: نتایج آزمایشهای شناسایی، فیزیکی و مکانیکی خاک مورد مطالعه از آزمایش تحکیم. ۸۲
- جدول ۴-۱: جدول مقایسه مقادیر چسبندگی ..... ۸۵
- جدول ۴-۲: جدول مقایسه مقادیر زاویه اصطکاک داخلی ..... ۸۶
- جدول ۴-۳: جدول مقایسه مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی ..... ۸۶
- جدول ۴-۴: جدول مقایسه مقادیر چسبندگی نمونه های بانانو رس و آهک - بدون آهک ..... ۸۷
- جدول ۶-۱: حد اقل زمان لازم برای آزمون برش مستقیم بکار رفته در آزمایشها..... ۹۲

جدول ۶-۲ محاسبات زمان برای دستگاه برش مستقیم بکار رفته در آزمایشها ..... ۹۲

جدول ۶-۳: زمان لازم برای جذب رطوبت دانه های خاک مورد آزمایش در آزمون برش مستقیم. ۹۲

جدول ۶-۴: محاسبات درصد های مختلف نانو رس، آهک، آب و خاک رس بکار رفته در آزمایش برش

مستقیم. ۹۳ .....

فهرست علائم و اختصارات

$\theta$	زاویه تابش اشعه X
$\lambda$	طول موج اشعه X
$d$	فاصله صفحه بر حسب انگستروم
$Cc$	ضریب دانه بندی
$D$	قطر ذرات
$G_s$	چگالی دانه های ذرات خاک
$\omega$	درصد رطوبت
$\omega_n$	درصد رطوبت حدروانی
$Cc$	شاخص تراکم
$PL$	حد پلاستیک
LL	حد روانی
IC	نشانه استحکام
PI	نشانه پلاستیک
IL	نشانه روانی
A	عدد فعالیت رس
$\tau_f$	مقاومت برشی
$c$	چسبندگی
$\varphi$	زاویه اصطکاک داخلی
$\sigma$	تنش قائم
ASTM	روش آزمون استاندارد آمریکایی
AASHTO	سازمان امور ترابری و بزرگراه های ایالتی امریکا
CBR	نسبت باربری کالیفرنیا
$M_R$	مدول الاستیسیته یا مدول برجهندگی
LPT	Large Penetration Test آزمون نفوذ حجیم
SPT	Standard Penetration Test آزمون نفوذ استاندارد
XRD	X Ray Diffraction طیف سنج پراش اشعه ایکس
XRF	X Ray Fluorescence طیف سنجی فلورسانس اشعه ایکس



# فصل اول

## مقدمه و کلیات

## ۱-۱- تاریخچه موضوع:

### ۱-۱-۱- تعریف و ضرورت انجام تحقیق:

به منظور اصلاح رفتار و بهسازی بستر پروژه ها و تاسیساتی که بر روی لایه های خاک رسی باید احداث گردند و همچنین برای تعدیل هزینه های اجرا به همراه ایمن نمودن بیشتر پروژه در مقابل خطراتی همچون نشست، تخریب و... ضرورت تحقیق پارامترهای اصلاحی مناسب برای خاکی از نوع رس مشخص می شود.

با آشکار شدن خصوصیات ویژه و منحصر بفرد نانوذرات و بهبود بخشیدن به فرایندهای مورد دلخواه مان اهمیت استفاده آن در شاخه های علوم مهندسی قوت می گیرد می توان به اختصار بهبود فرایند و محصولات را در برخی از علوم مانند سازه، ژئوتکنیک، داروسازی و پزشکی، شیمیایی و... را با چند مثال تشریح نمود. بهبود رفتار و عملکرد خاک در پروژه های سد سازی و راه و تصفیه خانه ها و در بخش زیست محیطی جدانمودن فلزات سنگین و آلاینده از خاک، بهبود خواص مصالح ساختمانی مانند قیر، سیلیس، رس و رنگ و جوهر، لاستیک و پلاستیک، تصفیه آب و فاضلاب شهری و....

با توجه به قرارگیری برخی از پروژه های عمرانی بر خاکهای رسی نرم، و گاهها مسئله دار ضرورت اصلاح و بهسازی آنها جهت ایجاد بستری مناسب برای انجام و اجرای پروژه ضروری است. با اصلاح خاک مورد نظر جهت ارزیابی دقیقتر رفتار مکانیکی خاک به منظور طرح ایمن و بهینه، نیازمند یافتن پارامترهای مناسب خاک اصلاح شده می باشد.

در گذشته استفاده از آهک برای بهسازی خاک روش مناسب و متداولی بوده است. تجربه ترکیب آهک با انواع خاک رس نمایانگر این است که مصرف آهک در پایدار کردن خاک روش سودمند و متداول بوده و بسیاری از ویژگیهای خاک را بهبود می بخشد [۱]. در مهندسی ژئوتکنیک از دیر باز استفاده از افزودنیها به منظور بهسازی خاکها ی مساله دار (تورم، رمبندگی، نشست، ظرفیت باربری ...) در راستای بهبود تراکم، کاهش تورم، بهبود مقاومت و پایداری حایز اهمیت بوده است [۲].

امروزه با پیشرفت تکنولوژی و علم، نانو تکنولوژی نیز در عرصه مهندسی ژئوتکنیک جای خود را باز

کرده و مهندسين اين رشته را علاقه مند به تحقيق و پژوهش در اين زمينه نموده است. براي اولين بار در سال ۱۹۵۹ ريچارد فاينمن ايده فناوري نانو را مطرح کرد [۳]. در سال ۲۰۰۴ ژانگ در تحقيقات خود بر روي رس بيان کرد که وجود نانو ساختارها در خاک موجب افزايش حدود اتر برگ می شود [۴]. امروزه از نانورس برای بهبود خصوصيات پلاستيکيه، بهبود پارامترهای مقاومت برشی خاک، بهبود پارامترهای تحکيمي و مقاومت تک محوره خاک رس و تغيير خصوصيات ژئوتکنیکی خاکها استفاده میشود. متأسفانه بدليل نو بودن اين تکنولوژی و عدم وجود مرجعی کامل در مهندسی ژئوتکنیک و تحقيقات پراکنده و ناکافی نیاز به شناخت، نحوه کاربرد و ميزان تاثير نانو ذرات در اين حوزه می باشد. یکی از کاربردهای فناوري نانو بهبود خصوصيات مکانیکی و افزايش بهره برداری مصالح خاکی است. در اين تحقيق به انجام آزمایشهای لازم جهت تشخيص پارامترهای مقاومت برشی خاک رسی اصلاح شده با آهک و نانو رس پرداخته شده است. واطلاعات حاصله از مشاهدات آزمایشگاهی به صورت نمودار و جداول ارائه شده است، و پارامترهای مورد نظر بررسی می گردد.

### ۱-۱-۲- مروری بر کارهای پیشین:

در سال ۱۹۸۰ بعد از تهیه نانوکامپوزيت های نایلون ورس آنهم درصنعت خودروسازی موفق به کشف نانو رس وخواص عالی آن شدند [۴]. البته در سال ۱۹۵۹ آقای فاينمن ايده فناوري نانو رامطرح کرده بود. در کشور امريکا با تغييرات طراحی درنانوکامپوزيت های متشکل از نانو رس عبور گاز را ازلايه های لاستیک وپلاستیک مهار وغير ممکن ساختند [۵]. یکی از اهداف درپروژه های ژئوتکنیکی سد سازی وجاده وتصفيه خانه ها ومراکز دفن زباله اين بوده است که بتوان با افزودن ماده ای به خاک تغييرات مطلوب چشمگیری از خواص آن مانند رفتار و خود ترمیمی ونفوذ پذیری را مشاهده وبه کار بست واین امر توسط نانو رس میسر گردید [۶]. درصدهای مختلف نانورس با خاک مخلوط شده و آزمایش های برش مستقیم و نفوذپذیری به روش بار آبی ثابت بر روی آنها انجام گرفته است. نتایج نشان می دهد که نانورس سبب افزايش چشمگیر مقاومت برشی خاک و نیز کاهش نفوذپذیری خاک می شود [۷]. با افزايش مقدار نانورس درصد رطوبت بهينه و وزن مخصوص ماکزیمم خاک مسلح شده

با الیاف به ترتیب افزایش و کاهش می یابند [۸]. همچنین هرچه مقدار نانورس افزایش می یابد مقاومت فشاری خاک مسلح شده با الیاف افزایش یافته است نتایج آنالیز SEM نشان میدهد که با افزایش نانورس مقادیر بیشتری نانوبه سطح الیاف چسبیده که این موضوع باعث افزایش اصطکاک خاک و الیاف گردیده که در نتیجه آن مقاومت فشاری نمونه ها افزایش می یابند [۹].

اضافه نمودن پاره ای از افزودنی ها به خاک به عنوان یکی از روش های موثر در بهبود برخی از مشخصه های رفتاری خاک مانند رابطه تنش کرنش و مقاومت ، نفوذپذیری ، خود- ترمیمی به ویژه در بعضی از سازه های ژئوتکنیکی مانند سدهای خاکی، خاکریزهای جاده ها، شیروانی مصنوعی و مراکز دفن زباله همواره مدنظر بوده است [۱۰].

اخیرا محققین از ترکیبات جدیدی به همراه سیمان برای تثبیت استفاده کرده اند، اما هنوز نانو ذرات مسیر خود را در این راستا هموار نکرده است سیمان به تنهایی، قدری از خواص نا مطلوب را کاهش می دهد و در بهسازی خاکها موثر است، بطوریکه منجر به تغییراتی همچون افزایش مقاومت ، کاهش تغییر شکل ونشست، پایداری حجمی، (کنترل انقباض وتورم)، کاهش نفوذ پذیری، کاهش فرسایش پذیری وافزایش دوام می شود [۱۱].

کشورمان ایران با داشتن معادن غنی آهک و پتانسیل بالای تولید آهک می تواند به عنوان یکی از مراکز صاحب نظر در زمینه تثبیت خاک با این مواد محسوب شود. [۱۱].

در سالهای اخیر تلاشهای فراوانی جهت کاربرد این فن آوری نوین در شاخه های مختلف ژئوتکنیک شده است. اغلب نانوموادى که برای تغییر خصوصیات ژئوتکنیکی خاکها استفاده شده است نانو ذرات رسی است که بر روی خصوصیات تحکیم، شاخص نفوذپذیری و پارامترهای مقاومتی خاک تاثیر می - گذارد .

اغلب خاک موجود در سایت از دیدگاه مهندسی برای ساخت و ساز، ایده آل و کاملا مطلوب نیست . یکی از راهکارهای مناسب در مواجهه با خاکهای نامناسب در مهندسی ژئوتکنیک، تغییر خصوصیات خاک سایت است که بهسازی یا اصلاح خاک موسوم است . اصلاح خاک به مجموعه عملیاتی اطلاق



میشود که به حذف برخی رفتارهای نامناسب خاک و یا تحمیل رفتارهای مناسب به آن، خواهد شد . یکی از این روشها افزودن سیمان و یا ماده شیمیایی افزودنی به ترکیب خاک می باشد . در گذشته و البته حال سیمان، قیر، آهک، خاکستر آتشفشانی و... به عنوان افزودنی مورد استفاده قرار می گرفتند. افزودن این مواد به خاک باعث تغییراتی همچون کاهش پلاستیسیته، بهبود تراکم، کاهش تورم انقباض، بهبود مقاومت و پایداری خاک پس از تثبیت می شود . اغلب این مواد برای تثبیت خاکهای ریزدانه رسی و لای بکار می رود و اگر برای خاکهای دانه ای بکار رود باعث کاهش نفوذپذیری، کاهش فرسایش و افزایش دوام می شود [۱۲و۱۵].

یکی از مشکلات استفاده از این قبیل افزودنیها به خاک، آلودگی زیست محیطی می باشد ولی استفاده از نانوذرات سبب کاهش زیست تخریب پذیری خواهد شد . همچنین استفاده از آن در بهسازی خاک، کنترل خواص مقاومتی و کم کردن سیمان مصرفی و متعاقبا صرفه اقتصادی را نتیجه خواهد داد [۱۲و۱۶].

خاکهای حاوی نانوذرات با ابعاد نانو تخلخل درون ذره معمولا حد روانی و حدپلاستیک بسیار بالاتر از حالت معمول (بدون نانو ذرات) را بالا برده، و تغییرات غیر قابل برگشتی را پس از خشک شدن، بدنبال دارد. حضور نانو ذرات فیبر معمولا باعث تغییر در تیکسوتروپی بیشتر در خاک، افزایش و مقاومت برشی آن نیز می گردد. تفاوت بین نانو ذرات و ذرات با اندازه رس کلاسیک، نوع جدیدی از ذرات خاک برای تعریف نانو ذرات خاک بنام " نانو سل " پیشنهاد شده است [۱۳و۱۷].

مواد خاک و ذرات تشکیل دهنده آن یک طیف وسیعی از اندازه، نانوذرات معمولا ۱ تا ۱۰۰ نانومتر را تشکیل می دهند. نانو ذرات در محیط خاک در یکی از سه شکل مختلف (نانو پلاکت ، نانو سیم و یا نانولوله و نانو نقاط) وجود دارد. با توجه به اندازه کوچک خود، نانو ذرات خاک معمولا باعث افزایش و تغییر خواص سطحی آن شده و از این رو تعامل فعال و ویژه با ذرات خاک پیدا می کند. این حالت که در برخی از نانوذرات معمول اتفاق می افتد به طور خلاصه خواص آنها به ، سطح مخصوص زیاد، مورفولوژی ذرات، نانو تخلخل، و بار سطحی بستگی دارد. با توجه به سطح مخصوص بسیار بالا و بار

سطحی، و گاهی اوقات نانو تخلخل، این ذرات، حتی در یک بخش کوچک از پیش تعیین شده، به طور قابل توجهی ممکن است بر رفتار فیزیکی و شیمیایی خاک و خواص مهندسی تاثیر ویژه بگذارد.

### ۱-۲- فرضیات و اهداف تحقیق:

در این تحقیق بدنبال راه حل مناسب بهسازی خاکهای مساله دار (خاکهای رس اشباع و نرم، خاک های حساس، خاک های با منشا آلی و نباتی، خاک های رمینده، خاک های واگرا، خاک های دستی، خاکریزها، خاک های با منشا زباله و ضایعات، خاک های ماسه ای)، که همواره در ساخت و ساز ایجاد مشکل مینمایند هستیم. برای دستیابی به صرفه اقتصادی و زمان بهینه پارامترهای مقاومت برشی خاک رس اصلاح شده با نانورس توام با آهک و تاثیر ترکیب نانورس و آهک بر روی پارامترهای پلاستیسیتته خاک را با درصد های پایین نانورس و آهک (۱ الی ۴ درصد) مورد ارزیابی قرار گرفته که نتایج روند بهبود در زمان نسبتا کوتاه را نمایش می دهد.

### ۱-۳- ساختار تحقیق: ساختار تحقیق شامل شش فصل است. فصل اول مقدمه‌ای بر روش‌های بکار

گرفته شده، فرضیات تحقیق و مروری بر کارهای گذشته و اهداف میباشد. در فصل دوم مفاهیم نانو، تاریخچه آن، نانو فن آوری، بحث مقاومت برشی، بهسازی خاک و روشهای آن و تحقیق مقایسه و نتیجه گیری با کارهای گذشته بررسی می شود. در فصل سوم، مصالح بکار رفته در آزمایشهای شناسایی، مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک و بیان روش و شرح نتایج بازبینی گردیده است. در فصل چهارم نتایج حاصله از آزمایش برش مستقیم و حدود اتربرگ بر روی خاک مورد نظر با در صدهای مختلف نانو رس توام با آهک و گزارش نتایج بررسی می شود. در فصل پنجم نتیجه، مقایسه و پیشنهادات ارائه می شود. و فصل پایانی شامل ضمائم آزمایشهای برش مستقیم و حدود اتر برگ است.

## فصل دوم

بررسی مقاومت برشی و بهسازی خاک-

نانو فناوری

## ۲-۱-۱- مقدمه:

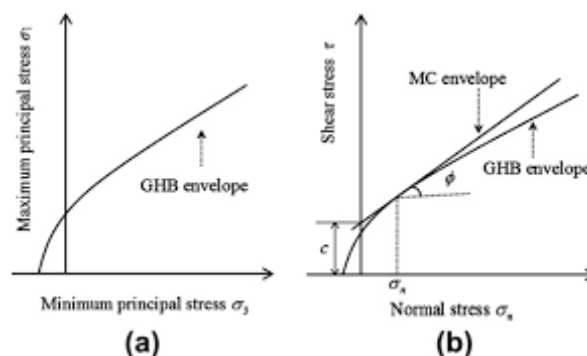
در این فصل مقاومت برشی در خاکها به اختصار و نانو، نانوفناوری و نانو تکنولوژی و تاریخچه آن، معرفی خاکهای مسئله دار و تکنیک بهسازی آن و درخاتمه به روش های بهسازی و بخصوص روش بهسازی با آهک تشریح و نتایج پژوهش انجام شده قبلی با این تحقیق بررسی و مقایسه میگردد.

## ۲-۱-۱-۲- بررسی مقاومت برشی در خاکها

خاک در برابر تنش های وارده از بارگذاری مقاومت خود را ازدست داده و در نتیجه تغییر شکل های بزرگ در آن بوجود می آید و می توان اینگونه تعریف کرد، مقاومت برشی توده خاک، مقاومت داخلی واحد سطح آن خاک است که می تواند برای مقابله با گسیختگی یا لغزش در امتداد هر صفحه از خود نشان دهد. برای تحلیل مسائل پایداری خاک نظیر ظرفیت باربری، پایداری شیروانی ها و فشار جانبی بر روی سازه های حایل خاک، لازم است طبیعت مقاومت برشی بخوبی شناخته شود [۱۸].

## ۲-۱-۲- شرح مختصری از معیار گسیختگی (موهر-کولمب)<sup>۱</sup>

بیان کننده وضعیت سطح گسیختگی در فضای تنش یا کرنش. مور نظریه ای برای گسیختگی مصالح ارائه داد که در آن گسیختگی نه به علت تنش قائم حداکثر و نه تنش برشی حداکثر، بلکه به علت ترکیبی بحرانی از آن ها پیش بینی می شود. طبق نظریه مور، رابطه بین مقاومت برشی و تنش قائم در، شکل A-۲ به صورت زیر نوشته می شود.



شکل A-۲: معیار گسیختگی مور کلمب، [۱۸].

<sup>1</sup> Mohr-Coulomb Failure Criterion

$$\tau_f = f(\sigma) \quad (1-2)$$

پوش گسیختگی تعریف شده توسط (رابطه ۱-۲)، یک خط منحنی است که در (شکل ۱-۲) نشان داده شده است. برای اغلب مسائل مکانیک خاک با دقت کافی می توان مقاومت برشی در روی صفحه گسیختگی را یک تابع خطی از تنش قائم در نظر گرفت (کولمب ۱۷۷۶). این رابطه به صورت زیر بیان می شود:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (2-2)$$

که در آن:

$\sigma$  = تنش قائم و  $C$  = چسبندگی و  $\tau_f$  = مقاومت برشی و  $\varphi$  = زاویه اصطکاک داخلی می باشد.

(رابطه ۲-۲)، معیار گسیختگی یا شکست مور- کولمب نامیده می شود [۱۸].

### ۲-۱-۳- زاویه گسیختگی در خاک

بر یک توده خاک در طبیعت تنش برشی وارد نمی شود تنها تحت تاثیر تنش های اصلی (تنش اصلی حداکثر  $\sigma_1$  و تنش اصلی حداقل  $\sigma_3$ ) قرار می گیرد .

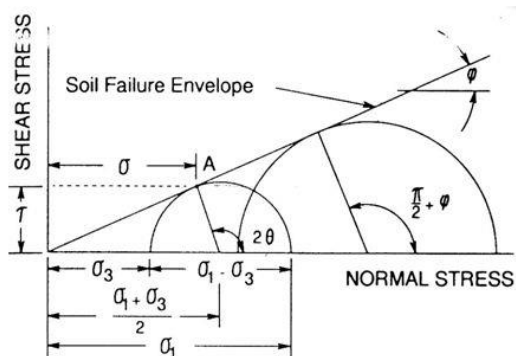


Figure 5.31-Mohr's circle representation of principal stresses.

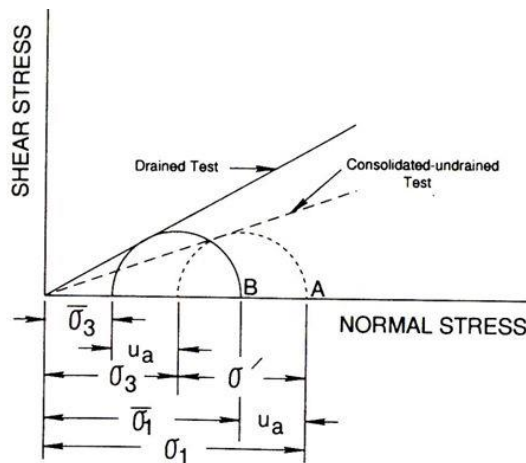


Figure 5.33-Effective-stress and total-stress envelopes.

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta$$

تنشها در صفحه گسیختگی

8

شکل ۲-۲: زاویه گسیختگی در خاک [۱۸].

برای تعیین زاویه صفحه گسیختگی با راستای افق  $\theta$  از (شکل ۲-۲) کمک می‌گیریم. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، زاویه خارجی برای مثلث ABC است. پس داریم:

$$2\theta = 90^\circ + \phi \longrightarrow \theta = 45^\circ + \frac{\phi}{2} \quad (۴-۲)$$

ابتدا به کمک (شکل ۳-۸) و دایره مور، مقادیر  $\sigma$  و  $\tau_f$  را بدست می‌آوریم:

$$\begin{cases} \sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta \\ \tau_f = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta \end{cases} \quad (۱-۵-۲)$$

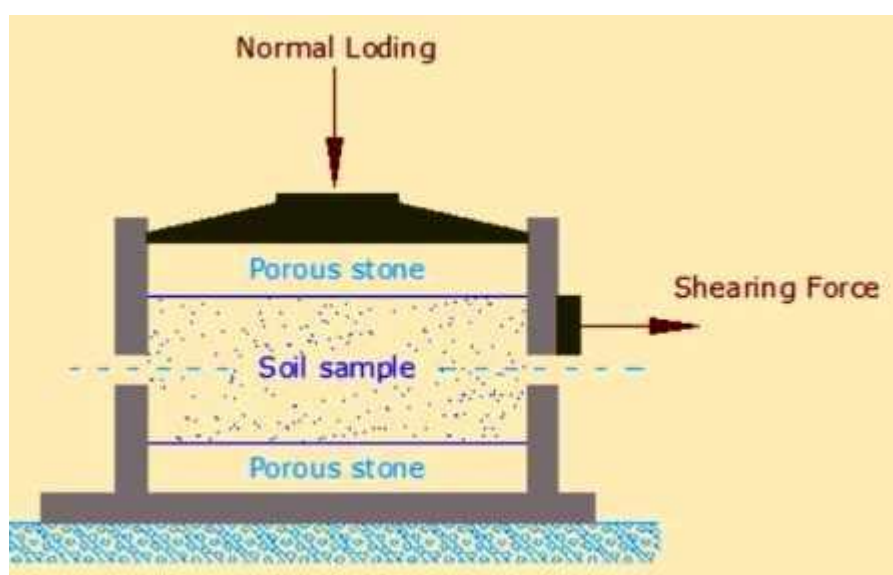
سپس مقادیر فوق را در رابطه  $\tau_f = c + \sigma \tan \phi$  جایگزین می‌کنیم و با استفاده از روابط مثلثاتی خواهیم داشت:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2 + 2c \tan \theta$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2 \left[ 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right] + 2c \tan \left[ 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right] \quad \text{و یا} \quad (2-5-2)$$

### ۲-۱-۴- پارامترهای مقاومت برشی (آزمایش برش مستقیم)

یکی از آزمون‌های تعیین پارامتر مقاومت برشی آزمایش برش مستقیم است. این آزمایش قدیمی‌ترین و ساده‌ترین آزمایش برشی است. در (شکل ۲-۲) شکل شماتیک وسیله آزمایش نشان داده شده که تشکیل یافته است از، دو جعبه برشی فلزی که نمونه آزمایش در داخل آن‌ها قرار می‌گیرد. شکل نمونه خاک در پلان، ممکن است مربع یا دایره باشد، (شکل ۲-۲) ضخامت نمونه آزمایشی ۱ اینچ و مساحت آن در پلان ۳ تا ۴ اینچ مربع می‌باشد. با استفاده از وزنه‌هایی از بالا نیروی قائم بر نمونه اعمال می‌شود. تنش قائم وارده می‌تواند تا مقدار ۱ نیوتن بر میلی‌متر مربع باشد. نیروی برشی توسط وزنه‌هایی بر نیمه فوقانی جعبه برشی تا لحظه گسیختگی نمونه اعمال می‌شود.



شکل ۲-۲: شماتیک دستگاه برش مستقیم، [۱۸].



شکل ۲- D : قالبهای دستگاه برش مستقیم (مربعی و دایره ای)

برحسب تجهیزات مورد استفاده، آزمایش برشی می تواند با کنترل تنش و یا کنترل تغییر شکل باشد. در آزمایش با کنترل تنش، نیروی برشی اعمالی با افزودن وزنه ها با گام مساوی تا لحظه گسیختگی نمونه افزایش داده می شود. شکست در امتداد صفحه جدایی دو نیمه فوقانی و تحتانی جعبه رخ می دهد ( شکل ۲- E). بعد از اعمال هر افزایش بار ، توسط یک گیج عقربه ای، تغییر مکان نیمه فوقانی جعبه برشی اندازه گیری می شود. تغییر در ارتفاع نمونه (به عبارت دیگر تغییر حجم نمونه) با قرائت یک گیج که تغییر مکان قائم نیمه فوقانی را اندازه می گیرد، به دست می آید [۱۸]. فرضیات پایاننامه بر اساس آزمایش برش مستقیم با روش کنترل کرنش می باشد.



شکل ۲- E : دستگاه برش مستقیم آزمایشگاه مکانیک خاک

در آزمایش با کنترل تغییر شکل، توسط یک موتور الکتریکی، یک تغییر مکان برشی با سرعت ثابت بر نیمه فوقانی اعمال می شود. مقدار تغییر مکان برشی با قرائت یک گیج عقربه ای که تغییر مکان



های افقی را اندازه گیری می کند، تعیین می گردد. نیروی برشی مقاوم نظیر هر تغییر مکان برشی توسط یک حلقه اندازه گیر افقی قابل اندازه گیری است. مشابه آزمایش با کنترل تنش، تغییر حجم نمونه توسط یک گیج قائم اندازه گیری می شود. در (شکل ۲-۵)، تصویری از دستگاه برش مستقیم با کنترل تغییر شکل نشان داده شده است.

تنش قائم:

$$\sigma = \frac{\text{نیروی قائم}}{\text{مساحت مقطع افقی نمونه}} = \text{تنش قائم} \quad (۲-۶)$$

تنش برشی مقاوم:

$$\tau = \frac{\text{نیروی برشی مقاوم}}{\text{مساحت مقطع افقی نمونه}} = \text{تنش برشی مقاوم} \quad (۲-۷)$$

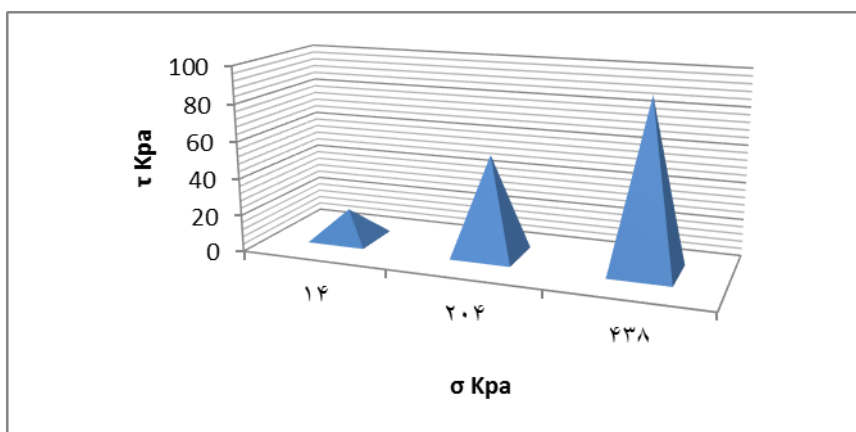
آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه های مختلف از یک نوع خاک با تنش های قائم مختلف تکرار می شود. تنش های قائم و مقادیر نظیر  $\tau_f$  به دست آمده، بر روی نموداری در مقابل یکدیگر رسم می شوند تا پارامترهای مقاومت برشی به دست آید. (شکل ۲-۶) نشان دهنده ی چنین نموداری برای ۳ آزمایش یا ۳ تنش قائم مختلف بر روی نمونه های به دست آمده از یک خاک رس می باشد. رابطه خطی متوسط مار بر نقاط تجربی مختلف به صورت زیر نوشته می شود [۱۸].

$$\tau_f = \sigma \tan \varphi \quad (۲-۸)$$

(توجه شود که برای ماسه  $C = 0$  و  $\sigma = \sigma'$  است)

بنابراین زاویه اصطکاک داخلی برابر است با:

$$\varphi = \tan^{-1} \left[ \frac{\tau_f}{\sigma} \right] \quad (۲-۹)$$



شکل ۲-F: نمودار تنش برشی مقابل تنش قائم برای خاک رس بدون نانو رس و آهک در آزمون برش مستقیم،

## ۲-۲- معرفی نانو:

فناوری نانو یا نانوتکنولوژی رشته‌ای از دانش کاربردی و فناوری است که جستارهای گسترده‌ای را پوشش می‌دهد. موضوع اصلی آن نیز مهار ماده یا دستگاه‌های در ابعاد کمتر از یک میکرومتر، معمولاً حدود ۱ تا ۱۰۰ نانومتر است. در واقع نانو تکنولوژی فهم و به کارگیری خواص جدیدی از مواد و سیستمهایی در این ابعاد است که اثرات فیزیکی جدیدی، عمدتاً متأثر از غلبه خواص کوانتومی بر خواص کلاسیک از خود نشان می‌دهند. فناوری نانو موج چهارم انقلاب صنعتی، پدیده‌ای عظیم است که در تمامی گرایش‌های علمی راه یافته و از فناوریهای نوینی است که با سرعت هرچه تمام تر در حال توسعه می‌باشد. از ابتدای دهه ۱۹۸۰ میلادی گستره طراحی و ساخت ساختمانها هر روزه شاهد نوآوری‌های جدیدی در زمینه مصالح کارآمدتر و پربازده‌تر در مقاومت، شکل پذیری، دوام و توانایی بیشتر نسبت به مصالح سنتی است. امروزه آنچه به عنوان ثروت و رفاه برای کشورها ذکر می‌شود، تکنولوژی است. بشر امروزه دغدغه دست یافتن به تکنولوژی‌های جدید مثل نانو را دارد. البته "نانو" فناوری جدیدی نیست ولی توانایی کاربردش در تمام عرصه‌های علوم و تاثیرش در فناوری‌های دیگر اهمیت زیادی دارد. ترویج فناوری نانو صرفاً به معنای فناوری و کاربردهای آن نمی‌باشد بلکه ترویج باید زمینه ساز ایجاد سایر زیرساخت‌های توسعه فناوری و رفع مشکلات موجود بر سر راه توسعه آن

<sup>1</sup>Nano

باشد. ولی این موضوع بدون آگاهی از "مدیریت فناوری"<sup>۱</sup> و درک مشکلات توسعه آن امکان پذیر نیست [۱۹].

## ۲-۲-۱- نانو چیست؟

نانو چیست؟ نانو واحد اندازه گیری، برابر با یک میلیاردیم متر است، در اصل کلمه "نانو" یک واژه ی یونانی به معنای "قد کوتاه" می باشد. (نه به اندازه یک میلیاردیم متر!) برای تصور این اندازه می توان گفت که نانو برابر با یک هزارم قطر موی انسان نانو به چه معنی است. [۱۹].

اصطلاح «نانو» از واژه یونانی Nanos (که در لاتین، Nanus نوشته می شود) مشتق شده و معنای کوتوله<sup>۲</sup> دارد. عبارت «نانو» پیشوندی است مانند سایر پیشوندها که در ابتدای واحدهای سنجش اندازه مانند ثانیه، مترو غیره می آیند. بنابراین، نانو نیز مانند دیگر پیشوندها نظیر سانتی، دسی، دکا، کیلو، مگا و غیره بیانگر مقیاس است. یک نانومتر (1nm) به معنای  $10^{-9}$  متر (یک میلیاردم متر) یا  $10^{-10}$  آنگستروم ( $10^{-10}$  Å) است. این اندازه، برابر ابعاد ۵ اتم است. به منظور درک درست مقیاس نانو، می توان گفت، هراتار موی انسان، قطری در حدود ۲۰۰،۰۰۰ نانومتر دارد.

## ۲-۲-۲- بررسی نانو تکنولوژی :

فناوری نانو یا نانو تکنولوژی رشته‌ای از دانش کاربردی و فناوری است که جستارهای گسترده‌ای را پوشش می‌دهد. موضوع اصلی آن نیز مهار ماده یا دستگاه‌های در ابعاد کمتر از یک میکرومتر، معمولاً حدود ۱ تا ۱۰۰ نانومتر است. در واقع نانو تکنولوژی فهم و به کارگیری خواص جدیدی از مواد و سیستمهایی در این ابعاد است که اثرات فیزیکی جدیدی عمدتاً متأثر از غلبه خواص کوانتومی بر خواص کلاسیک از خود نشان می‌دهند. فناوری نانو موج چهارم انقلاب صنعتی، پدیده‌ای عظیم است که در تمامی گرایش‌های علمی راه یافته واز فناوریهای نوینی است که با سرعت هرچه تمام تر در حال توسعه می‌باشد. از ابتدای دهه ۱۹۸۰ میلادی گستره طراحی و ساخت ساختمانها هر روزه شاهد

<sup>1</sup>Technology Treatment

<sup>2</sup> Dwarf

نوآوری‌های جدیدی در زمینه مصالح کارآمدتر و پربازده‌تر در مقاومت، شکل‌پذیری، دوام و توانایی بیشتر نسبت به مصالح سنتی است. طراحی، ساخت، توسعه و استفاده از محصولاتی که اندازه آنها در بازه (1 to 100 nm) قرار دارند را نانو تکنولوژی گویند. در حقیقت اینجا صحبت از ریزشدن است که این کار تماس بیشتر، فعالیت بیشتر و افزایش مساحت را ممکن می‌سازد. نانو یک مقیاس جدید در فناوری‌ها و یک رویکرد جدید در تمام رشته‌ها است و این توانایی را به بشر می‌دهد تا دخالت خود را در ساختار مواد گسترش دهد و در ابعاد بسیار ریز به طراحی و ساخت دست بزند و در تمام فناوری‌هایی که بشر در حال حاضر به آن دست یافته اثر بگذارد.

### ۲-۲-۳- نانو تکنولوژی چه کاربردی دارد؟

با توجه به نو بودن این فن آوری، هر سال کاربردهای جدیدی از آن در صنایع مختلف معرفی میشود. در مورد کاربرد های نانو تکنولوژی در صنعت ساختمان و برخی دیگر صنایع به طور خلاصه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: [۱۱]

\*نانو در بهبود کیفیت فضاهای شهری

- دیوارنویسی و تبلیغات:

-انتهی گرافیت‌ها (پوشش نانو ضد دیوار نویسی):

انتهی گرافیت کردن سطوح توسط پوششهای انتهی گرافیتی پایدار که دارای خاصیت ضد آب و ضد آلودگی زیاد هستند. پوششهای انتهی گرافیتی روی مصالح سبب می‌گردد رنگهای افشانه شده و پوستره‌های چسبانده شده به راحتی از روی سطوح دیوارها، موانع صوتی و پایه پلها در شهرها پاک شوند.

-خصوصیت خود تمیزشوندگی در زمین بازی کودکان:

فضای بازی کودکان در مرکز پارک که بخشی از آن برای محافظت در برابر نورواستفاده از پوشش‌های خود تمیزشونده استفاده شده است.

-تصفیه کننده هوا:

اگرچه مواد نانومتری توانند کاملاً هواراتصفیه کنند اما می‌توانند کیفیت هوارا بهتر کنند. این مواد بوها و آلودگی‌ها را نیز ریشه کن می‌کنند. خصوصیت تصفیه‌کنندگی هوای مصالح نانو هم در خارج و هم در داخل بناها نقش مهمی را در محیط خارج بازی می‌کند. [۱۶]

- رابطه نانو تکنولوژی و معماری:

گستره حوزه نانو تکنولوژی، معماری و ساختمان سازی را نیز در بر می‌گیرد. اساساً نانو تکنولوژی خود نوعی ساختن و بنا کردن است و از این حیث شباهت زیادی به معماری در مقیاس انسانی دارد. شاید مهمترین فرق آنها در مقیاس نانو ساختارها با ساختارهای معماری باشد. فن آوری نانو، فن آوری طبیعت است و در پی حقارت مقیاس انسان در فضا یا دگرگونی انسان در طبیعت نیست. این موضوع اثر مستقیم روی فرهنگ کاربران خواهد داشت. [۱۷]

- نانو تکنولوژی در صنعت ساختمان:

- بهبود خواص سیمان و بتن:

- بهبود خواص مکانیکی - افزایش کیفیت سیمان و بتن - جلوگیری از نفوذ عوامل مخرب خارجی

به داخل بتن

- نانو پوشش‌ها:

ایجاد پوشش عایق مناسب، عدم نفوذ عوامل خوردگی، افزایش مقاومت در برابر انتقال حرارت

افزایش مقاومت در برابر خوردگی، سایش و پوسیدگی، خاصیت خود تمیز شوندگی سطوح

رنگ‌های تصفیه‌کننده هوا

- نانو ضد آب‌کننده‌ها:

- نانو شیشه‌ها:

شیشه‌های خود تمیز شوند، شیشه‌های محافظ در برابر آتش، شیشه‌های کنترل‌کننده انرژی

- نانو آسفالت‌ها:

- نانو کامپوزیت‌ها:

- تصفیه کننده‌های آب و فاضلاب:

محصولات نانو مواد را هم می‌توان به صورت‌های زیر بیان کرد:

(۱) تولید مواد و محصولات : نانوتکنولوژی تغییر بنیادی مسیری است که در آینده موجب ساخت مواد و ابزارها خواهد شد امکان سنتز بلوک های ساختمانی نانو، با اندازه و ترکیب به دقت کنترل شده و چیدن آنها در ساختارهای بزرگتر که دارای خواص و کارکرد منحصر به فرد باشند، انقلابی در مواد و فرآیندهای تولید آنها ایجاد می کند که محققین قادر به ایجادشان نبوده اند. مواد سبک تر، قوی تر، قابل برنامه ریزی و کاهش هزینه عمر کاری از طریق کاهش دفعات نقص فنی، از مزایای نانو ساختارها می باشد.

(۲) پزشکی و بدن انسان : فراتر از آسان کردن استفاده بهینه از دارو و کیسوله کردن داروها<sup>۱</sup> نانوتکنولوژی می تواند فرمول هایی برای رهایش دارو<sup>۲</sup> تهیه کند که به نحوه حیرت انگیزی توان داروها را افزایش می دهد.

(۳) نانو در طراحی و ساختن مواد سبک وزن، پرقدرت و مقاوم در برابر حرارت : که مورد نیاز هواپیماها، راکت ها، ایستگاه های فضایی و سکوهای اکتشافی سیاره ای یا خورشیدی، نقش تعیین کننده ای دارد و با توجه به اینکه محیط فضا دارای نیروی جاذبه کم و خلا زیاد است، با نانو می توان ایجاد ساختارهایی که در زمین ممکن نیست را در فضا میسر کرد.

(۴) با استفاده از این فناوری می توان : ظرفیت ذخیره سازی اطلاعات را در حد ۱۰۰۰ برابر یا بیشتر افزایش داد. به طور مثال با این فناوری می توان ۵۰ عدد DVD را در یک هارد دیسک به ابعاد یک کارت اعتباری ذخیره کرد.

(۵) از دیگر مزیت های نانو : نانوتکنولوژیک موجب تغییرات شگرف در استفاده از منابع طبیعی، انرژی و آب خواهد شد. آلودگی آب را کاهش خواهد داد. امکان بازیافت و استفاده مجدد از مواد، انرژی و آب

را فراهم خواهد کرد. در زمینه انرژی نیز نانو تکنولوژی می تواند به طور قابل ملاحظه ای کارآیی، ذخیره سازی تولید انرژی را تحت تاثیر قرار داده و مصرف انرژی را پایین بیاورد.

از مزایای تولید با اجزای ریز:

▪ دقت زیاد (حتی در حد یک اتم)

▪ اتلاف انرژی حداقل

▪ حداقل ایجاد

▪ حداکثر استفاده از منابع اولیه [۱۹].

### ۲-۲-۴- ریچارد فاینمن و دیدگاههای بنیادیش:

در مورد فناوری نانو، دیدگاه های ریچارد فاینمن، نقش بسزایی در پی ریزی علوم نانو داشته است. او دیدگاه های خود را در یک سخنرانی در انجمن فیزیک آمریکا در سال (۲۹ دسامبر ۱۹۵۹، برابر با ۲۳ آذر ۱۳۳۸) ۱۹۵۹ با عنوان "آن پایین فضای بسیار زیادی وجود دارد" مطرح کرد. در این سخنرانی پیش بینی های قابل توجهی در زمینه کار با مواد و اجسام در ابعاد خیلی ریز طرح کرد که ذهن هر شنونده ای را به خود مشغول ساخت. هر چند پیشنهادات او در زمینه علوم نانو در آن دهه تعجب بر انگیز بوده است اما در این زمان با پیشرفت تکنولوژی شاهد تحقق بسیاری از پیشنهادات او هستیم.

وی در این سخنرانی در مورد دنیای بسیار کوچک ولی کارآمد اتم ها سخن می گوید. آنچه که ما امروزه فناوری نانو می خوانیم. در واقع علوم نانو نگرش متفاوتی در مورد ظهور پدیده های جدید که منجر به پیشرفت های فناوری می شود، در آینده نزدیک می دهد. علوم نانو به دنیای کوچکتر از اتم ها کاری ندارد. در مورد طراحی سیستم هایی که از کنار هم قرار دادن اتم ها و نحوه چیدمان آنها ایجاد میشود، که منجر به ایجاد خواص جدیدتری می گردد، سخن می گوید. در مورد کوچک کردن ماشینها و موتورها، در مورد علوم زیستی و اینکه چگونه میتوان دستگاهی بسیار کوچک ساخت که به کمک جراحان بیاید، در واقع در ۵۰ سال پیش فاینمن حوزه های فعالیت دانشمندان امروز در زمینه

فناوری نانو را معرفی می کرد، چیزی که امروزه شاهد تحقق آن هستیم. دیدگاه های ریچارد فاینمن، فیزیکدان برنده ی جایزه نوبل سال ۱۹۶۵، نقش بسزایی در پی ریزی علوم نانو داشته است [۱۹].

## ۲-۲-۵- نانوفناوری چیست؟ چگونه به آن دست یافته ایم؟

اگر یک متر را به یک میلیارد قسمت مساوی تقسیم کنیم، آن گاه هر یک قسمت آن یک نانومتر خواهد بود. گاهی برای سنجش ابعاد بسیار ریز اتمی و ملکولی از این واحد استفاده می شود. «نانوفناوری» دانشی است که به مطالعه و دستکاری مواد در سطح اتم ها یا ملکول ها می پردازد. در گفتمان رسانه ای به طور خلاصه از این دانش با اصطلاح «نانو» یاد می شود. بررسی، دستکاری و مطالعه مواد در چنین ابعاد بسیار ریزی موجب پدید آمدن خاصیت های ویژه ای می شود که پیش از رشد و توسعه این دانش هرگز امکان پذیر نبود. نانو، دانش میان رشته ای جدیدی است که قدمتش به چند دهه پیش باز می گردد. شیمی، فیزیک، پزشکی، زیست شناسی و بسیاری از حوزه های دیگر علوم تجربی در سال های اخیر از نانوفناوری بسیار تاثیر گرفته و متحول شده اند.

به طوری که امروزه بسیاری از تحقیقات در حوزه های علوم تجربی خواهی نخواهی با نانوفناوری پیوند می خورند. ماهیت میان رشته ای این حوزه سبب شده تا با سطوح مختلف امکانات، تحقیقات در زمینه نانو امکان پذیر باشد.

از این رو زمینه ای برای فعالیت به روز کشورهای در حال توسعه و از جمله ایران در این حوزه فراهم شده است. به طوری که پیشرفت های ایران در حوزه نانو فراتر از مرزهای کشورمان، مورد تأیید جامعه علمی جهانی قرار گرفته است.

در پاییز ۱۳۸۲ ستاد ویژه توسعه فناوری نانو در ایران با الگوبرداری از برنامه های توسعه نانوفناوری در بسیاری از کشورهای دنیا به پیشنهاد جمعی از پژوهشگران ایرانی و به دستور رئیس جمهور وقت تشکیل شد.

وظیفه اصلی این ستاد، تعیین مسیر حرکت و اولویت های ملی کشور، رفع موانع در زمان اجرا و



خدمت‌رسانی به بخش‌های اجرایی خصوصی و دولتی برای توسعه فناوری نانو به دور از سمت‌گیری‌های سیاسی و جناحی بوده است.

در حقیقت، فناوری نانو، دانشی نوظهور است، اما پیش‌بینی می‌شود که نویدبخش آینده ای پرفروغ در پیش روی آدمی باشد، چرا که این پتانسیل را دارد که دنیای پیرامون ما را دستخوش تحولات شگرفی کند [۲۱]. فناوری نانو به همراه زیست‌فناوری و فناوری اطلاعات، یکی از سه حوزه علمی است که با توجه به امکانات و استعدادهای موجود در کشور در صورت سرمایه‌گذاری و توجه می‌تواند در زمانی نه چندان طولانی ایران را به قطبی در منطقه برای صدور دانش و فناوری تبدیل کند. توجه به امکانات موجود در کشور برای برنامه‌ریزی در تحقیقات نانوفناوری موجب شده است دستیابی به موفقیت‌های چشمگیر در عمل ممکن شود.

ابداع «انبرک نوری» به دست محققان ایرانی که امکان دستکاری مواد در سطح اتم و ملکول را فراهم می‌کند، از جمله ابزارهایی است که این روزها در آزمایشگاه‌های جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. از سوی دیگر تعداد ایرانیانی که در دانشگاه‌های داخلی و همین‌طور دانشگاه‌های صاحب نام جهان در حوزه نانو به تحصیل و پژوهش می‌پردازند، در مقایسه با دیگر شاخه‌های علمی قابل توجه است. اکنون ایران پس از چین، آمریکا، هند، کره جنوبی، آلمان و ژاپن با تولید حدود ۴ درصد از مقالات علمی جهان در حوزه نانو، هفتمین کشور تولید کننده علم در این حوزه در جهان محسوب می‌شود و از این حیث در میان کشورهای غرب آسیا و جهان اسلام در جایگاه اول قرار می‌گیرد. پس از ایران، عربستان با فاصله‌ای زیاد و با وجود رشد ۳۱ درصدی، در رتبه نوزدهم تولید علم در نانوفناوری در جهان قرار دارد.

حالا می‌شود گفت کشورمان پس از قرن‌ها سکوت و خاموشی در گسترش مرزهای دانش دیگر مصرف کننده علم نیست و حالا درست روی لبه دانش و فناوری در حوزه نانو، دوشادوش کشورهای صاحب سبک در علوم مدرن رقابت می‌کند. [۱۹].

در اصل، فناوری نانو فرآیند دستکاری مواد در مقیاس اتمی و تولید مواد و ابزار به وسیله کنترل آنها

در سطح اتم ها و مولکول هاست. به بیان دیگر، فناوری نانو عبارت است از ترکیب ذرات بسیار ریز برای خلق مواد در حقیقت، نانو فناوری با ترکیب و پیوند ریز ذراتی موسوم به «نانوذرات»، فرآیند تولید «مصالح نانو» و کاربرد آنها سروکار دارد، در حالت کلی، چنانچه ابعاد ذرات مورد مطالعه، در طیفی بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر باشد، آنها را نانوذرات یا نانو مواد می نامند [۲۱].

## ۲-۲-۶- علم نانو و محدوده پیشرفت:

فن آوری نانو توانایی ساخت، کنترل و استفاده ماده در ابعاد نانومتری است. اندازه ذرات در فن آوری نانو بسیار مهم است، چرا که در مقیاس نانویی، ابعاد ماده در خصوصیات آن بسیار تأثیرگذار است و خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی تک تک اتم ها و مولکول ها با خواص توده ماده متفاوت است. این اندازه در مواد مختلف متفاوت است، اما به طور معمول مواد نانو به موادی که حداقل یکی از ابعاد آنها کوچک تر از ۱۰۰ نانومتر باشد گفته می شود. فاینمن، می خواهم حوزه ای را شرح دهم که هنوز جای کار زیادی دارد. این حوزه شبیه حوزه فیزیک ذرات بنیادی نیست، زیرا چیز زیادی در مورد اینکه ذرات بنیادی عجیب چه هستند نمی گوید. بلکه بیشتر شبیه فیزیک حالت جامد است، چون در مورد پدیده های عجیبی که در شرایط پیچیده اتفاق می افتند، اطلاعاتی جالبی میدهد. به علاوه، نکته ای که از همه مهمتر است، تعداد زیاد کاربردهای تکنیکی این حوزه است.

اشاره: واقعیت این است که علوم نانو نگرشی بنیادی درباره جهان در مقیاس کوچک به ما نمی دهند. نگرش بنیادی، پدیده های عالم را با معادلات ریاضی واحدی توضیح می دهد. علوم نانو به مقیاس کوچک تر از اتم کاری ندارند. در عوض، در مورد ذرات بنیادی بسیار ریزتر " به کوچکی کوارک ها و لیپتون ها که حداقل ده مرتبه کوچک تر از اتم هستند " فیزیک بنیادی دستاوردهای خوبی دارد.

از سوی دیگر، علوم نانو نگرش متفاوتی در مورد ظهور پدیده های جدید می دهند. در این نگرش، از کنارهم گذاشتن تعدادی برهم کنش ساده بین اجزای تشکیل دهنده سیستم، خاصیت جدیدی در کل سیستم، متفاوت با خواص اجزای آن بروز می کند؛ چیزی که در شبیه سازی های رایان های تاحدی مشاهده شده است. بنابراین، علوم نانو به ما نگرشی بنیادی در مورد پیشرفت های فناوری در آینده

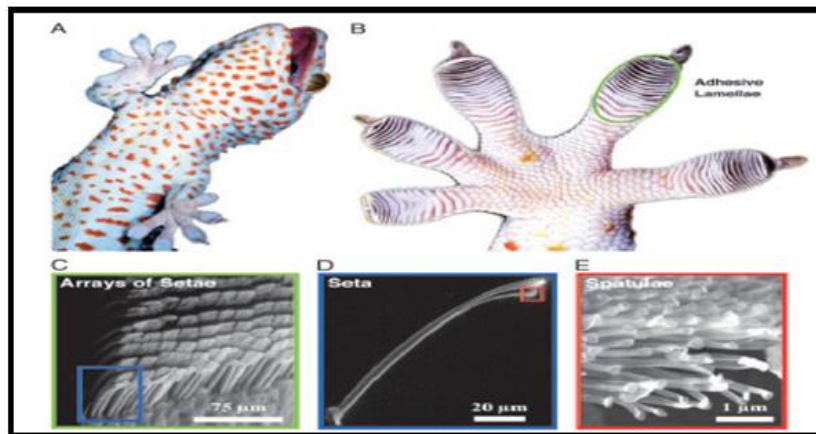
نزدیک می دهند [۱۹].

## ۲-۲-۷- کشف نانو در طبیعت.

آنچه در طبیعت وجود دارد منبع کاملی از فناوری‌ها و علوم مختلف است که انسان می‌تواند با الگو گرفتن از آن اختراعات نوینی را در تمامی زمینه‌های علمی انجام دهد. این مساله در رابطه با فناوری نانو نیز صادق است. به گونه‌ای که بسیاری از اختراعات در این زمینه با تقلید از طبیعت انجام شده است. در طبیعت موادی وجود دارند که به صورت ذاتی دارای ساختار و ویژگی نانویی هستند که به آنها نانومواد طبیعی می‌گویند. در این مقاله به بررسی برخی از نانومواد طبیعی که دانشمندان و پژوهشگران با الگو گرفتن از آنها توانسته‌اند اختراعاتی را در زمینه فناوری نانو به ثبت برسانند، پرداخته شده است [۱۹].

### ۱- مارمولک

مارمولک می‌تواند به هر سطح و در هر جهت بچسبد؛ حتی می‌تواند بر روی سطوح شیشه‌ای وارونه راه برود؛ درحالی‌که پای او در طول حرکت هیچگونه ماده چسبناکی ترشح نمی‌کند و انگشتهای او حتی در مقیاس میکروسکوپی هیچ مکشی ندارند. علت خواص عجیب مارمولک، در حرکت بر روی اجسام، در پاهای او نهفته است. پای مارمولک دارای شیارهای کوچکی است که سطح پاهایش را پوشانده است و هر کدام از شیارها در انتهای خود دارای ساختار شاخه‌ای و سلسله مراتبی است. هر ساختار شاخه‌ای (لیف) تقریباً  $100\mu\text{m}$  طول و  $5\mu\text{m}$  قطر دارد و حدود یک میلیون از آنها بر روی پاهای مارمولک قرار دارد. هر کدام از این لیفها به هزار برآمدگی نانومتری (لیفچه) تقسیم می‌شوند (شکل ۲-۱) و سطح کل پاهای مارمولک را افزایش می‌دهد. این لیفچه‌ها بسیار انعطاف‌پذیرند؛ به‌گونه‌ای که خود را قالب ساختار مولکولی هر سطح می‌کنند. فاصله اندک این لیفچه‌ها با سطح، سبب میشود که نیروی جاذبه‌ای قوی میان آنها برقرار گردد. به طوری‌که هر لیفچه توانایی مقاومت در برابر نیرویی به بزرگی  $200\text{N}\mu\text{m}$  اتمسفر فشار را دارد. به همین دلیل مارمولک یک مثال خوب در رابطه با اثر سطحهای بزرگ بر نیروهای کوچک است.

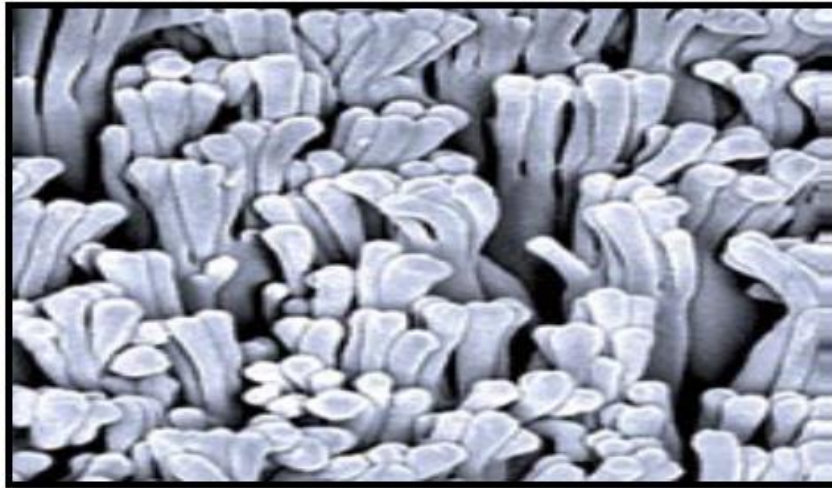


شکل ۱-۲: ساختار سلسله مراتب سیستم چسبناک پای مارمولک A: نمای زیرشکمی مارمولک که در حال بالا رفتن از یک سطح شیشه‌ای است B: شیارهای پای مارمولک C: چینش لیف‌ها که شیارها را تشکیل می‌دهند D: لیف E: لیفچه‌ها. یکی دیگر از ویژگی‌های پای مارمولک خاصیت «خود تمیزشوندگی» است که هیچگونه ذره را به خود جذب نمی‌کند؛ حتی اگر سطحی که مارمولک بر روی آن راه می‌رود پوشیده از آب یا شن و ماسه باشد. کشش بین نیروی چسباننده‌ی ذرات آلودگی به سطح و نیروی جذب کننده ذرات توسط لیفچه‌های کف پای مارمولک، منجر به عدم تعادل ذره آلودگی و دفع شدن آن می‌شود.

### ۱-۱- تقلید از مارمولک خانگی در فناوریهای جدید

الف) محققان موسسه STAR A در سنگاپور با استفاده از فناوری ساده قالبگیری، نانومواد ساخته‌اند که از خواص چسبنده پاهای مارمولک تقلید میکند. ایزابل رودریگوز و همکارانش با استفاده از روش آندیزاسیون، این ساختار سلسله مراتبی را تقلید کردند. این شیوه به آنها اجازه داد که به صورت کنترل شده‌ی نانوحفره‌های شاخه‌داری روی ورقه‌های آلومینیومی حکاکی کنند. این محققان سپس نانوحفره‌های مذکور را به عنوان قالبهایی برای ساخت یک سطح چسبنده خشک، استفاده کردند. این قالبها که با استفاده از فرآیندی به نام نانوچاپ با نیروی موینگی تقویت شده بود، روی صفحه‌های پلاستیک پلیکربنات چاپ شدند؛ در نتیجه یک صفحه پلیکربنات پر مو تشکیل شد (شکل ۲-۲). این محققان برای افزایش کیفیت ساختار مویی خود، دو سطح مجزا ساختند، یکی با موهای شاخه‌های نشده ساده و دیگری دارای موهای شاخه‌های شده در نوکشان جهت تشکیل لیفهای نانومتری بسیار

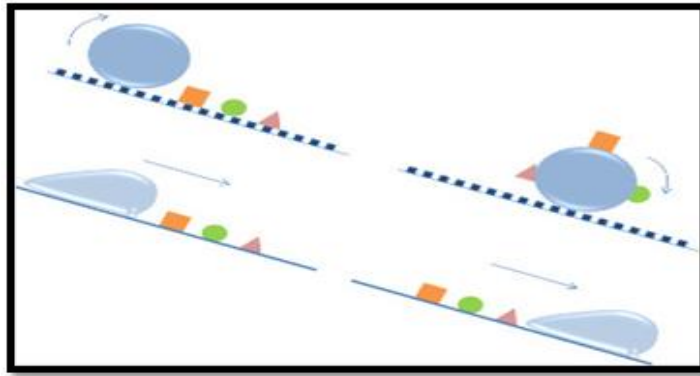
مشابه با آنچه در پای مارمولک مشاهده شده است؛ آنها متوجه شدند که نیروی چسبندگی خالص ماده‌ی مویی شاخه دار ۱۵۰ درصد بزرگتر از نیروی چسبندگی ماده خطی است.



شکل (۲-۲): موهای نانویی که فقط چندصد نانومتر قطر دارند و از سطح چسبنده- پاهای مارمولک تقلید می-کنند.

## ۲- نیلوفر آبی

گیاه نیلوفر آبی یک گیاه بومی آسیا است که دارای برگهایی با خاصیتی متمایز است. برگهای این گیاه حتی اگر محل سکونت آن پر از گل باشد، همیشه تمیز هستند. به همین علت این گیاه در برخی فرهنگها مانند هند، میانمار، چین و ژاپن مقدس شمرده میشود و آن را نماد پاکی و پاکدامنی میدانند. برگهای نیلوفر آبی دارای مشخصه برجسته‌ای در دفع آب هستند؛ به گونه‌ای که حرکت قطرات آب بر روی سطح برگ، آلودگی‌ها را به خود جذب کرده و از برگ دور می‌کند. سطح برگ نیلوفر آبی با لایه نازکی از برآمدگی‌های کوچک میکرومتری پوشیده شده و تعداد فراوانی بلور نانومتری روی این برآمدگی‌های میکرومتری قرار گرفته‌است. به همین دلیل مقدار نیروی چسبندگی سطحی بین آب و آلودگی بیشتر از مقدار نیروی چسبندگی سطحی میان آلودگی و سطح است. نتیجه این است که قطرات آب بر روی برگ‌های نیلوفر آبی حرکت میکنند و آلودگیها را می‌شویند (همانند شکل ۲-۳)



شکل (۲-۳): شکل هندسی رابطه بین سطح صاف و زبر و خودتمیزشوندگی

## ۱-۲- الهام گیری از نیلوفر آبی در فناوری های جدید

الف) گیاه نیلوفر آبی برای مهندسان و شیمیدانان ناسا به عنوان یک الگو قرار گرفت؛ آنان توانستند با تقلید از ویژگی طبیعی خود تمیزشوندگی این گیاه، پوششی با این خاصیت طراحی کنند. یک تیم از مهندسان هوا و فضای ناسا با همکاری کمپانی مستقر در آتلانتا (ان جیما) در حال بررسی و پژوهش بر روی این موضوع هستند تا بتوانند با طراحی پوششی خود تمیزشونده (با توجه به خاصیت برگ نیلوفر آبی) جمع شدن غبار فضایی بر روی سفینه‌های فضایی و لباس‌های فضایی فضانوردان مستقر در ماه را به حداقل برساند. این پوشش می‌تواند سفینه‌ها و لباس‌هایی فضایی فضانوردان را از خطر آسیب غبار و ذرات تیز فضایی حفظ کند.

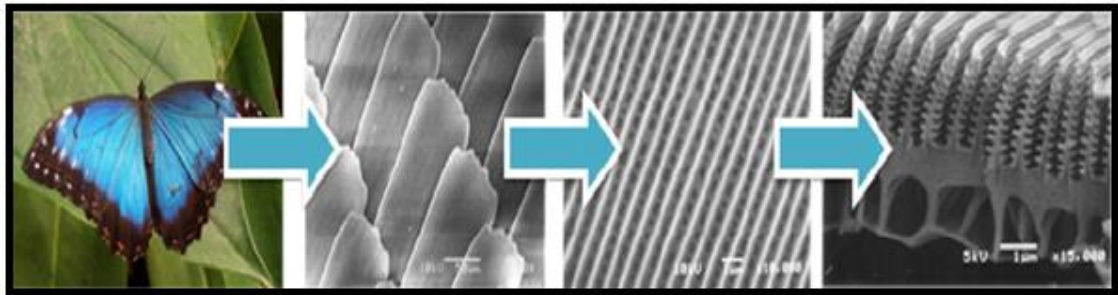
ب) دانشمندان در مرکز تحقیقات نوکیا در کمبریج بر این باورند که ممکن است بتوانند خاصیت آبگریزی نیلوفر آبی را در تلفن همراه با استفاده از فناوری نانو تکرار کنند. کریس باور، دانشمند ارشد در مرکز تحقیقات نوکیا اینگونه مینویسد: «درست مثل خیلی از دانشمندان، ما هم در حال تلاشیم تا چیزی را که طبیعت هزاران سال، بی‌عیب و نقص در حال انجام آن بوده، کپی برداری کنیم». برای رسیدن به خصوصیت ضدآب و ضدلک بودن، تیم مرکز تحقیقاتی نوکیا در مراحل نهایی طراحی پوششی ابر آبگریز است که در سطوح خارجی تلفن همراه به کار رود.

ج) همچنین امروزه با تقلید از برگ نیلوفر آبی لباس‌ها و سطوح خود تمیزشونده‌ای ساخته شده است که هیچگونه آلودگی را به خود جذب نمی‌کند. در اینگونه لباس‌ها برای ایجاد خاصیت آبگریزی در

پارچه‌ها، مولکول‌هایی در اندازه‌ی نانومتری به الیاف پارچه متصل می‌شوند. وجود این مولکول‌ها مانع از نفوذ و پخش شدن مایعات بر سطح پارچه می‌شود.

### ۳- پروانه مورفو رتنور

اگر با دقت بیشتری به طبیعت اطرافمان بنگریم، می‌یابیم که بسیاری از حیوانات و گیاهان اطرافمان در مقیاس نانو خواص ویژه‌ای دارند. سطح بال پروانه الگویی از نانوساختارهای چند لایه است. این نانوساختارها اغلب همانند یک فیلتر عمل کرده و تنها یک طول موج معین نور را منعکس و از خود عبور می‌دهند. بنابراین ما تنها یک نور روشن را می‌بینیم که در نتیجه برهمکنش نور با ساختار فیزیکی سطح بال پروانه است. برای نمونه بال‌های پروانه مورفو رتنور تنها به رنگ آبی روشن ظاهر می‌شود. علت این موضوع، ساختارهای نانومتری سطح بال پروانه است که باعث میشوند سطح بال تنها با این رنگ مشاهده شود. فلس‌های بال این پروانه همانند آجر سقف خانه‌ها در ردیف‌های منظمی چیده شده‌اند (شکل ۲-۴). هر فلس ابعادی در حدود  $200 \mu\text{m} \times 70 \mu\text{m}$  دارد. بر روی هر کدام از این فلس‌ها شیارهای نانومتری منظمی وجود دارد. این شیارهای نانومتری پولک‌های بال پروانه در اندازه‌ی طول موج ناحیه مرئی هستند و به علت ساختار چند لایه‌ای آنها تنها طول موج خاصی از نور را منعکس می‌کنند. در داخل هر شیار تداخل سازنده‌ای برای طول موج نور داده شده صورت می‌گیرد و در نهایت باعث تجزیه و شکست نور و انعکاس تنها یک طول موج مشخص از نور می‌شود پروانه‌ها از این سیستم رنگ‌سازی در بال‌های خود برای کنترل روشنی رنگ بال، استتار، تنظیم حرارت بدن خود و علامت‌دهی استفاده می‌کنند. البته لازم به ذکر است که همه‌ی پروانه‌ها از این نانوساختارها استفاده نمی‌کنند، بلکه بیشتر این حشرات زیبا از رنگدانه‌ها یا ساختارهای ساده‌تری برای تولید رنگ بال‌های خود استفاده می‌کنند.



شکل (۲-۴): افزایش بزرگنمایی بال پروانه مورفو رتنور

### ۳-۱- الهام‌گیری از پروانه مورفو رتنور در صنعت

امروزه دانشمندان با الهام از پروانه مورفو آبی قادر به ساخت پارچه‌ها و لوازم آرایشی بدون استفاده از مواد و رنگ شیمیایی شده‌اند که همانند بال پروانه مورفو با کمک انعکاس طیف خاصی از نور به تولید رنگ می‌پردازد.

همچنین دانشمندان امیدوارند با استفاده از بال پروانه‌ها به عنوان الگو بتوانند موادی را برای اهداف فناوری مصنوعی ابداع کنند. برای مثال می‌توان از فلس‌های این پروانه برای تولید پارچه‌هایی مقاوم در برابر کم رنگ شدن استفاده کرد که نیازی به رنگ نداشته و از هر زاویه‌ای قابل دیدن باشند.

### ۴-تار عنکبوت

تار عنکبوت از یک پروتئین رشته‌ای به نام فیبروئین ساخته شده است. این پروتئین سرشار از آمینواسیدهای آلانین و گلیسین، است و توسط غده زیر شکمی عنکبوت تولید می‌شود. در شکم عنکبوت غده‌هایی جای گرفته‌اند که ابریشم تولید می‌کنند. در قسمت بالای شکم نیز اندام ریسنده تعبیه شده است. اندام ریسنده‌ی عنکبوت دارای سوراخ‌های بسیار ریزی است که ابریشم از درون آن با فشار بیرون می‌جهد. ابریشم به صورت مایع از اندام عنکبوت بیرون می‌آید، ولی در مجاورت هوا بی‌درنگ جامد و سخت می‌شود. نوع و ترکیب تار به عواملی مانند گونه عنکبوت، تغذیه، محیط و متابولیسم بدن عنکبوت بستگی دارد. تار عنکبوت دارای ویژگی‌های خارق‌العاده‌ای است که سال‌ها ذهن دانشمندان را به خود مشغول کرده است. از جمله این ویژگی‌ها استحکام، چسبندگی، کشسانی و در عین حال وزن کم این تارها است. تحقیقات جدید نشان داده است که تار عنکبوت از نانوبلورهای



ریزی تشکیل است که علت اصلی ویژگی‌های تار عنکبوت نیز از همین نانوبلورها سرچشمه می‌گیرد. حتی امروزه چندین پژوهش با هدف تغییر ژنتیک عنکبوت برای تغییر ترکیب تار عنکبوت و بهبود خواص مکانیکی الیاف انجام شده است.

#### ۱-۴- کاربرد تار عنکبوت در فناوریهای نوین

الف) پروفیسور گرس مکینلی و همکارانش در سال ۲۰۰۷ در موسسه‌ای علمی در ماساچوست توانستند با تقلید از تار عنکبوت موفق به ساخت نانوکمپوزیت‌های پلیمری شوند که دو خاصیت کشسانی و استحکام فراوان را با هم دارد. از این مواد در صنعت، پزشکی و ساخت پارچه‌های مقاوم در برابر پارگی استفاده می‌شود.

ب) دو ویژگی کشسانی و استحکام فراوان و در عین حال سبک وزنی در تار عنکبوت باعث شده است که ساخت جلیقه‌های ضدگلوله از این ماده طبیعی در چند سال اخیر مورد توجه قرار گیرد. هنرمند هلندی جسیکا اسکین و همکارانش موفق به ساخت جلیقه‌های ضد گلوله از تار عنکبوت شدند. این جلیقه‌ها به سبب وزن کمی که دارند بسیار کارآمدتر از جلیقه‌های کنونی هستند که به علت وزن زیاد مانع عکس‌العمل به موقع می‌شوند. اگر چه رشته‌های تار عنکبوت ممکن است توسط برخی تفنگ‌ها با کالیبر بالا پاره و شکسته شود اما استحکام آنها چهار برابر استحکام ماده کولار است. ماده کولار هم اکنون در جلیقه‌های ضدگلوله استفاده می‌شود [۲۰].

طبیعت همواره علمی را در خود جای داده است که انسان‌ها به دلیل علم محدود خود قادر به تشخیص آنان نیستند. برای مثال علم نانو که مارمولک هزاران سال است از این علم برای حرکت بر روی اجسام استفاده می‌کند، بدون آنکه انسان از این موضوع با خبر باشد. این نشان می‌دهد که طبیعت همواره چند گام جلوتر از انسان است به گونه‌ای که انسان می‌تواند با الگوگیری از طبیعت به تکمیل علم خود در بسیاری از زمینه‌ها بپردازد. علم نانو تنها بخشی کوچکی از طبیعت به شمار می‌رود، مطمئناً طبیعت علاوه بر نانو علمی دیگر را در خود جای داده است و هم اکنون در حال استفاده از آنان است، اما انسان‌ها قادر به شناسایی آنها نیستند. این علوم نیز همانند فناوری نانو در

آینده و با پیشرفت علم توسط پژوهشگران شناسایی و در تکمیل و پیشرفت علم الگو گرفته خواهند شد. دقت در طبیعت به پیشرفت علم و علم نیز به شناخت بیشتر طبیعت کمک میکند؛ که این نشان دهنده‌ی رابطه متقابل علم و طبیعت است؛ به گونه‌ای که انسان‌ها می‌توانند با دقت در طبیعت، پاسخ سوالات خود را در تمامی زمینه‌ها بیابند [۲۰].

## ۲-۲-۸- تاریخچه نانو فناوری

در طول تاریخ بشر از زمان یونان باستان، مردم و به‌خصوص دانشمندان آن دوره بر این باور بودند که مواد را می‌توان آنقدر به اجزاء کوچک تقسیم کرد تا به ذراتی رسید که خردناشدنی هستند و این ذرات بنیان مواد را تشکیل می‌دهند، شاید بتوان دموکریتوس فیلسوف یونانی را پدر فناوری و علوم نانو دانست چرا که در حدود ۴۰۰ سال قبل از میلاد مسیح او اولین کسی بود که واژه اتم را که به معنی تقسیم‌نشده‌ی در زبان یونانی است برای توصیف ذرات سازنده مواد به کار برد.

با تحقیقات و آزمایش‌های بسیار، دانشمندان تاکنون ۱۰۸ نوع اتم و تعداد زیادی ایزوتوپ کشف کرده‌اند. آنها همچنین پی برده‌اند که اتم‌ها از ذرات کوچکتری مانند کوارک‌ها و لپتون‌ها تشکیل شده‌اند. با این حال این کشف‌ها در تاریخ پیدایش این فناوری پیچیده زیاد مهم نیست.

نقطه شروع و توسعه اولیه فناوری نانو به طور دقیق مشخص نیست. شاید بتوان گفت که اولین نانو تکنولوژیست‌ها شیشه‌گران قرون وسطایی بوده‌اند که از قالب‌های قدیمی (Medieval forges) برای شکل دادن شیشه‌هایشان استفاده می‌کرده‌اند. البته این شیشه‌گران نمی‌دانستند که چرا با اضافه کردن طلا به شیشه رنگ آن تغییر می‌کند. در آن زمان برای ساخت شیشه‌های کلیساهای قرون وسطایی از ذرات نانومتری طلا استفاده می‌شده است و با این کار شیشه‌های رنگی بسیار جذابی بدست می‌آمده است. این قبیل شیشه‌ها هم‌اکنون در بین شیشه‌های بسیار قدیمی یافت می‌شوند. رنگ به‌وجودآمده در این شیشه‌ها برپایه این حقیقت استوار است که مواد با ابعاد نانو دارای همان خواص مواد با ابعاد میکرو نمی‌باشند [۲۲ و ۲۳].

در واقع یافتن مثالهایی برای استفاده از نانو ذرات فلزی چندان سخت نیست. رنگدانه‌های تزیینی جام

مشهور لیکرگوس در روم باستان ( قرن چهارم بعد از میلاد) نمونه‌ای از آنهاست. این جام هنوز در موزه بریتانیا قرار دارد و بسته به جهت نور تابیده به آن رنگهای متفاوتی دارد. نور انعکاس یافته از آن سبز است ولی اگر نوری از درون آن بتابد، به رنگ قرمز دیده می‌شود. آنالیز این شیشه حکایت از وجود مقادیر بسیار اندکی از بلورهای فلزی ریز ۷۰۰ (nm) دارد ، که حاوی نقره و طلا با نسبت مولی تقریباً ۱۴ به ۱ است حضور این نانوبلورها باعث رنگ ویژه جام لیکرگوس گشته است.

در سال ۱۹۵۹ ریچارد فاینمن مقاله‌ای را درباره قابلیت‌های فناوری نانو در آینده منتشر ساخت. باوجود موقعیت‌هایی که توسط بسیاری تا آن زمان کسب‌شده بود، ریچارد. پی. فاینمن را به عنوان پایه گذار این علم می‌شناسند. فاینمن که بعدها جایزه نوبل را در فیزیک دریافت کرد در آن سال در یک مهمانی شام که توسط انجمن فیزیک آمریکا برگزار شده بود، سخنرانی کرد و ایده فناوری نانو را برای عموم مردم آشکار ساخت.

سخنرانی او شامل این مطلب بود که می‌توان تمام دایره‌المعارف بریتانیکا را بر روی یک سنجاق نگارش کرد. یعنی ابعاد آن به اندازه ۱/۲۵۰۰۰ ابعاد واقعیش کوچک می‌شود. او همچنین از دوتایی کردن اتم‌ها برای کاهش ابعاد کامپیوترها سخن گفت (در آن زمان ابعاد کامپیوترها بسیار بزرگتر از ابعاد کنونی بودند اما او احتمال می‌داد که ابعاد آنها را بتوان حتی از ابعاد کامپیوترهای کنونی نیز کوچکتر کرد. او همچنین در آن سخنرانی توسعه بیشتر فناوری نانو را پیش‌بینی نمود.

## ۲-۹-۲- رویداد های مهم تاریخی در شکل گیری علوم نانو

برخی از رویدادهای مهم تاریخی در شکل گیری فناوری و علوم نانو

۱۸۵۷ مایکل فارادی محلول کلوئیدی طلا را کشف کرد

۱۹۰۵ تشریح رفتار محلول‌های کلوئیدی توسط آلبرت انیشتین

۱۹۳۲ ایجاد لایه‌های اتمی به ضخامت یک مولکول توسط لنگمویر (Langmuir)

۱۹۵۹ فاینمن ایده " فضای زیاد در سطوح پایین " را برای کار با مواد در مقیاس نانو مطرح کرد

۱۹۷۴ برای اولین بار واژه فناوری نانو توسط نوریو تانیگوچی بر زبانها جاری شد

- ۱۹۸۱ IBM دستگاهی اختراع کرد که به کمک آن می توان اتمها را تک تک جابه جا کرد.
- ۱۹۸۵ کشف ساختار جدیدی از کربن C60
- ۱۹۹۰ شرکت IBM توانایی کنترل نحوه قرارگیری اتمها را نمایش گذاشت
- ۱۹۹۱ کشف نانو لوله های کربنی
- ۱۹۹۳ تولید اولین نقاط کوانتومی با کیفیت بالا
- ۱۹۹۷ ساخت اولین نانو ترانزیستور
- ۲۰۰۰ ساخت اولین موتور DNA
- ۲۰۰۱ ساخت یک مدل آزمایشگاهی سلول سوخت با استفاده از نانو لوله
- ۲۰۰۲ شلوارهای ضدلک به بازار آمد
- ۲۰۰۳ تولید نمونه های آزمایشگاهی نانوسلول های خورشیدی
- ۲۰۰۴ تحقیق و توسعه برای پیشرفت در عرصه فناوری نانو ادامه دارد [۲۴].

## ۲-۲-۱۰- معرفی نانوذرات رس

نانورس ها (Nanoclay) کانی هایی هستند که حداقل یکی از ابعاد آنها در حد نانومتر باشد. این مواد به دلیل ارزانی و در دسترس بودن، توجه زیادی در زمینه فناوری نانو به خود جلب کرده اند، همچنین اندازه کوچک این مواد آنها را قادر ساخته تا بتوانند با مواد دیگر که در این زمینه وجود دارند، رقابت کنند

نانورس ها مواد منحصر به فردی هستند که به عنوان مواد افزودنی برای ساخت نانوکامپوزیت ها و بهبود قابل توجه خواص مواد پلیمری به کار می روند.

درزیر میکروسکوپ الکترونی با قدرت تفکیک بالا مشاهده می شود که نانورس ها شامل صفحات کوچک و نا منظم رسی هستند که در حدود ۱ نانومتر ضخامت و ۱۰۰ نانومتر قطر دارند. رس های رایج به صورت طبیعی به عنوان مواد معدنی به شمار می آیند. بسیاری از آن ها سیلیکات های آلومینیم می باشند که ساختار ورقه ای دارند. شایع ترین نانو رس مونت موریلنت (از خانواده اسمکتیت) می باشد. انواع

دیگر نانو رس ها هکتوریت ها و رس های سنتزی (برای مثال هیدروتالکیت) می باشد.

نانورس ها سطح ویژه ای در حدود ۷۵۰ مترمربع بر گرم دارند. غالباً برای اصلاح خواص مکانیکی مواد پلیمری، آنها را با پرکننده ها تقویت می کنند. خالص بودن و ظرفیت تبادل کاتیونی، دو خصوصیت مهم برای موفقیت نانورس ها - به عنوان عامل استحکام در پلیمرها- به شمار می رود. خالص بودن رس خصوصیات مکانیکی پلیمر را افزایش می دهد که این به افزایش تبادل کاتیونی رس در ترکیب شدن رس با پلیمر کمک می کند. رس ها موادی ارزان هستند که می توان با تغییر یون ها، اشباع کردنشان با عناصر فلزی و تیمار کردنشان با اسیدها، آنها را به کاتالیزور مناسب تبدیل کرد.

در واقع امکان به کارگیری رس ها در مقادیر بسیار کم باعث کاهش وزن، استحکام بالاتر و کاهش خارق العاده عبور گازها در موادی مثل پلیمرها می شوند. مشکلات اصلی در زمینه نانورس ها، جداسازی و توزیع یکنواخت صفحه های کوچک رسی و تبدیل رس های آبدوست به آبگریز به منظور افزایش تعامل با پلیمرها است. پلیمرها در صنعت پلاستیک و بسته بندی مواد غذایی به کار می روند و این بازاری بزرگ برای آنها به شمار می رود.

نانورس هایی که به خوبی آماده شده و با مقادیر کم (کمتر از ۰.۵٪) به یک ترکیب پلیمری اضافه شده و می توانند نانوکامپوزیت های پلیمری (بدون تفاوت خیلی زیاد در ظاهر پلاستیک) تولید کنند که خصوصیات بسیار برجسته ای مانند وزن سبک تر، خواص ضدخش و خواص عبورناپذیری در برابر گازها و اشتعال پذیری کمتر ایجاد کنند [۲۱].

## ۲-۱۰-۱ کاربرد نانوذرات رس

نانو رس ها به دلیل ویژگی های خاصشان، در صنعت داروسازی و پزشکی مورد توجه بسیاری قرار گرفته اند. این رس ها در ساخت انواع داروها به عنوان ماده خام و مواد کمکی در سنتز دارو مورد استفاده قرار می گیرند.

از مونت موریلنت به دلیل داشتن خصوصیات تعلیق، انتشار و پراکندگی خوب و قالب دار شدن به عنوان مکملی خوب در پزشکی بسیار مورد استفاده قرار می گیرد. قرار گرفتن مولکول های دارو در بین

لایه ای رس ها، می تواند کارایی آن را برای استفاده های بیولوژیکی تغییر دهد.

نانورس ها در داروها می توانند: یک دارو را از تخریب محافظت کنند، جذب دارو را از طریق تسهیل توزیع

آن از غشای روده افزایش دهند، باعث تعدیل اثر بدن برداروشده و توزیع بافتی را تغییر دهند.

زمینه های مختلف استفاده از نانورس ها

\* به عنوان فاز تقویتی ماتریکس پلیمرها برای تهیه نانوکامپوزیت ها

\* تهیه رنگ و جوهر

\* تهیه گریس ها

\* پزشکی و داروسازی

\* وسایل آرایشی

\* تصفیه فاضلاب های شهری و صنعتی

\* کشاورزی [۲۳].

## ۲-۲-۱۰-۲ خواص نانورس ها

کی از مهمترین خصوصیات نانورس ها نسبت طول به ضخامت بسیار بالای تک تک صفحات (از ۳۰۰

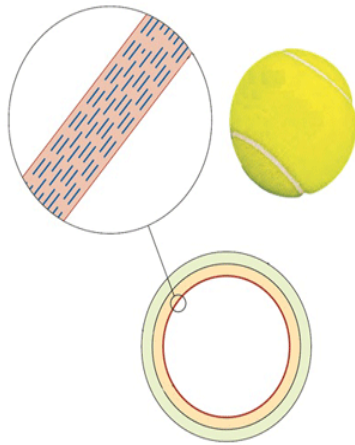
به ۱ و ۱۵۰۰ به ۱ است) است. مساحت سطح صفحات جدا و پراکنده می تواند به ۱۰۰۰ m<sup>2</sup>/g برسد. به

علت ساختار صفحه ای، نانورس ها مواد پلیمری معمول را تقویت می کنند ، یعنی خواص مکانیکی

آنها را بهتر می کنند، افزایش استحکام، مدول و ثبات ابعادی از این موارد است. صفحات نانورس به

عنوان محافظ در برابر رطوبت و مواد شیمیایی به خوبی به عنوان حائلی برای جلوگیری از نفوذ یا عبور

گازها عمل می کنند. مطابق شکل (۲-۵)



شکل (۲-۵) - محافظ در مقابل رطوبت و گازها

پلیمرهایی که با نانورس ها ترکیب شده اند در مقایسه با مواد پلیمری رایج خاصیت ضدگرمایی و ضدآتش بالاتری نشان می دهند و کارایی بیشتری در خاموش کردن شعله دارند و تغییر شکل آنها در معرض دماهای بسیار بالا یا مواد شیمیایی کمتر است. نانوکامپوزیت هایی که با استفاده از نانورس ها ساخته می شوند، رسانایی الکتریکی و تمیزی نوری بهتری نیز نشان می دهد. یکی از نتایج مهم باردار بودن نانورس ها (یعنی توانایی عوض کردن یونها) امکان سازگار کردن خصلت متضاد آنها یعنی ذات کاملاً آبدوست با پلیمرها است. چرا که خیلی از پلیمرها آبگریزند. عملکرد ضروری برای تشکیل نانوکامپوزیتهای پلیمر رس، تغییر قطبیت رس و تبدیل آن به مواد آلی دوست (آبگریز) می باشد.

نانورسها (Nano clay) کانی‌هایی هستند که حداقل یکی از ابعاد آنها در حد نانومتر باشد. این مواد به دلیل ارزانی و در دسترس بودن ، توجه زیادی در زمینه فناوری نانو به خود جلب کرده‌اند، همچنین اندازه کوچک این مواد آنها را قادر ساخته تا بتوانند با مواد دیگر که در این زمینه وجود دارند، رقابت کنند

در سال ۱۹۸۰ با تهیه نانوکامپوزیتهای نایلون و رس در صنایع خودروسازی، نانوکامپوزیت های نانورس شناخته شدند. در نانورسهای آلی دو لایه از چهاروجهی های  $SiO_2$  مستقر در یک صفحه ساختارهای چهاروجهی ترکیباتی مانند سدیم، آلومینیوم و منگنز را دربرمیگیرند. نانورسها می توانند سختی و

استحکام پلیمرها را بالا برده و میزان آتش‌پذیری الیاف پلیمری و عبوردهی گازهایی مانند اکسیژن را در ظروف پلاستیکی کاهش دهند. قطعات نانوکامپوزیت پلی پروپیلنی که حاوی ۵/۲ درصد نانورس است با ایجاد یک استحکام قابل قبول موجب ۲۰ درصد صرفه جویی در وزن می‌شود. این قطعات در بدنه خارجی استیشن‌ها استفاده شده است. کاربرد نانوکامپوزیت‌های پلی پروپیلنی در تهیه بدنه خارجی خودرو، در فیلم‌های بسته‌بندی نایلونی، در بطری‌های نگهداری مواد نوشیدنی، در لوله‌ها و در پوشش‌های کابل و سیم در حال گسترش است.

برآورد شده که استفاده گسترده نانوکامپوزیتها در خودروها تنها در آمریکا می‌تواند یک و نیم میلیارد لیتر در سوخت سالیانه صرفه جویی ایجاد کند و باعث کاهش تولید دی‌اکسیدکربن به میزان پنج میلیارد کیلوگرم در سال شود. باید توجه کرد که تنها با اضافه کردن نانوذرات به یک پلیمر به خواص مورد نظر نمی‌رسیم بلکه آرایش ذرات در ماتریس پلیمری در خواص نهایی موثر است. نانوکامپوزیت‌های متشکل از نانورس را می‌توان به نحوی طراحی کرد که عبور مقدار کم گاز را هم غیر ممکن سازد. در لاستیک‌ها و بطری‌های نوشابه می‌توان از این نانوکامپوزیتها استفاده کرد. چنین ساختاری به افزایش کارایی و حفظ حالت در توپ‌های تنیس نیز منجر شده است. تنها علت ایجاد چنین خاصیتی نحوه استقرار صفحات چند نانومتری قرار گرفته در بین ماده است. استفاده از یک ترکیب نانوکامپوزیت رسی خاص باعث جلوگیری از نفوذپذیری لایه و افزایش عمر توپ به دو برابر شده است.

از ویژگی‌های دیگر نانورس‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

-مقاوم در برابر شعله

ویژگیهای ایستادگی در برابر شعله در نانورس‌ها به علت تشکیل لایه‌ای ذغالی در هنگام سوختن نانوکامپوزیت می‌باشد. ذغال خود به عنوان عایق و یک ماده نسوز عمل کرده و میزان آزاد شدن گازهای فرار در سطح شعله را کاهش می‌دهد (شکل ۲-۶). تشکیل ذغال توجیهی برای بهبود ثبات نانوکامپوزیت در برابر حرارت، جداسازی فیزیکی پلیمر و قسمت سوخته آن است.

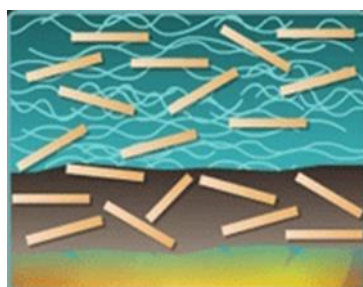




شکل ۲-۶- مقاومت ذرات نانو در حرارت

-ممانعت از عبور گازها

صفحات نانورس می توانند مسیری پر پیچ و خم ایجاد کنند که از نفوذ بخارهای گازی و مایعات به درون پلیمر جلوگیری کرده و علاوه بر خواص برجسته در ممانعت عبور گازها سبب بهتر شدن مقاومت شیمیایی و مقاومت در برابر رطوبت نیز می شود (شکل ۲-۷).



شکل ۲-۷- ممانعت در عبور گازها

درون توپ تنیس هوای فشرده قرار دارد. لایه بیرونی و پوسته اجزای یک توپ معمولی هستند. در قسمت درونی این توپ ها، یک لایه از جنس نانوکامپوزیت پلیمری قرار دارد و مانع عبور هوا از توپ می شود

-استحکام مکانیکی

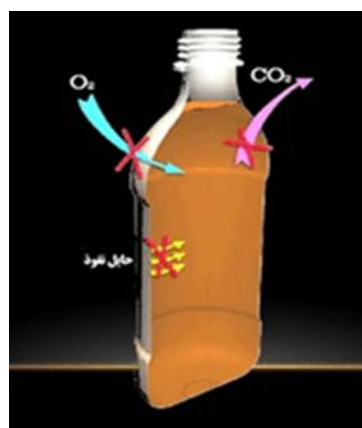
نانوکامپوزیتهای رس را می توان در بطری ها هم استفاده کرد. کارخانه های بسته بندی به دنبال

تولید بطری هایی هستند که به محکمی شیشه بوده ولی به راحتی شکسته نمی شوند (شکل ۲-۸).  
 در بطری های پلاستیکی با ذرات نانورس این بطری ها را به محکمی شیشه یا حتی محکم تر کرده  
 است و احتمال شکستن آنها کمتر است.



شکل ۲-۸- ظرف مستحکم ساخته شده نانو

تقویت کننده های نانومتری حدوداً به ابعاد مولکولی پلیمرها می رسند. این امر موجب تقابل نزدیک  
 دو ماده با یکدیگر می شود. وقتی پلیمر به خوبی با نانورس اصلاح می شود، ذرات پرکننده با پلیمرها  
 برخورد می کنند و مناطق محدودی در سطح ذرات ایجاد می کنند. این امر بخشی از زنجیره پلیمری  
 را تثبیت می کند که اثر تقویت کننده ای را در سطح دارد. [۲۱ و ۲۲]  
 ترکیب نانوذرات به نحوی است که مانع فساد مایعات و تغییر رنگ و بوی آنها شده و تاریخ مصرف آنها  
 را به شش ماه افزایش داده است. بعضی از کارخانه های غذایی از جاذب های اکسیژن برای جلوگیری  
 از رشد پاتوژن ها و موجودات زنده هوازی استفاده می کنند که این امر باعث فساد غذا و ناسالم  
 شدنشان می شود. (شکل ۲-۹).



شکل ۲-۹- ظرف مانع فساد نانو

## ۳-۲ - بهسازی - روشهای تثبیت خاک

### ۳-۲-۱ - مقدمه

#### تثبیت خاک

تغییر عملکرد خاک به منظور اصلاح کاربرد مهندسی خاک آن، به معنی اعم، تثبیت خاک نامیده می شود. افزایش هزینه ی ساخت راه، سد، راه آهن و فرودگاه و به طور کلی سازه های خاکی با توجه به محدود بودن بودجه و سرعت اجرای کار سبب می گردد تا مهندسان برای جلوگیری از جابه جایی زیاد احجام از مصالح محلی، حداکثر استفاده را نمایند. اصلاح یا تثبیت خاک به طور کلی برای دستیابی به اهداف زیر انجام می گیرد [۲۴].

الف) افزایش مقاومت و خواص ژئوتکنیکی و افزایش توان باربری خاک (ب) تغییر نفوذپذیری و کاهش درصد جذب آب و جلوگیری از تورم (ج) پیش گیری از نشست (د) کاهش چسبندگی در خاک های با چسبندگی زیاد (ه) افزایش چسبندگی در مورد خاک های با چسبندگی کم (ماسه بادی) [۲۴و۲۵].

### ۳-۲-۲ - خاک های مشکل آفرین و روش های بهسازی آن

انتخاب روش تثبیت خاک به صورت طبقه بندی شده امر مشکلی است، مهندسی ژئوتکنیک می باید با توجه به کلیه ی مسائل فنی - اقتصادی - نیروی انسانی و ماشین آلات، تجربه ی شخصی و نتایج آزمایشات، روش بهینه را انتخاب و اقدام به تثبیت خاک کند. به طور کلی اهم روش های اصلاح یا تثبیت خاک به صورت فهرست به شرح زیر است:

تثبیت مکانیکی، ۲- تثبیت الکتریکی، ۳- تثبیت حرارتی، ۴- تثبیت به روش زهکشی، ۵- تثبیت شیمیایی، ۶- تثبیت مکانیکی با سیمان، ۷- تثبیت با آهک، ۸- تثبیت با قیر. اصلاح خاک در کلیه ی موارد مهندسی خاک و به خصوص در شرایط ضعیف بودن خاک مطرح است. صرف نظر از مسائل مربوط به مکانیک خاک و کاربرد آن در پی سازی و غیره ... یکی از معمول ترین کاربرد آن در تقویت

راه سازی و باند فرودگاه است. بنابراین مسأله ی مورد توجه برای مهندس طراح این است که به چه ترتیب خاک نامناسب را برای کاربرد مورد نظر اصلاح نمایند. بهسازی خاک در صورت نامناسب بودن شرایط زمین از نظر پایداری و نشست پذیری برای ساخت انواع پی ها، ضروری است تمهیداتی به منظور بهسازی زمین صورت گیرد. روش های بهسازی خاک عبارتند از تراکم سطحی، تراکم دینامیکی، تراکم ارتعاشی، پیش بارگذاری، زهکشی به وسیله چاه های ماسه ای، پایدار نمودن خاک با تزریق مواد افزودنی، استفاده از ستون های سنگی و ترانشه های پر شده به وسیله خاک های دانه ای در رس های ضعیف، میکروپایل و استفاده از ژئوگرید.

روش های بهسازی خاک ها به منظور تغییر خصوصیات خاک مورد استفاده قرار می گیرد که در نهایت منجر به کاهش نشست سازه، بهبود مقاومت برشی خاک 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 می شوند. امروزه از روش های بهسازی بطور گسترده ای در جهان استفاده می شود. کاربرد این روش ها باعث بهبود پارامترهای ژئوتکنیکی خاک، کاهش هزینه کوتاه شدن زمان اجرا و افزایش طول عمر بهره برداری می گردد. آشنایی کم دست اندرکاران پروژه ها، نبود تجهیزات خاص عملا منجر به استفاده محدود در ایران شده است .

ویژگی های اصلی :

- زمین در جا اصلاح می شود .

- مشخصات فنی آن به سطح قابل قبول می رسد .

- زمین بخشی از سیستم خاک، سازه می گردد .

- روش های تائید کار انجام شده موجود است .

مزایا :

- اصلاح عملکرد - کاهش هزینه - صرفه جویی زمانی - کاهش ریسک های ناشناخته [۲۵].

**۲-۳-۳- بررسی علل عدم گستردگی استفاده از روش های تثبیت خاک در ایران**

با توجه به آن که اکثر مهندسان مشاور و پیمانکاران اطلاعات جامع و کاملی از روش های گوناگون تثبیت و اصلاح خاک دارند و در آیین نامه های مختلف کاربرد آن توصیه شده است متأسفانه در پروژه های معدودی در ایران از این روش ها استفاده شده است که برخی از دلایل به شرح زیر است:

عدم وجود ماشین آلات مناسب اجرای کار، ۲- عدم آشنایی برخی از پیمانکاران به شیوه های اجرای کار، ۳- عدم آگاهی از فن آوری های نوین و پرهیز از کارهای فنی جدید، ۴- مسائل مربوط به فاصله ی حمل مصالح و مواد، ۵- عدم استفاده از روش های بهسازی و تثبیت سبب می گردد تا بر حسب نیاز و مورد مصالح مناسب از فواصل زیاد حمل شود. در این شرایط هزینه ی اجرای کار با توجه به حجم زیاد مصرف مصالح منتخب و مسائل مربوط به آن بسیار گران خواهد بود [۱۵۱۰].

#### تثبیت شیمیایی خاک

منظور از تثبیت شیمیایی، اصلاح ویژگی های مورد نظر خاک بوسیله مواد افزودنی است. در اثر فعل و انفعالات شیمیایی مواد افزودنی با خاک، خواص خاک از جمله چسبندگی، جذب آب، تورم و ... تحت تاثیر قرار می گیرد. (تثبیت با قیر- تثبیت با آهک) [۲۶].

#### ۲-۳-۴- تثبیت خاک با آهک و بررسی ویژگی های واکنش آن

به دلیل کاهش شدید مقاومت و قابلیت تورم در حضور آب، خاک رس یکی از خاکهای مسئله دار در راهسازی می باشد. با این حال، در خیلی از مناطق، خاک رس تشکیل دهنده اصلی خاکهای بستراه می باشد. یکی از راهکارهای کاهش مشکلات مربوط به خاک رس تثبیت با مواد افزودنی است. از عوامل موثر در انتخاب نوع ماده تثبیت کننده، تاثیر آن بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک مورد نظر در جهت رسیدن به اهداف تثبیت است. فرآیند تثبیت خاک رس با آهک مشابه تثبیت با سیمان است با این تفاوت که آهک در تثبیت خاکهای دانه ای، بدون رس و محتوی مواد آلی (مواد آلی باعث کند شدن هیدراسیون می شوند) بی تاثیر است.

از آنجائی که اکثر خاک ها، دارای ترکیبات سیلیکا و آلومین سیلیکا هستند، افزایش مقداری آهک زنده (Cao) یا آهک شکفته ( $Ca(OH)_2$ ) و آب، برای به وجود آوردن یک ترکیب پایدار، بسیار

موثر است.

تثبیت خاک با آهک علاوه بر راهسازی در سایر پروژه های ساختمانی که در آن نیاز به ایجاد یک بستر مناسب و پایدار و با مقاومت مطلوب است، در مورد استفاده قرار می گیرد. مصالح مورد استفاده در تثبیت خاک با آهک عبارتند از آهک، خاک و آب، آهک از پختن سنگ آهک ( $\text{CaCO}_3$ ) با نام شیمیایی کربنات کلسیم به دست می آید. با این عمل که در دمای ۱۲۸۹ درجه سانتیگراد و فشار ۱۱۰ اتمسفر انجام می شود،  $\text{CO}_2$  از سنگ آهک جدا شده آهک زنده از آن با فرمول شیمیایی  $\text{CaO}$  به جای می ماند. آهکی که از این طریق به دست می آید و به آهک زنده مشهور است. آهک بر خاک های آلی و خاک های بدون ذرات رسی، تاثیر بسیار کمی دارد. از طرف دیگر آهک بسیار بیشتر از سیمان بر مصالحی چون شن رس دار (وماسه رس دار) تاثیرگذار است و مقاومت بسیار بالایی را پس از تثبیت سبب می شود. آهک با خاک مونت و موریونیت زودتر از کائولینیت ترکیب می شود اما این تفاوت فقط منحصر به چند هفته اول است [۲۷]. تحقیقات نشان می دهد که حتی در مورد مصالح درشت دانه خالص نیز به شرطی که سایز ذرات در محدوده ماسه های متوسط و ریزدانه باشد، تثبیت با آهک میتواند به افزایش مقاومت خاک منجر شود. اصولاً تثبیت خاک با آهک به بهبودی بسیاری از پارامترهای ژئوتکنیکی خاک مانند مدول ارتجاعی خاک (تا حدود ۱۰ برابر با گذشت زمان)، مقاومت فشاری و برشی مخلوط (با گذشت زمان تا حدود ۲۰ برابر) می شود. از جمله خصوصیات خاکریزهای تثبیت شده با آهک کسب مقاومت با زمان، داشتن دوام کافی بعد از گذشت سالیان بسیار طولانی، حتی تحت بارهای سرویس و همچنین بازگشت مقاومت در صورت خسارات و کاهش مقاومت ناشی از بارگذاریهای سنگین هستند [۲۸]. بر اثر واکنشهای تشریح شده (۲-۳-۵)، ذرات رس به یکدیگر می چسبند و یک ژل کلسیم-سیلیکات به وجود می آورند. این ژل چسبنده باعث سیمانی شدن بافت خاک و چسبیدن ذرات آن به یکدیگر می شود. با گذشت زمان این ژل به شکل هیدرات کلسیم-

سیلیکات کریستالی شده<sup>۱</sup> مانند توبرموریت<sup>۲</sup> و هیلبراندیت<sup>۳</sup> در می آید. این مایکروکریستالها می توانند با قفل و بند داخلی، به صورت مکانیکی به یکدیگر بچسبند [۲۹].

یکی از مؤثرترین روشهای بهبود کیفی مشخصات فنی خاکهای رسی که استفاده از آن متداول است بهره گیری از آهک می باشد. تثبیت خاک رس بوسیله آهک به معنای ترکیب و مخلوط کردن آهک با رطوبت بهینه به صورت هیدروکسید کلسیم (آهک شکفته و یا آهک زنده) با خاک رس و متراکم کردن این مخلوط است، که عمل تثبیت خاک رس به علت واکنشهای شیمیایی رس و آهک می باشد و اصولاً آهک با بیشتر خاکهای رسی دارای خواص خمیری بالا واکنش شیمیایی خوبی خواهد داشت. آهک با درجات خلوص متفاوت به عنوان تثبیت کننده‌ای برای خاک سابقه‌ی طولانی دارد، اضافه کردن این ماده باعث کاهش خواص خمیری خاک می‌شود. بنابراین وقتی مصالح شنی از نظر دانه‌بندی برای لایه‌های اساس و زیراساس مناسب باشند ولی بعلت حد روانی و یا دامنه خمیری زیاد نتوان از آنها استفاده کرد از این ماده برای کاستن خواص خمیری مصالح و در نتیجه برای ساختن لایه‌های اساس و زیر اساس استفاده می‌شود. با توجه به اینکه میزان قابل توجهی از خاک مخصوصاً در ایران ریزدانه و از نوع رسی می‌باشد. چون خاک های رسی دارای خواص خمیری بالا هستند و واکنش شیمیایی خوبی خواهند داشت، باید راهی را برای مقاوم کردن و بهبود رفتار اینگونه ریزدانه ها پیدا کرد. یکی از مؤثرترین روش های بهبود کیفی مشخصات فنی خاک های رسی که استفاده از آن ها متداول است بهره‌گیری از آهک می‌باشد، آهک اصولاً برای تثبیت خاک های ریزدانه که دامنه خمیری آن ها بزرگتر از ۱۰ و خاک های رسی خیلی خمیری مناسب است ولی این ماده برای تثبیت خاک هایی که حاوی مقدار بیش از دو درصد مواد آلی و همچنین حاوی مقدار بیش از نیم درصد سولفات قابل حل در آب می باشند مناسب نیست. بنابراین در عملیات تثبیت هدف از اختلاط آهک با خاک بایستی قبلاً مشخص گردد. به عنوان مثال اگر مقدار کمی سیمان با خاک مخلوط گردد برخی از

---

<sup>1</sup> Crystallized

<sup>2</sup> Tobermorite

<sup>3</sup> Hillebrandite

خصوصیات خاک تغییر می کند ولی مقاومت فشاری و کششی به طور محسوسی افزایش نمی یابند در این شرایط میزان سمنته شدن نسبتاً ضعیف و فقط مرحله ی اصلاح انجام شده است. بشر از زمان های دور با زمین های ضعیف در حال نبرد بوده است. بیشتر مواقع در برخورد با زمین های نامناسب ۵ راه حل یا استراتژی عمده وجود دارد این راه حل ها عبارتند از:

- (۱) جانشین سازی خاک ضعیف با خاک مناسب تر
- (۲) تقویت خاک و زمین نامناسب توسط شمع ها و پی های عمیق
- (۳) طراحی مجدد سازه با توجه به محدودیت های خاک
- (۴) تغییر دادن شرایط طبیعی خاک های ضعیف برای بدست آوردن ملزومات پروژه (بهسازی)
- (۵) تغییر محل پروژه [۲۹].

#### معرفی آهک:

آهک زنده ماده ای است با رنگ متمایل به سفید که درجه ذوب آن بین ۲۵۸۰ تا ۲۷۵۰ درجه سانتیگراد متغیر است. وزن مخصوص آهک زنده بین ۳/۱ تا ۳/۳ گرم بر سانتیمتر مکعب می باشد. آهک زنده در مقایسه به آهک شکفته تغییر حجم بیشتری دارد. بطور متوسط تغییر حجم آهک زنده به آهک شکفته ۲/۵ تا ۳ برابر بیشتر است. تبدیل آهک زنده به آهک شکفته همراه با تغییر در وزن مخصوص آن انجام می شود، بطوری که پس از شکفته شدن وزن مخصوص آن به حدود ۲/۲ تا ۲/۴ گرم بر سانتیمتر مکعب کاهش می یابد.

متداولترین آهکی که معمولاً برای پایدار نمودن خاکهای ریز دانه مورد استفاده قرار می گیرند عبارتند از: آهک شکفته  $Ca(OH)_2$  ، آهک شکفته دولومیتی  $(Ca(OH)_2.MgO)$  آهک زنده و آهک زنده

دولومیتی [۲۷ و ۲۸]

#### ۲-۳-۵- انواع واکنش های خاک رس و آهک

اصول ترکیبات شیمیایی براساس ترکیب رس پوزولانی و آهک در مجاورت آب اتفاق می افتد به این ترتیب که:



۱- یون مثبت تغییر می کند و ذرات خاک به صورت توده ای بهم پیوسته در می آید.

۲- واکنش پوزولانی یا سمنتاسیون صورت می پذیرد و یا کربناسیون رخ می دهد.

اولین واکنشی که صورت می پذیرد، تغییر یون و بهم پیوستن ذرات خاک به یکدیگر است که این امر باعث اصلاح خاصیت پلاستیسیته، کارایی و مقاومت خاک و قابلیت شکل پذیری آن می گردد. واکنش های پوزولانی و یا سمنتاسیون وابستگی نزدیکی به گذشت زمان و درجه حرارت دارند و شاید سالها به طول انجامند. دمای بیش از  $55^{\circ}$  سانتیگراد باعث تسریع و دمای کمتر از  $55^{\circ}$  سانتیگراد باعث کندی این واکنش ها می گردند. کربناسیون یک واکنش نامطلوب است که باعث جلوگیری از انجام آزمایش پوزولانی گشته و باعث افزایش خاصیت پلاستیک خاک می گردد [۲۸].

واکنش تبادل کاتیونها :

تقریبا تمامی خاکهای ریزدانه وقتی با آهک و آب مخلوط می شوند طی مدت زمان کوتاهی واکنش تبادل کاتیونی را نشان می دهند. در این واکنش، کاتیونهای قابل تبادل خاک رس (کاتیونهای تک ظرفیتی) با کاتیونهای آهک جایگزین می شوند.

واکنش پوزولانی

واکنش بعد، بسته به نوع خاک، واکنش پوزولانی است که در طی آن مواد سیمانی بیشتری در خاک به وجود می آید، بافت خاک تغییر می کند و مقاومت بلند مدت و همچنین دوام مخلوط افزایش می یابد. این واکنش به دمای هوا حساس است و در دمایی کمتر از حدود ۱۳ تا ۱۶ درجه سانتیگراد متوقف می شود. این واکنش باعث افزایش چشمگیر مقاومت در ترکیبات خاک رس و آهک می شود و تابع زمان می باشد.

واکنش کربناسیون:

در این واکنش آهک با  $CO_2$  موجود در هوا وارد واکنش می شود و یک ترکیب کربناته تقریبا غیرقابل حل در آب به وجود می آورد. آهک با ذرات رس دارای واکنش های شیمیایی است.

در این فرایند آهک با گاز کربنیک هوا ترکیب شده و باعث می شود که آهک به حالت غیر فعال سنگ

آهک باز گردد. با توجه به زمان انجام واکنشهای شیمیایی فوق الذکر در زمانهای ۲۸،۱۴ و ۶۰ روز و دراز مدت خواص مکانیکی ترقی یابنده ای می توان از مخلوطهای رسی آهک دار انتظار داشت. پس از اضافه شدن آهک به خاک واکنش های مختلفی بین خاک و آهک صورت می گیرد. مهمترین این واکنش ها، واکنش جانشینی یون های مثبت و واکنش تجمع- تراکم است که به سرعت پس از تماس ذرات رس با آهک شروع می شود و باعث بهبودی آنی خصوصیات پلاستیک خاک و کارپذیری آن، افزایش مقاومت کوتاه مدت خاک و همچنین کاهش تغییر شکل پذیری مخلوط می شود. در این دو واکنش، بافت خاک با تجمع ذرات در کنار یکدیگر و به نوعی دانه بندی آن تغییر می کند و مقاومت آن افزایش می یابد.

### ۲-۳-۶- خاک های مناسب اختلاط با آهک

به طور کلی خاک هایی جهت اختلاط با آهک مناسب هستند که دارای مقدار کافی رس باشند، به علاوه تحقیقات گذشته مؤید آن است که تأثیر آهک که نتیجه ی آن کاهش  $p_i$  و افزایش مقاومت خاک است، هنگامی کاربرد دارد که  $p_h$  خاک بیش از ۱۰ باشد و اگر  $p_h$  خاک کم تر از ۱۰ بود برای اصلاح یا تثبیت باید از سیمان استفاده کرد. مهم ترین تأثیر آهک بر خصوصیات خاک، اصلاح آن، کاهش دامنه ی خمیری و افزایش  $cbr$  می باشد. در این مرحله ممکن است مقاومت فشاری و مقاومت کششی (سمنته شدن) سریعاً افزایش نداشته باشند [۲۷ و ۲۸].

### ۲-۳-۷- بهسازی بهترین گزینه مکمل پی سازی

بهسازی خاک شامل تکنیک ها و روش های مختلف تغییر خصوصیات خاک بوده که نهایتاً به افزایش مقاومت، کاهش تغییرات حجمی و تامین رفتار خاصی از خاک منجر می شود [۲۹].

خاک های مسئله دار (حساس)

۱- خاک های با منشا آلی و نباتی

۲- خاک های رمبنده

۳- خاک های رس اشباع و نرم

۴- خاک های واگرا

۵- خاک های با منشا زباله و ضایعات

۶- خاکریزها

۷- خاک های ماسه ای و لای شل

۸- خاک های دستی

### ۲-۳-۸- تکنیک های تثبیت خاک های مسئله دار

روش های بهسازی متعدد بوده و بالغ بر دهها روش می شود. این روش ها با توجه به نوع عملیات اجرایی، مکانیسم های تغییر مشخصات ژئوتکنیکی خاک، نوع دانه بندی و . . . در شش گروه اصلی بشرح زیر تقسیم می شوند. مثال شکل ۱۰-۲



شکل ۱۰-۲- تثبیت بروش جایگزینی

در هر یک از گروه های شش گانه فوق روش های بهسازی به شرح زیر تفکیک می شود.

روش های تراکمی:

روش ایجاد چسبندگی:

روش های حفاری و جایگزینی:

روش های تغییرات فیزیکی و شیمیایی:

روش های تبدیل بیولوژیکی:

روش های دیگر نظیر روش های حرارتی، الکتریکی و انفجار [۲۵].

\*\*\* در پایان نامه از روش بهسازی ترکیب خاک با آهک و نانورس استفاده شده است.

## ۲-۳-۹- انواع روش طرح تثبیت خاک با آهک

تعیین درصد آهک مناسب و بهینه در طرح مخلوط های خاک-آهک، از اهداف عمده مطالعه مخلوط هاست. در این تحقیق به ۵ روش معمول آن اشاره میکنیم

۱- روش (PH) : در این روش، درصد آهک مناسب بر اساس PH مخلوط ختک و آهک مشخص میشود و برای خاک درشت دانه مناسب نیست و ایراد وارد به آن این است که مشخصات مقاومت و تغییر شکل پذیری مشهود نیست .

۲- روش دامنه خمیری: تعیین نمودن مقدار آهک با استفاده از حالتی که دامنه خمیری به حد مطلوب کاهش پیدا کند این روش هم ایراد روش یک را دارد.

۳- روش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) : تعیین آهک بوسیله مقاومت CBR که در این روش هم شکل پذیری بعد تثبیت قابل پیش بینی نیست اما نشانه ای بر اساس مقاومت بدست میاید.

۴- روش مقاومت فشاری : درصد آهک مناسب بر اساس مقاومت تک محوری نمونه تثبیت شده با آهک بدست می آید

۵- روش (AASHTO) : بر اساس نمو گرام هایی در صد آهک را مشخص میکنند. در این روش نیز نشانه ای از مقاومت و خصوصیات مکانیکی پس از تثبیت به چشم نمی خورد [۲۸ و ۲۷ و ۲۶].

طرح تثبیت یا بهتر بگوییم ترکیب نمونه خاک رس با آهک به روش ۱ و ۳ نزدیک است.

برای پیدا کردن درصد های بهینه از آزمایش حدود اتربرگ و آزمایش برش مستقیم بررسی شده .

## ۲-۴- نتیجه گیری از بخش و مروری بر کارهای گذشته:

### ۲-۴-۱- مقایسه با کارهای مشابه انجام شده:

جهت اطمینان از عدم تکراری نبودن موضوع این پژوهش در پایگاه اطلاعات ایران جستجو و هیچ مورد تحقیقی راجع به نانورس و آهک یافت نشد و تنها مواردی راجع به خاک رس و نانو سیلیس و مقایسه تاثیرات بر خواص فیزیکی موجود بودند که اطلاعات خدمتتان ارائه میگرد.

الف- عنوان تحقیق: مقایسه تاثیر نانوسیلیس و نانورس بر روی حدود اتربرگ خاک رس مونت [۳۰].

موریلونیت. در این مطالعه با بررسی های آزمایشگاهی و با بکارگیری آزمایش حدود آتبرگ ، تأثیر نانو ذرات بر خصوصیات خمیری خاک رس مونت موریلونیت مورد مطالعه قرار گرفته است . نانو ذره های انتخابی نانو رس مونت موریلونیت اصلاح شده  $+Na$  و نانو سیلیس می باشد مشاهده می شود که با افزودن ۱,۵٪ نانورس شاهد افزایش حد خمیری و حد روانی هستیم .

ب- عنوان تحقیق: بررسی تأثیر نانو رس بر خصوصیات ژئوتکنیکی پایه ای خاک رس کائولینیت [۳۱]. مجموعه از آزمایش های حدود آتبرگ و تراکم استاندارد بر روی خاک رس کائولینیت و مخلوط های آن با درصد های مختلف نانورس مونت موریلونیت اصلاح شده انجام گردید مقایسه نتایج بدست آمده از آزمایش های انجام شده در این پژوهش حاکی از افزایش چشمگیر دامنه خمیری با افزودن مقادیر اندک نانورس مذکور و بهبود خواص خاک رس کائولینیت می باشد.

پ- اثر نانو سیلیس بر خصوصیات مکانیکی و ژئوتکنیکی خاک رس [۳۲]. خاک مورد نظر از شهر زنجان تهیه شده است. نتایج حاکی از افزایش چسبندگی بهینه با ۳٪ نانو سیلیس می باشد. لازم به ذکر است در تحقیق فوق فقط از نانو سیلیس استفاده شده است و پارامترهای مقاومت برشی از آزمون برش مستقیم استخراج گردیده است.

ج- بررسی تاثیر افزودن نانو سیلیس بر روی خواص ژئوتکنیکی خاک رسی [۱۲]. خاک مورد نظر از محل متروی تهران ایستگاه پرند تهیه شده است. نتایج حاکی از افزایش چسبندگی بهینه با ۱/۵٪ نانو سیلیس می باشد. لازم به ذکر است در این تحقیق فقط از نانو سیلیس استفاده شده است و پارامترهای مقاومت برشی از آزمون برش مستقیم استخراج گردیده است.

ت- عنوان تحقیق: ارزیابی ظرفیت باربری و تعیین پارامترهای مقاومتی خاک رس با میکروسیلیس به همراه آهک [۱۲]. خاک مورد نظر بر رس شهر بابل انجام شده است (مطالعه موردی). نتایج حاکی از افزایش چسبندگی بهینه با ۲٪ میکروسیلیس می باشد. لازم به ذکر است در تحقیق فوق از میکروسیلیس و آهک باهم استفاده شده است و پارامترهای مقاومت برشی از آزمون سه محوری تحکیم نیافته- زهکشی نشده استخراج گردیده است.

د-عنوان تحقیق:ارزیابی پارامترهای مقاومت برشی خاک رس اصلاح شده با آهک و نانو سیلیس [۴۹].  
 ۴ کیلومتری فرودگاه شاهرود .

مقایسه نتایج در (جدول ۱-A) گزارش شده است. همانطوری که از جدول فوق مشخص است نتایج حاکی از درصد های پایین (تا ۳٪) حضور نانوسیلیس یا میکروسیلیس در خاک می تواند منجر به تغییرات مناسب در پارامتر های مختلف (فیزیکی و مکانیکی)، خاک گردد. و دلیل تفاوت اندک آنها با هم، تفاوت در پارامترهای دیگر خاک و نوع ماده بهسازی (آهک، نانو سیلیس، نانو رس، میکرو سیلیس و یا ترکیب این مواد با درصد های مختلف) می باشد.

جدول ۱-A : نتایج تحقیقات مختلف بر خاکهای رسی CL بهسازی شده با نانورس و سیلیس در نقاط مختلف.

مشخصات فیزیکی خاک مورد مطالعه	خاک تحقیق د	خاک تحقیق الف	خاک تحقیق ب	خاک تحقیق ج	خاک تحقیق اصلی
Gs	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
LL	34	32	69	29	21
PL	20	19	42	21	16
PI	14	13	27	7	5
$\gamma_d$ (KN/cm <sup>3</sup> )	1.77	1.73	1.47	1.74	1.67
$\omega_{opt}$	16%	16.85%	23%	19%	15
Size of Particles (nm)	20-30	< 100	< 100	0.2-0.3 ( $\mu\text{m}$ )	0.2-0.3 ( $\mu\text{m}$ )
Soil Classification in Unified System	CL	CL	CL	CL	cl
C (Kpa)	68	43	33	45	61
(Nano-Silica) <sub>Optimum</sub> %	3% Ns +4% lime	1.5% Ns	3% Ns	1% Ms +2% lime	Nanocly3% +4% lim
Time to curing (day)	1	2	1	1	1
Sampling Site	۴ کیلومتری فرودگاه شاهرود	ایستگاه متروی پرند تهران	زنجان	بابل	جاده اتوبان ۲ کیلومتری شاهرود

#### -۴-۲- جمع بندی

در این تحقیق درصد بهینه (۳٪ نانو رس و ۴٪ آهک با هم) برای افزایش چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی می باشد که تفاوت اندک آن با کارهای عنوان شده به دلیل تفاوت خصوصیات خاک مورد تحقیق از جمله (خصوصیات خمیری و تراکمی، رطوبت بهینه و غیره همچنین نوع و درصد مواد افزودنی به خاک مورد نظر) می باشد. در این پژوهش سعی بر آن شده تا ضمن بدست آوردن یک نتیجه بر اساس تفاوتها و تشابهات نوع مواد تثبیت کننده خاک برای بهسازی خاکهای رسی که در درسیستم طبقه بندی یونیفاید مشابه باشند (خاک رس CL)، ضرورت تحقیق نیز مشخص گردد.

با توجه به جمع بندی فوق نتیجه می گیریم که اثر توام ترکیب آهک و نانورس بر پارامترهای مقاومت برشی خاک بررسی نشده و در میان تحقیقات انجام شده به صورت مشابه دیده نمی شود با نگرش به- این مورد لزوم تحقیق مشخص گردید. همچنین از جمع بندی فوق نتیجه می گیریم فقط در درصدهای خیلی پایین این ماده افزودنی (نانو رس) تغییرات خاصی در پارامترهای مختلف خاک صورت می گیرد که با توجه به گران قیمت بودن این ماده مزیت بسیار خوبی می باشد، نتایج کلی از این پژوهش بصورت مشروح در فصل پنجم (نتیجه گیری) گزارش شده است.





فصل سوم

آزمایشهای

فیزیکی و مکانیکی

مصالح تحقیق

### ۳-۱- مقدمه:

در این بخش به شرح روش تحقیق و بحث آزمایشهای (مشخصات فیزیکی و مکانیکی) بر روی مصالح بکار رفته در این تحقیق، پرداخته شده و ضمن بیان مختصر روشها به استخراج نتایج نیز به تشریح پرداخته می‌شود.

### ۳-۱-۱- روش تحقیق

الف) تهیه مصالح لازم جهت تحقیق شامل (تهیه نمونه از خاک مورد نظر، آهک ساختمانی و نانورس) - ب) انجام آزمایشهای لازم با توجه به روشهای استاندارد آزمایشگاهی - ج) استخراج نتایج - د) نتیجه گیری و پیشنهاد.

### ۳-۲- مصالح مورد استفاده:

### ۳-۲-۱- خاک رس :

مصالح خاک مورد استفاده در پایاننامه از ۲ کیلومتری شاهرود محدوده جاده اتوبان شاهرود مشهد (شکل ۱-۳) نمونه برداری شده است. به منظور شناسایی خاک مورد نظر آزمایشهای شناسای خاک شامل (دانه بندی و هیدرومتری، حدود اتربرگ و طبقه بندی خاک)، آزمایشهای مشخصات فیزیکی خاک شامل (تعیین درصد رطوبت خاک و چگالی ویژه خاک)، آزمایشهای مشخصات مکانیکی خاک شامل (آزمایش تراکم جهت ارزیابی رطوبت بهینه، آزمایش تحکیم یک بعدی (ساده و آزمایش برش مستقیم) انجام گرفته است. همچنین آزمایش XRD<sup>۱</sup> برای شناسایی اندازه ذرات (آنالیز فازی) و XRF<sup>۲</sup> برای شناسایی عناصر موجود (آنالیز عنصری) بر روی خاک و آهک مورد نظر انجام شده است.

---

<sup>۱</sup> X Ray Diffraction

<sup>۲</sup> X Ray Fluorescence



شکل ۳-۱: نمایی از سایت مورد نظر

### ۳-۱-۲-۱- نمونه برداری دست خورده از خاک :

نمونه های دست خورده برای شناسایی دانه بندی، حدود اتربرگ، میزان املاح شیمیایی موجود در خاک و برخی از آزمونهای شاخص خاک کارایی دارند. روشهای اخذ نمونه دست خورده شامل نمونه و گیری دستی، نمونه گیری با اوگرهای پره دار و سطلی، نمونه گیری با نمونه گیر جدا شونده SPT برخی روشهای پیشرفته نمونه گیری نظیر نمونه گیری به روش آزمون نفوذ حجیم می باشد LPT ساده ترین روش نمونه گیری دست خورده آن است که بطور مستقیم و به کمک وسایل ساده نظیر کاردک و بیلچه توده خاک نمونه گیری شود. برای نمونه گیری دستی از اعماق زمین باید ابتدا چاله ای به روش دستی یا ماشینی حفر شده و سپس از جدار آن در اعماق مورد نظر نمونه گیری گردد. بطور معمول این چاله در خاکهای پایدار توسط مقنی و به روش دستی حفر می شود. با این حال در خاکهای ریزشی و یا در مواردی که شناسایی زمین در طول یک خط مورد نظر باشد ماشین آلات حفاری نظیر بیل مکانیکی به کار می روند [۳۳].

در این تحقیق نمونه گیری بصورت دستی انجام شده است، که در (شکل ۳-۱-۱) مشاهده می شود.



شکل ۳-۱-۱: نمونه برداری دست نخورده از خاک مورد نظر

### ۳-۲-۱-۲-۳- نمونه برداری دست نخورده خاک:

نمونه های دست نخورده ارزشمندترین نمونه های خاک هستند که می توان آزمایشهای مختلف برای شناسایی رفتار خاک ، تعیین مقاومت های برشی و فشاری و خواص تحکیمی خاک را بر روی آنها انجام داد. غالباً نمونه گیری دست نخورده توسط نمونه گیرهای تیوبی انجام می شود بطور کلی نمونه گیری دست نخورده از خاکهای ریز دانه ساده تر از خاکهای درشت دانه است ، در خاکهای درشت باید از نمونه گیرهای پیشرفته تر که برای نفوذ در زمین و حفظ نمونه در داخل نمونه گیر امکانات ویژه ای دارند، استفاده شود . البته باید یادآوری گردد که در خاکهای درشت دانه با اندازه گیری دانسیته صحرائی و ساخت نمونه باز سازی شده در آزمایشگاه تا حدودی می توان شرایطی نزدیک آنچه در محل دارا هستند را برای آنها بوجود آورد [۲۵].

\*\*\* در این تحقیق نمونه دست نخورده با روش تیوبی (فرو کردن تدریجی ظرف نمونه بردار در خاک مورد نظر) با کمترین دست خوردگی بدست آمده است (شکل ۳-۱-۲)، از نمونه دست نخورده فقط برای آزمایش برش مستقیم استفاده شده است .



شکل ۳-۱-۲: نمونه دست نخورده از خاک مورد نظر

### ۳-۱-۲-۳- نمونه باز سازی شده<sup>۱</sup> خاک:

نمونه باز سازی شده یا ساختگی به نمونه ای اطلاق می شود که با استفاده از نمونه های دست خورده و انجام عملیات تراکم روی آن، در آزمایشگاه تهیه و سپس آزمایش می شود [۳۴].

\*\*\* در این تحقیق از نمونه بازسازی شده به روش فوق، فقط برای آزمایش برش مستقیم استفاده شده است (نمونه های بدون نانو رس و آهک و با نانورس توام با آهک)، که در (شکل ۳-۲) مشاهده می شود.



شکل ۳-۲: نمونه بازسازی شده از خاک دست خورده از وسط قالب تراکم

<sup>۱</sup> Remolded Sample

### ۳-۲-۱-۴- آزمایشات شناسایی و طبقه بندی بر روی خاک مورد مطالعه:

۳-۲-۱-۴-۱- آزمایش دانه بندی خاک به روش الک و هیدرومتری برای بخش گذرا از الک شماره ۱۰

( ۲/۰ mm ) . استاندارد - ۴۲۲-۶۳ : ASTM D. [۳۵].

الف ( روش الک:

اغلب خاکهای طبیعی شامل مخلوطی از دو یا بیشتر از شن و ماسه ولای ورس می باشند و بسیاری از آنها نیز شامل مقداری مواد آلی می باشند. به طور کلی اطلاعات حاصل از این آزمایش برای پیش بینی حرکت آب در خاک ، میزان نفوذ پذیری خاک ، حساسیت خاک در مقابل یخ زدگی و رفتار خاک در آب و هوای سرد ، خاصیت مویینگی ، استفاده به عنوان فیلتر و زهکش مفید است . دانه های ریزتر از الک (No.200) معمولا ارزش سازه ای ندارند . اهمیت ریزدانه ها در میزان رطوبتی است که جذب می کنند.

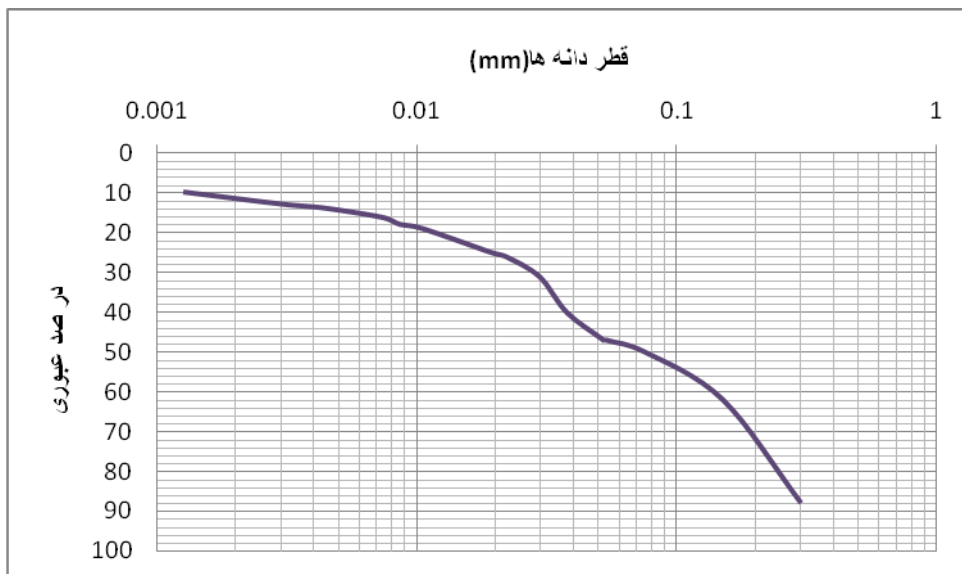
هدف از انجام آزمایش دانه بندی تعیین اندازه ذرات خاک و بدست آوردن نسبت درصد وزنی به یکدیگر می باشد . با انجام این آزمایش از میزان وجود ذرات با ابعاد مختلف مطلع می شویم و می - توانیم روی مناسب یا نامناسب بودن خاک نظر دهیم.



شکل ۳-۳: الکهای آزمایش دانه بندی به روش تر(قسمت درشت دانه)

## ب) روش هیدرومتری استاندارد :

دانه بندی خاکهای ریز دانه را می توان با استفاده از روش ته نشینی تعیین کرد این روش مبتنی بر قانون استوکس می باشد که مربوط به سرعت سقوط ذرات کروی شکل معلق در مایعات می باشد . ذرات بزرگتر سرعت سقوط بیشتری دارند و ذرات کوچکتر با سرعت کمتری ته نشین می شوند. در(شکل ۳-۴) نمودار دانه بندی خاک مورد مطالعه (حاصل از روش الک و هیدرومتری) ترسیم گردیده است



شکل ۳-۴: نمودار دانه بندی خاک مورد مطالعه

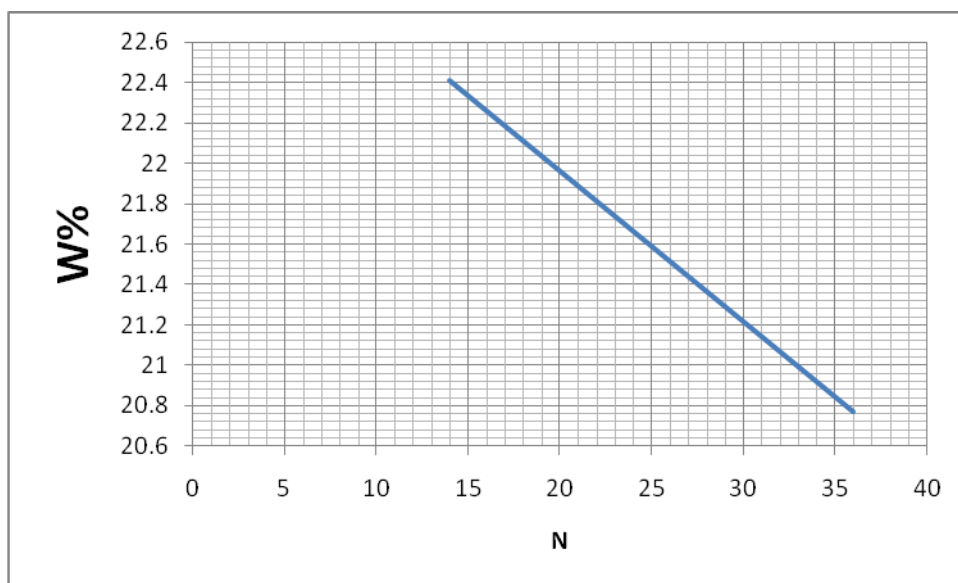
۳-۲-۱-۲-۴-۲- آزمایش حدود اتربرگ : استاندارد - ۴۳۱۸ : ASTM D [۳۶].

حد روانی:

خاکهای ریز دانه (زیرالک نمره ۲۰۰) براساس مقدار آب جذب شده و خاصیت جذب آب سطحی، می توانند واکنش های متفاوتی داشته باشند. در این واکنش ها کانی رس و تشخیص آن بیشتر حائز اهمیت است. در مکانهایی که خاک در مقابل رطوبت زیاد قرار دارد آزمایش حدود اتربرگ به ما در شناختن بهتر خصوصیات خاک کمک می کند. خاک در حالت معمول جامد است . در مرحله ای خاک از حالت جامد به نیمه جامد تبدیل می شود رطوبت این حالت را حد انقباض می گویند . با

افزایش تدریجی رطوبت خاک از حالت نیمه جامد به حالت خمیری و بعد به صورت مایع تبدیل می شود که مرز مابین این حالات نیز به ترتیب حد خمیری و حد روانی نام دارد .

در (شکل ۳-۵) نمودار حد روانی ترسیم شده است که از روی نمودار فوق درصد رطوبت حد روانی در ۲۵ ضربه جام کاساگرانده تعیین می شود.



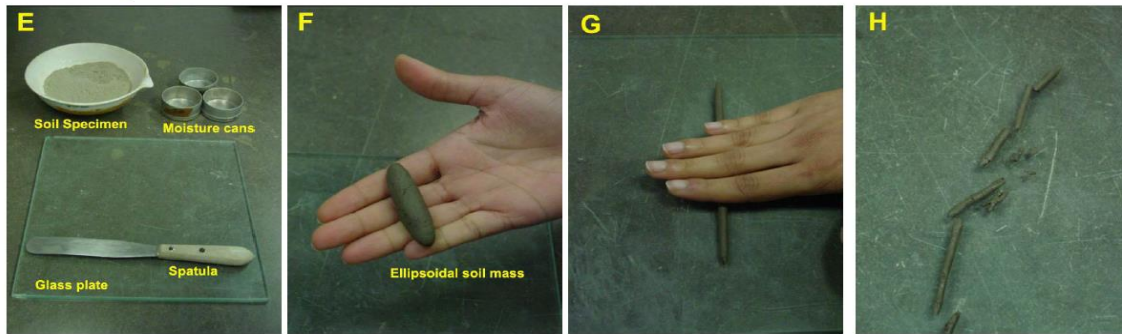
شکل ۳-۵: نمودار حد روانی



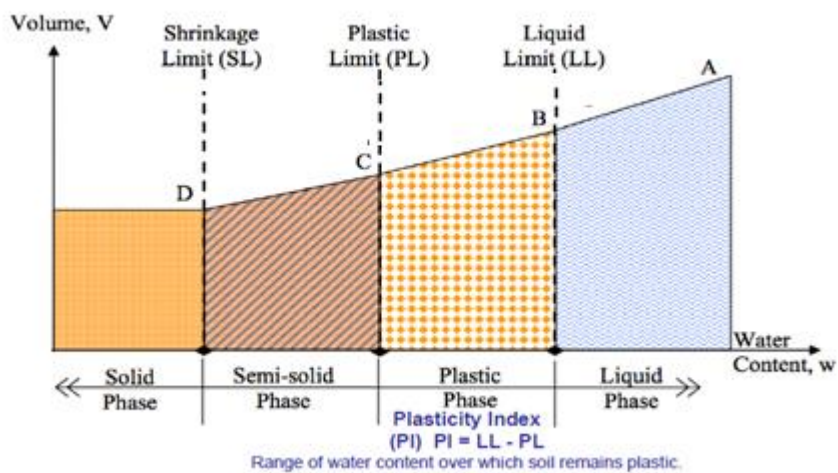
شکل ۳-۶: جام کاساگرانده وسایل آزمایش

حد خمیری: حد خمیری درصد رطوبتی است که در آن خاکدر اثر فیتیله شدن وقتی که قطرش به ۳,۲ میلیمتر می رسد شروع به ترک خوردن می کند.





شکل ۳-۷: وسایل و مراحل آزمایش حد پلاستیک



شکل ۳-۸: مرز حد انقباض، حد خمیری، حد روانی

نتیجه گیری :

نتایج آزمون حدود اتبرگ بر روی نمونه بدون ناو رس و آهک به شرح (جدول ۳-۱) زیر می باشد.

نوع نمونه	LL حدروانی	PL حد خمیری	PI نشانه خمیری
بدون ناو و آهک	21	16	5
۲% ناو و ۲% آهک	33	15	18
۴% ناو و ۴% آهک	38	13	25
۶% ناو و ۶% آهک	34	19	15

جدول (۳-۱) نتایج اتبرگ بر خصوصیات پلاسیسیته خاک مورد مطالعه

۳-۲-۱-۳-۴-۳- آزمایش رده بندی خاک ها برای مقاصد مهندسی (سیستم رده بندی متحد (USCS

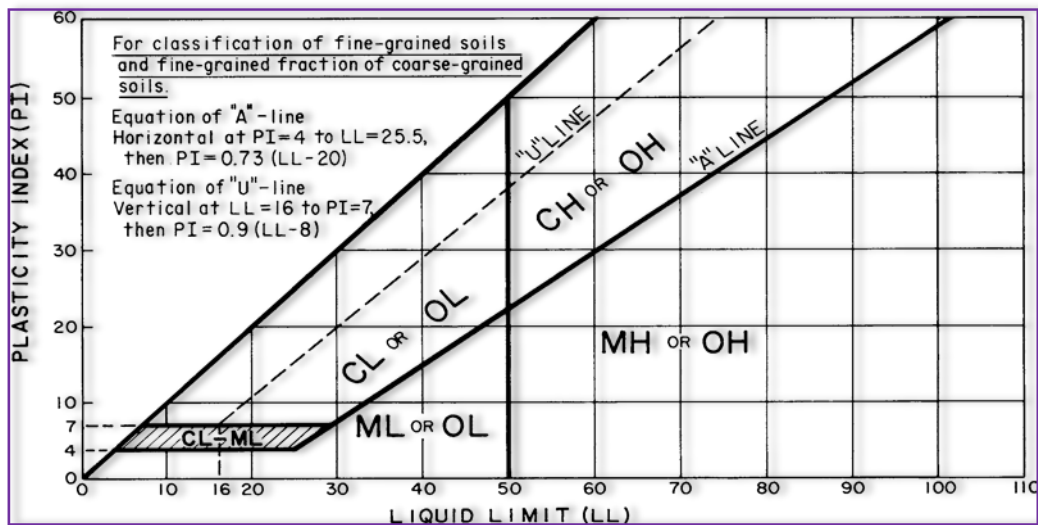
مقدمه :

با استفاده از این استاندارد یک نماد و نام رده مجزا برای خاک مورد نظر بدست می آید. هدف آزمایش فوق رده بندی خاک مورد نظر به روش متحد (یونیفاید) USCS<sup>۱</sup> می باشد. پس از نمونه گیری و انجام آزمایشهای لازم (مانند حدود اتربرگ و...) بر روی خاک مورد نظر مطابق نمودار کاساگرانده (شکل ۳-۲) و جدول فوق خاک مورد نظر رده بندی می گردد.

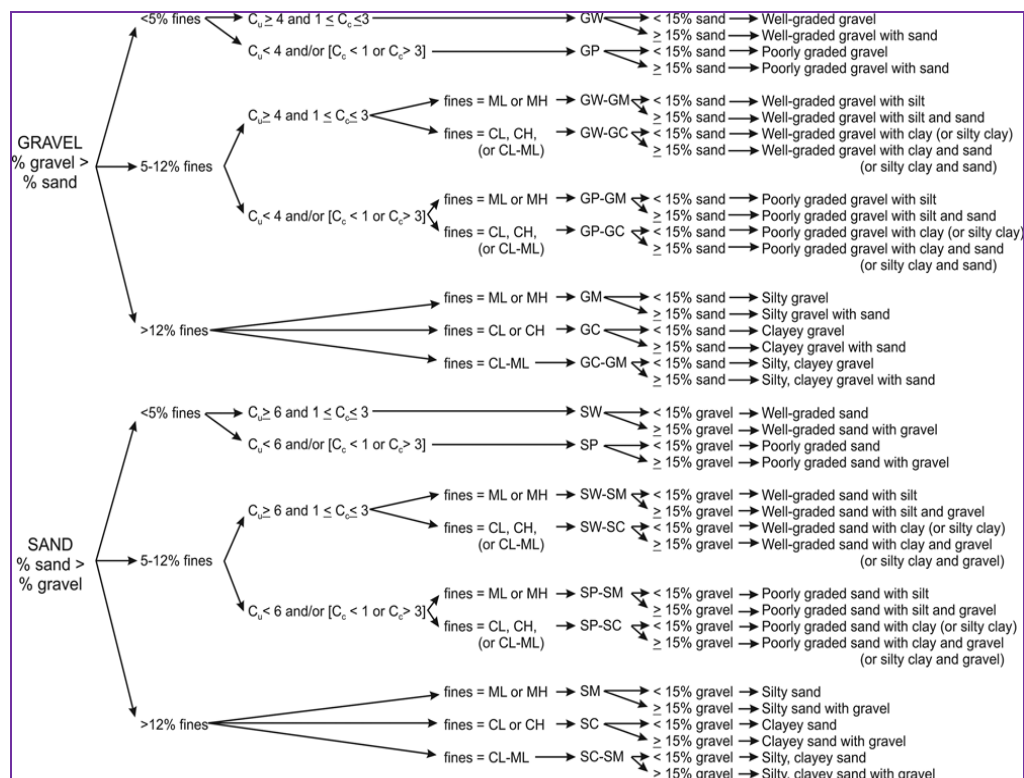
جدول ۳-۲: طبقه بندی خاک به روش یونیفاید

حرف دوم (صفت خاک)	علامت	حرف اول (جنس خاک)	علامت
خوب دانه بندی شده	W	شنی	G
بد دانه بندی شده	P	ماسه ای	S
لای دار	M	رسی	C
رس دار	C	لای دار	M
خاصیت خمیری بالا	H	ارگانیک	O
خاصیت خمیری پایین	L	خاک با منشاء نباتی	pt

<sup>۱</sup> Unified Soil Classification System



شکل ۳-۹: نمودار کاساگرانده برای رده بندی خاک های رسی



شکل ۳-۹-۱: نمودار رده بندی خاک های ریز دانه ۵۰ یا بیش از ۵۰٪ ذرات از الک شماره ۲۰۰ رد شده اند

نتیجه گیری: با توجه به PI بدست آمده، حدود اتربرک و منحنی دانه بندی، خاک این نمونه در محدوده CL- ML قرار گرفته است (نمودار کاساگرانده) و برابر طبقه بندی یونیفاید خاک CL (رس لای دار با خاصیت خمیری کم) می باشد [۳۸].

### ۳-۲-۱-۵- آزمایشات مشخصات فیزیکی بر روی خاک مورد مطالعه:

۳-۲-۱-۵-۱- آزمایش تعیین چگالی ویژه بخش جامد بوسیله پیکنومتر آب: استاندارد

- ۸۵۴: ASTM D [۳۹].

مقدمه :

منظور از توده ویژه خاک ( چگالی ) نسبت وزن مخصوص جامد خاک به وزن مخصوص آب است وزن مخصوص ویژه در محاسبات مربوط به بسیاری از آزمون‌های آزمایشگاهی به کار گرفته می شود . دامنه تغییرات توده ویژه خاک (چگالی) برای خاک های مختلف متفاوت است. چگالی دانه ها وابسته به جنس کانی های سازنده آنهاست. وزن مخصوص ویژه خاک اغلب برای ارتباط وزن به حجم خاک مورد استفاده قرار می گیرد. بنابراین با دانستن تخلخل و درجه اشباع و وزن مخصوص ویژه می توانیم وزن واحد حجم یک خاک مرطوب و یا خشک را محاسبه کنیم.

هدف از آزمایش : تعیین چگالی ویژه بخش جامد خاک مورد نظر می



شکل ۳-۱۰: برخی از وسایل آزمایش تعیین چگالی ویژه بخش جامد خاکهای ریزدانه

\*\*\* حداقل بایستی سه بار آزمایش فوق انجام شود و برای اینکه جوابها و نتایج صحیح باشند

باید این مقادیر به دست آمده بیشتر از ۲ الی ۳٪ باهم تفاوت نداشته باشند.

نتیجه گیری:

$$G_{S_{ave}} = \frac{G_{S1} + G_{S2} + G_{S3}}{3} = \frac{2.679 + 2.606 + 2.731}{3} = 2.672 \approx 2.70$$

چگالی دانه های جامد

\*\*\*از عدد فوق نتیجه می گیریم خاک مورد نظر جزء خاکهای ریزدانه لای دار و رس دار می باشد.

با توجه به (جدول ۳-۳) عدد بدست آمده، خاک مورد نظر از نوع رس لای دار می باشد.

جدول ۳-۳: طبقه بندی چگالی ویژه بخش جامد خاک [۳۸].

نوع خاک	(Gs)
ماسه	2.67-2.65
ماسه لای دار	2.65-2.67
رس عالی	2.80-2.70
ماسه حاوی میکا و آهن	3.00-2.75
خاک های عالی	< 2.00

۳-۲-۱-۵-۲- آزمایش تعیین رطوبت به روش جرمی: استاندارد - ۲۲۱۶: ASTM D [۳۸].

مقدمه :

این آزمایش برای تعیین درصد وزنی رطوبت خاک و سنگ که جرم آنها در اثر خشک شدن واز دادن رطوبت کم می شود کاربرد دارد. درصد رطوبت عبارتست از نسبت وزن آب موجود در یک توده خاک به وزن خشک همان توده خاک که بصورت درصد بیان می شود. در اکثر آزمایشهای مکانیک خاک ، لازم است درصد رطوبت خاک تعیین گردد. این آزمایش نمی تواند درصد رطوبت واقعی مصالحی که دارای مقدار قابل توجهی کانی های هالوزیت ، مونت موریونیت و گچ است را به دست آورد همچنین در مصالحی که آب درون منافذ آنها دارای مقدار زیادی املاح محلول مثل کلرید سدیم (که در رسوبات دریایی وجود دارد ) و یا مواد آلی هستند درصد رطوبت بدست آمده حقیقی نیستند. در خاکهای ریزدانه (چسبنده) پایداری و مقاومت خاک بستگی به درصد رطوبت آن دارد در این حالت رطوبت طبیعی خاک با نشانه های حد روانی و حد خمیری مقایسه می شود [۴۰].

\*\*\*با توجه به نتایج آزمایش XRF بر روی خاک مورد مطالعه مشخص گردید فاقد کانی های فوق -

الذکر می باشد و در صد رطوبت بدست آمده قابل قبول می باشد.

هدف از آزمایش : تعیین درصد رطوبت طبیعی به روش جرمی برای خاک مورد مطالعه .

نتیجه گیری:

$$\omega_{ave} = \frac{\omega_1 + \omega_2 + \omega_3}{3} = 15.1\% \quad \text{درصد رطوبت میانگین}$$

۳-۲-۱-۵-۳- آزمایش تعیین دانسیته خشک طبیعی ( $\gamma_d$ ) بوسیله پارافین :

مقدمه :

وزن مخصوص ظاهری عبارت است از وزن واحد حجم خشک خاک در شرایط طبیعی و واحد آن بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب است. کلوخه قسمتی از خاک است که دارای ساختمان طبیعی است. اگر جرم کلوخه را اندازه گرفته و بر حجم آن تقسیم کنیم وزن مخصوص ظاهری خاک بدست می آید . مشکل تعیین حجم کلوخه است زیرا کلوخه دارای شکل هندسی منظم نیست و نیز نمی توان آنرا وارد آب نمود تا مقدار جابجایی حجم مایع را تعیین کرد زیرا متلاشی شده و حجم تخلخل ها از بین می رود. ولی می توان آنرا با پارافین ضد آب نمود. هدف از آزمایش : تعیین دانسیته خشک طبیعی ( $\gamma_d$ ) است.



شکل ۳-۱۱: لوازم آزمایش تعیین دانسیته خشک طبیعی و کلوخه های آغشته به پارافین.

نتیجه گیری:

در روش فوق دانسیته خشک طبیعی از میانگین پنج کلوخه آغشته به پارافین برابر با  $1/8$  دست آمده است. ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )

۳-۲-۱-۶- آزمایشات مشخصات مکانیکی بر روی خاک مورد مطالعه :

۳-۲-۱-۶-۱- آزمایش تعیین مشخصات تراکم آزمایشگاهی خاک با استفاده از تلاش

## استاندارد: استاندارد - ۶۹۸: ASTM D [۴۱].

مقدمه :

آزمایش تراکم عبارتست از کاهش دادن حجم خاک در اثر خارج ساختن هوا با استفاده از اعمال نیرو. که در این حالت وزن واحد آن زیاد می شود. و این وزن معیار تراکم خاک است. تراکم به منظور افزایش مقاومت نیروی برشی و کاهش نفوذپذیری انجام می شود که این به علت این است که منافذ خاک کوچکتر می شود و در نتیجه حرکت آب از این منافذ مشکل تر است. در خاکهای رسی یک مشکل وجود دارد و آن افزایش پتانسیل تورم خاک است.

\*\*\* در آزمایش تحکیم عادی مقدار پتانسیل تورم خاک ناچیز بدست آمده است.

عوامل موثر در تراکم خاک بستگی دارد به : ۱- نوع خاک ۲- انرژی ۳- رطوبت

در عملیات تراکم حجم آب موجود در خاک تغییر نمی کند و فقط حجم هوای خاک کاسته می شود. میزان تراکم یک خاک معمولاً بر اساس اندازه گیری وزن مخصوص خشک مشخص می شود. میزان رطوبتی که در آن حداکثر وزن مخصوص خشک حاصل می شود میزان رطوبت بهینه می نامند. به طور کلی آزمایش تراکم به دو صورت می باشد : تراکم استاندارد و تراکم اصلاح شده.

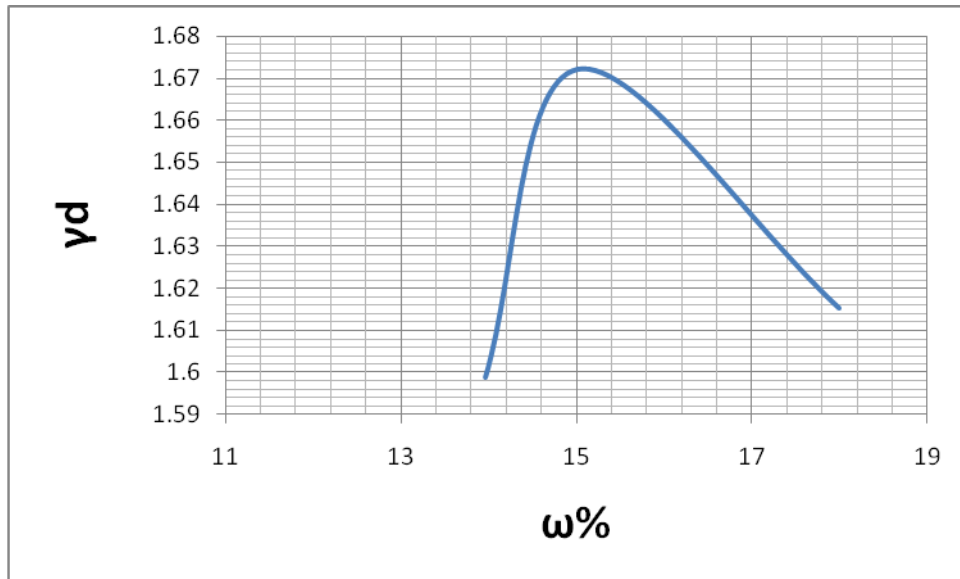
\*\*\* در این تحقیق از روش تراکم استاندارد استفاده شده است.

هدف از انجام آزمایش: رسیدن به درصد رطوبتی از خاک است (رطوبت بهینه)<sup>۱</sup> که در آن بیشترین

مقدار تراکم صورت می گیرد.

---

<sup>۱</sup> Optimum



شکل ۳-۱۲: نمودار تراکم آزمایشگاهی خاک مورد مطالعه

نتیجه گیری:

همانطوری که از نمودار مشخص است در صد رطوبت بهینه برابر ۱۵٪ و حداکثر وزن مخصوص خشک برابر با  $1/67 \text{ (g/cm}^3\text{)}$  می باشد که از میانگین سه آزمایش متفاوت بدست آمده است.

۳-۲-۱-۲-۶-۲- آزمایش برش مستقیم استاندارد -۳۰۸۰- ASTM D [۴۲].

مقدمه :

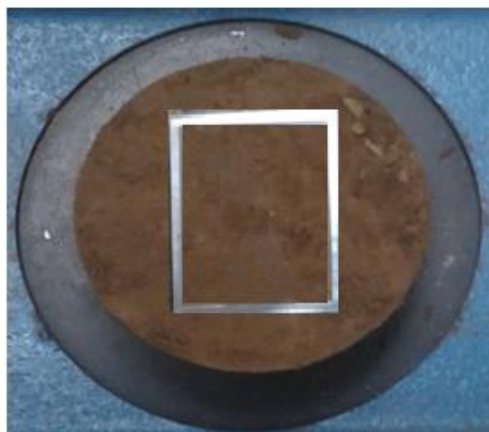
در آزمایشگاه پارامترهای مقاومت برشی خاک با دو روش آزمایشی تعیین می گردد: آزمایش برش مستقیم و آزمایش سه محوری، که در این تحقیق از آزمایش برش مستقیم استفاده شده است.

هدف از انجام آزمایش: بدست آوردن پارامترهای مقاومت برشی خاک مورد مطالعه.

نمونه های باز سازی شده : جهت آماده سازی این نمونه ها، با توجه به درصد رطوبت بهینه و جرم حجمی خاک خشک حداکثر بدست آمده از آزمایش تراکم مقدار آب و خاک لازم محاسبه و تهیه گردیده است، مقدار آب مورد نظر به خاک اضافه کرده و مدت ۲۰ دقیقه به هم می زنیم تا در پایان مخلوط همگن وبدون کلوخه ای بدست آید سپس آن را در قالب تراکم متراکم می کنیم ونمونه های باز سازی شده را ازدرون قالب تراکم بوسیله قالب مخصوص دستگاه برش مستقیم جدا کرده آنگاه در رینگ دستگاه برش مستقیم قرار می دهیم بدیهی است تهیه نمونه های تحت شرایط مساوی وهمگن



در نتایج بسیار موثر می‌باشد. نمونه های تهیه شده برای جذب رطوبت یکسان به مدت ۱۸ ساعت درون محفظه عایق (زیپ کیف) قرار گرفته طبق توصیه جدول (شکل ۳-۶ بخش ضمیمه) و سپس به مدت ۲۴ ساعت در آب اشباع شدند. و در دور کاملاً آرام به منظور بدست آوردن پارامترهای تحکیم یافته - زهکشی شده در دستگاه برش مستقیم مورد آزمایش قرار گرفتند.



شکل ۳-۱۳: گرفتن نمونه های باز سازی شده از میان قالب تراکم .

نمونه های دست نخورده : در این نمونه ها نیز با تکنیک قبلی از وسط نمونه های دست نخورده (تهیه شده در سایت) با دقت لازم و چندین بار تکرار تهیه شده است و سپس به مدت ۲۴ ساعت در آب اشباع شدند. و در دور کاملاً آرام به منظور بدست آوردن پارامترهای تحکیم یافته - زهکشی شده در دستگاه برش مستقیم مورد آزمایش قرار گرفتند [۴۳].

\*\*\* در این تحقیق آزمایشات فوق بر روی نمونه های دست نخورده و باز سازی شده انجام شده است. و زمان لازم از (جدول ۶-۱ بخش ضمیمه) استخراج شده است.

\*\*\* برای دست یابی به دور مناسب برای زمان لازم در دستگاه آزمایش برش مستقیم، (جدول ۶-۲ بخش ضمیمه) تهیه و استفاده شده است .

در (شکل ۳-۱۴) نمونه ی پس از برش در دستگاه برش مستقیم مشاهده می شود.



شکل ۳-۱۴: نمونه ی پس از برش در دستگاه برش مستقیم (قالب مربعی).

نتیجه گیری:

نتایج آزمون برش مستقیم بر روی نمونه های دست نخورده و باز سازی شده به شرح جدول (شماره ۳-۶) آمده است دلیل کم شدن مقادیر چسبندگی وزاویه اصطکاک داخلی در نمونه باز سازی شده اثر دست خوردگی می باشد.

جدول ۳-۴: جدول مقایسه مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی

نوع نمونه	C (Kpa)	$\phi$ °
دست نخورده	29	9
بازسازی شده	22	11

### ۳-۲-۱-۷- آزمایشات تکمیلی:

به منظور بررسی کامل تر از خاک مورد استفاده و ارزیابی خاک از نظر قابلیت نشست، تورم آزمایشهای تکمیلی به شرح زیر انجام شد.

۳-۲-۱-۶- آزمایش تحکیم یک بعدی (ادئو متر): استاندارد - ۲۴۳۵: ASTM D [۴۴].

۳-۲-۱-۶-۱- آزمایش تحکیم ساده:

مقدمه :

خاکهای چسبنده اشباع و خاکهای آلی در برابر نشست های ناشی از مقادیر زیادی بارسازه‌ای پایدار هستند. این بارها اغلب وزن مستقیم سازه ای هستند که باعث نشست خاکهای چسبنده و آلی می-شود اما عوامل ثانویه نیز مثل پایین رفتن سطح آب زیر زمینی می تواند باعث نشست شود. نشست خاکهای رسی اشباع یا آلی دارای سه مؤلفه مختلف است: نشست آبی ، نشست اولیه و نشست ثانویه.

در آزمایش تحکیم یک بعدی دو هدف را دنبال می کنیم:

الف: با قرار دادن یک بار ثابت روی خاک تغییر شکل آن را با زمان اندازه می گیریم. این اندازه گیری تا جایی ادامه پیدا می کند که خاک دیگر تحت آن بار تغییر شکلی ندهد. وقتی دیگر تغییری در اندازه گیری ها دیده نشد بار تمام اثر تحکیمی خود را بر خاک گذاشته است و می توانیم بار بعدی را روی نمونه بگذاریم.

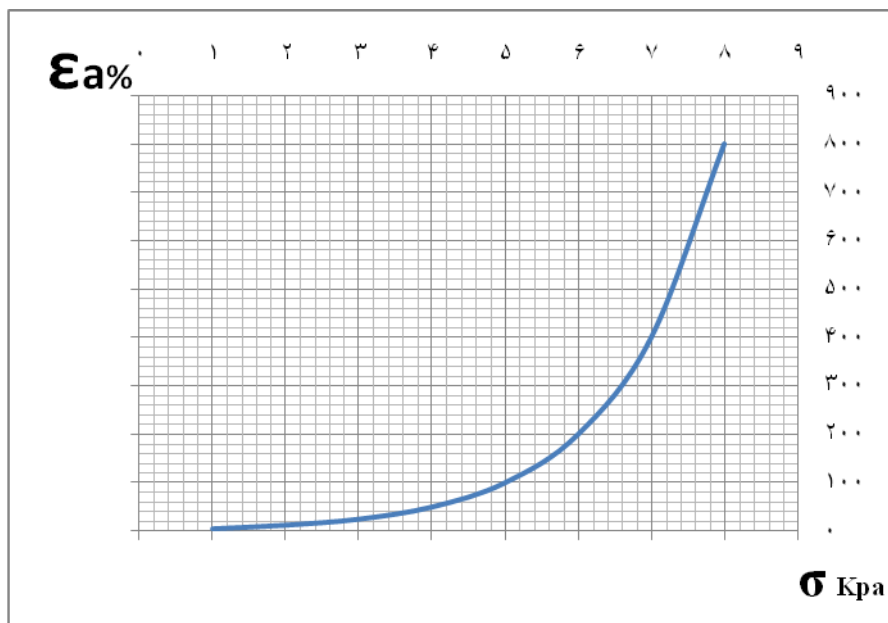
ب: با قرار دادن بارهای مختلف روی خاک و اندازه گیری مقدار نهایی تغییر شکل در هر مرحله رابطه ای بین نشست و بارهای مختلف پیدا می کنیم.

هدف از انجام آزمایش: تعیین پارامترهای مؤثر در پیش بینی شدت نشست و میزان آن در سازه های متکی بر خاک های رسی است. در(شکل ۳-۱۵) دستگاه تحکیم یک بعدی مشاهده می شود.



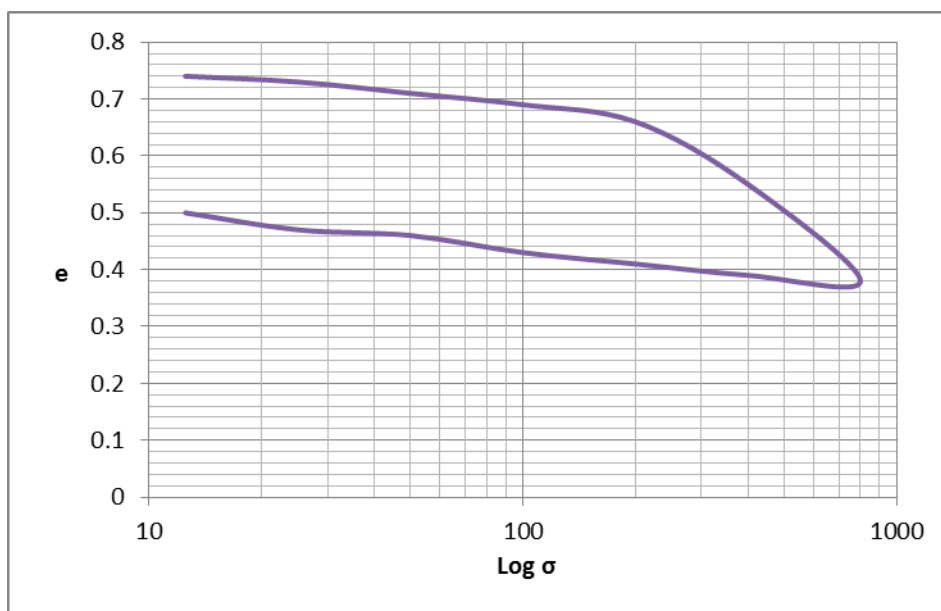
شکل ۳-۱۵ : دستگاه تحکیم یک بعدی (ادئومتر) و رینگ آن

در (شکل ۳-۱۶) نمودار تنش قائم در برابر کرنش قائم جهت بدست آوردن پارامترهای، ضریب ادئومتری، ضریب تغییر حجمی و مدول الاستیسیته خاک مورد تحقیق ترسیم شده است .



شکل ۳-۱۶: نمودار تحکیم یک بعدی (ادئومتر) - تنش قائم در مقابل درصد تغییر مکان نسبی.

در (شکل ۳-۱۶ B و A) نمودار تخلخل در برابر لگاریتم تنش قائم جهت بدست آوردن پارامترهای شاخص تراکم، شاخص تورم و شاخص تراکم مجدد خاک مورد تحقیق ترسیم شده است.

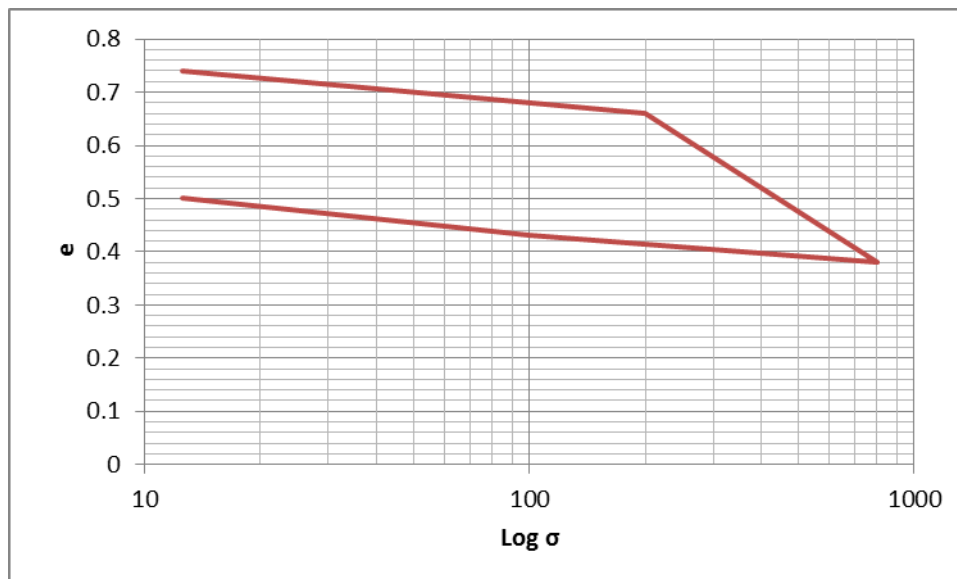


شکل ۳-۱۶-A: نمودار تحکیم یک بعدی (ادئومتر)، تخلخل در مقابل لگاریتم تنش قائم.

A: آزمایشگاهی

لازم به ذکر است نمودار فوق به صورت آزمایشگاهی ترسیم گردیده برای استفاده مفیدتر، بایستی

اصلاح اثر دست خوردگی بر روی این منحنی به صورت زیر انجام پذیرد. (قسمتهای منحنی به حالت خطی تغییر کند با شیب های متفاوت).



شکل ۳-۱۶-B: نمودار تحکیم یک بعدی (ادئومتر)، تخلخل در مقابل لگاریتم تنش قائم.

B: اصلاح شده.

نتایج آزمایش تحکیم ساده در (جدوال ۳-۶ و ۵) خلاصه شده است.

جدول ۳-۵: نتایج آزمایش تحکیم یک بعدی

شاخص تورم	شاخص تراکم مجدد (بیش تحکیمی)	شاخص تراکم از آزمایش تحکیم
Cs	Cr	Cc
0.03	0.03	0.36

جدول ۳-۶: نتایج بخشی از بارگذاری آزمایش تحکیم یک بعدی

$\sigma$ (Kpa) تنش قائم	E <sub>od</sub> (Kpa) ضریب ادئومتری	mv (1/Kpa) ضریب تغییر حجمی	E (Kpa) مدول الاستیسیته
5	15.87	0.06	10.58
12.5	7.83	0.13	5.22

25	16.80	0.06	11.20
50	12.07	0.08	8.04
100	7.13	0.14	4.75
200	9.24	0.11	6.16
400	6.79	0.15	4.53
800	1.93	0.52	1.29

نتیجه گیری :

- با توجه به عدد بدست آمده از شاخص تورم نشان دهنده این است که خاک مورد نظر دارای پتانسیل تورمی ناچیز می باشد .

- شاخص تراکم بدست آمده از دو آزمایش مختلف درصد خطای کمی دارند .

- ضریب ادنومتری(شیب منحنی تنش کرنش)(ضریب ارتجاعی خاک در شرایط کرنش جانبی صفر) برای یک خاک مقدر ثابتی نیست و تابع مقدار بار وارده به خاک می باشد.

- مدول ارتجاعی خاک برای یک خاک مقدر ثابتی نیست و تابع مقدار بار وارده به خاک می باشد.

### ۳-۲-۱-۷- آزمایشهای شناسایی خاک ، (آنالیز فازی وعنصری):

#### ۳-۲-۱-۷-۱- طیف سنج پراش اشعه ایکس XRD ( X Ray Diffraction )

معرفی دستگاه XRD

پراش اشعه x یک روش غیر تخریبی با چند کاربرد است که اطلاعات جامعی درباره ترکیبات شیمیایی و ساختار کریستالین مواد طبیعی و صنعتی ارائه می دهد. هر کریستالی طرح<sup>۱</sup> اشعه x منحصر به فرد خود را داراست که ممکن است به عنوان اثر انگشت<sup>۲</sup> برای تعیین هویت<sup>۳</sup> آن استفاده شود. گسترده ترین استفاده XRD در شناسایی ترکیبات کریستالین بر اساس طرح پراش آنهاست. از

<sup>1</sup> Pattern

<sup>2</sup> Fingerprint

<sup>2</sup> Identification

دیگر کاربردهای XRD می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: XRD کاربردهای وسیعی در زمین‌شناسی، علم مواد، علم محیط، شیمی، فیزیک، صنعت دارویی و غیره دارد [۴۴].

وظیفه دستگاه XRD اندازه‌گیری این صفحات اتمی در هر ماده می‌باشد. شناسایی تمام فاصله‌های صفحات موجود در نمونه و مقایسه آنها با کارتهای استاندارد حاضر (۱۰۰,۰۰۰ کارت) منجر به شناسایی فاز یا فازهای موجود در نمونه می‌گردد.

در این روش مقداری از نمونه کاملاً پودر شده و بطور پراکنده (تصادفی) تمامی صفحات موجود در مقابل اشعه قرار می‌گیرند. زمانی که یک دسته اشعه X با طول موج معین (مثلاً  $\lambda = 1.542$  آنگستروم مربوط به  $\alpha k$  عنصر مس) تحت زوایای مختلف به هر صفحه برخورد نماید، هر صفحه در زاویه معین خود ( $\theta$ ) اشعه تابیده شده را منعکس یا به عبارت صحیح پراش می‌دهد. در این حالت (پراش) طول مسیر نفوذ و بازگشت اشعه از سطوح موازی داخلی مضرب صحیحی از طول موج می‌باشد. رابطه براگ این مطلب را بخوبی نشان می‌دهد [۴۴].

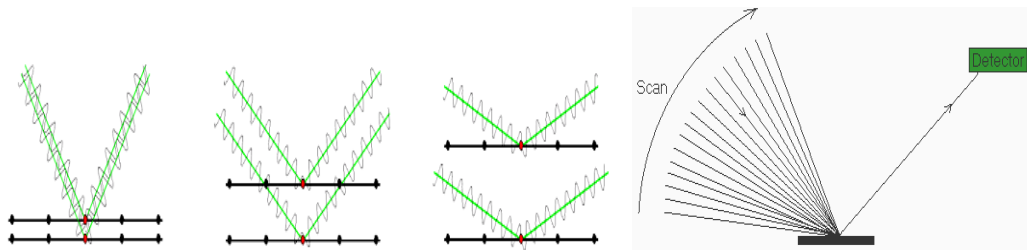
$$n\lambda = 2d \tan \theta \quad (1-3)$$

$\theta$  = زاویه تابش اشعه X

$\lambda$  = طول موج اشعه X معمولاً ۱/۵۴۲ آنگستروم

d = فاصله صفحه بر حسب آنگستروم

n = عدد ثابت (معمولاً برابر با یک)



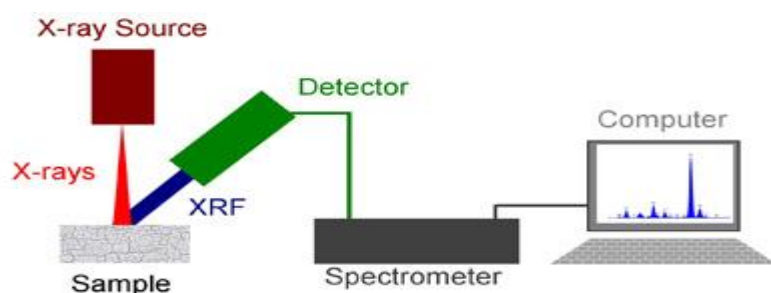
شکل ۳-۱۷: شمایی از عمل کرد دستگاه XRD (رابطه براگ) [۴۴].

۳-۲-۱-۲-۲-۲: طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس XRF

معرفی دستگاه : XRF ، ( X Ray Fluorescence )

پرتو ثانویه اشعه ایکس حاصل از مواد می باشد که جهت اندازه گیری درصد عناصر متشکله یک ترکیب استفاده می شود یک روش مناسب جهت شناسایی نمونه های که هیچگونه اطلاعاتی در مورد آنها نداریم. برای اندازه گیری مقدار عناصر دو روش وجود دارد یکی روش های شیمی تجزیه که عمدتاً از تیتراسیون استفاده می شود و دیگری روش ها تجزیه غیر مخرب بوسیله اشعه X که اصطلاحاً به آن XRF گفته می شود که مخفف کلمه X Ray Fluorescence می باشد. مزیت استفاده از XRF بر روش های شیمیایی سرعت بالا و هزینه پایین و دقت قابل قبول است. [۴۵].

XRF دستگاهی است برای اندازه گیری طول موج و شدت امواج فلورسانس ساطع شده از اتم های مختلف در نمونه که نتیجه آن شناسایی نوع و میزان عناصر ماده می باشد. دستگاه XRF کاربرد وسیعی در بسیاری از علوم دارد و امروزه به علت پیشرفت های شگرف در این زمینه بصورت یکی از وسایل ضروری در آزمایشگاه های تحقیقاتی در آمده است. XRF با سرعت عمل بسیار زیاد قادر است عناصر بسیاری را بصورت کیفی و کمی مورد آنالیز قرار دهد. به علت سرعت زیاد و عدم مصرف مواد شیمیایی روش ارزانی نسبت به بقیه روش های آنالیزی بوده و محیط زیست را نیز آلوده نمی سازد [۴۵و۴۶].



شکل ۳-۱۸ : شمایی از عمل کرد دستگاه XRF

در این تحقیق آزمایش XRD برای شناسایی اندازه ذرات (آنالیز فازی) و آزمایش XRF برای شناسایی عناصر موجود (آنالیز عنصری) بر خاک، آهک ساختمانی و نانورس مورد نظر در آزمایشگاه مواد معدنی اشکال (۳-۱۹ و ۲۰) دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شد که نتایج به شرح فوق می باشد.

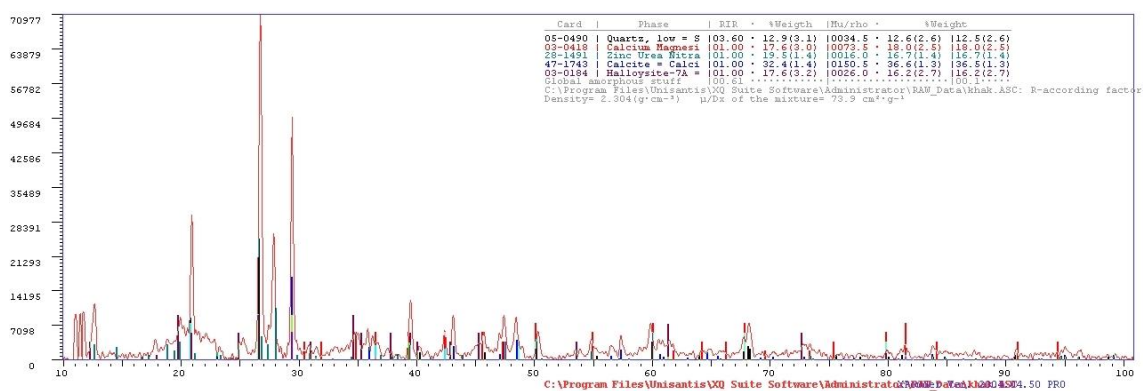




شکل ۳-۱۹: آزمایشگاه تجزیه مواد معدنی XRF دانشگاه صنعتی شاهرود



شکل ۳-۲۰: آزمایشگاه تجزیه مواد معدنی XRD دانشگاه صنعتی شاهرود



شکل ۳-۲۱: نمودار XRD خاک رس مورد مطالعه

۳-۲-۱-۷-۲-۱-: نتایج آزمایشات XRD و XRF بر روی خاک رس.

در جدول (شماره ۷-۳) نتایج آزمایش XRF برای شناسایی عناصر موجود (آنالیز عنصری) و در (شکل ۳-۳-

۲۱)، XRD شناسایی اندازه ذرات (آنالیز فازی) مشاهده می‌شود.

جدول ۷-۳: نتایج آزمایش XRF بر روی خاک مورد مطالعه

Analysis	Result
Si	13.9303%
Ca	57.4778%
Fe	8.7686 %
Al	9.0429 %
K	2.6122%
Mg	3.9384 %
Ti	0.7268%
Sr	0.1041%
P	0.2642%
Na	1.7567%
Mn	0.1907%
I	0.2804 %
P	0.2642%

### ۳-۲-۲- آنالیز آهک ساختمانی:

آهک مورد نظر از کارخانه آهک شاهرود نوین تهیه گردیده و از لحاظ درجه بندی طبق استاندارد ملی ایران [۴۷]، به آهک نیمه آبی مشهور می‌باشد که در بسته های ۲۰ کیلوگرمی به صورت آهک شکفته عرضه می‌گردد. همچنین آزمایش XRD برای شناسایی اندازه ذرات (آنالیز فازی) و XRF برای شناسایی عناصر موجود (آنالیز عنصری) بر روی آهک مورد نظر انجام شده است.



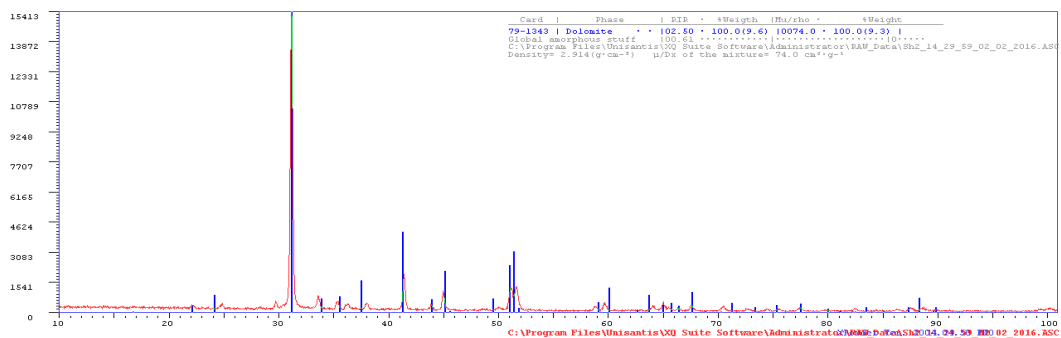
شکل ۳-۲۲: آهک ساختمانی

در جدول (شماره ۳-۸) نتایج آزمایش XRF برای شناسایی عناصر موجود (آنالیز عنصری) و در (شکل ۳-

۲۲)، XRD شناسایی اندازه ذرات (آنالیز فازی) مشاهده می‌شود.

جدول ۳-۸: نتایج آزمایش XRF بر روی آهک مورد مطالعه

Analysis	Result
CaO	82.6929 %
Si	5.0524 %
Mg	3.6251 %
Fe	3.3759 %
Al	2.9557 %
K	1.0590 %
S	0.5519 %
Ti	0.4882 %
Sr	0.1225 %
P	0.0764 %



شکل ۳-۲۳: نمودار XRD آهک ساختمانی

نتیجه گیری:

با توجه به جدول (شماره ۳-۹) مقدار خلوص آهک فوق حدود ۸۲,۵٪ می باشد که از لحاظ درجه بندی طبق استاندارد ملی ایران [۴۷]، به آهک نیمه آبی مشهور است.

### ۳-۲-۳- مشخصات نانورس تهیه شده.

نانو رس مورد نظر از شرکت رهپویان ماهان در تهران تهیه گردیده است که مشخصات آن طبق کاتالوک شرکت ارائه دهنده به قرار جدول (شماره ۳-۹)، است همچنین آزمایش XRD برای شناسایی اندازه ذرات (آنالیز فازی) و XRF برای شناسایی عناصر موجود (آنالیز عنصری) بر روی خاک مورد نظر انجام شده است.

جدول ۳-۹: مشخصات نانو رس مورد مطالعه ارائه شده از طرف شرکت سازنده

NO	PH	ITEM	SIZE(nm)	W%	PURITY%	SSA(m <sup>2</sup> /gr)
1.brown	7.3	NANO	1-2	1-2	99.3	48-100
	7.5	CLY				

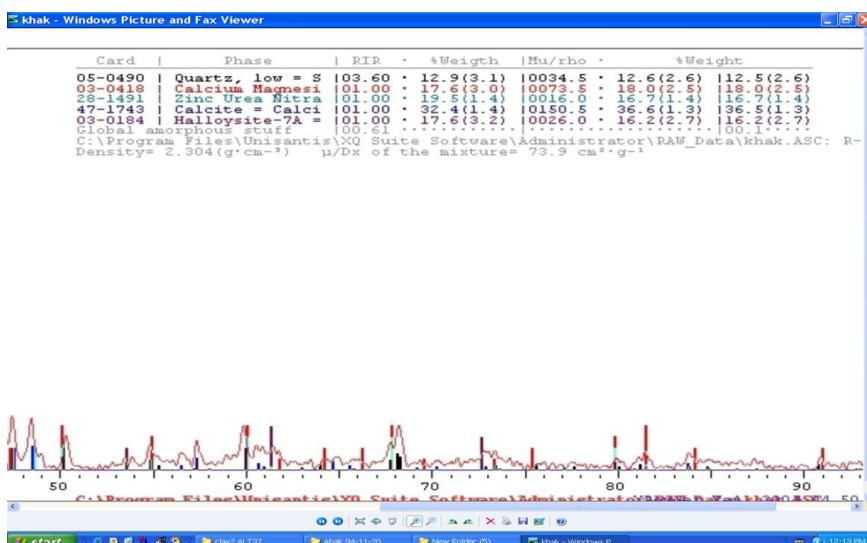


شکل ۳-۲۴: نانورس

در جدول (شماره ۳-۱۰)، نتایج آزمایش XRF شناسایی عناصر موجود (آنالیز عنصری) و در (شکل ۳-۲۴)، XRD شناسایی اندازه ذرات (آنالیز فازی) مشاهده می شود.

جدول ۳-۱۰: نتایج آزمایش XRF بر روی نانورس مورد مطالعه

Analysis	Result	Analysis	Result
Ca	58.6203 %	Si	14.6203 %
Mg	3.9233 %	Ti	0.8321%
k	2.6251 %	Sr	0.1023 %
Fe	8.3701 %	p	0.2456 %
Al	8.9633 %	Na	1.9633 %



شکل ۳-۲۵: نمودار XRD نانورس

نتیجه گیری :

با توجه جداول (شماره های ۳-۱۱ و ۱۰) مشاهده می شود که خلوص ماده نانو رس با مشخصات کارخانه سازنده یکسان می باشد همچنین از نمودار (شکل ۳-۲۵) نیز قطر ذرات حدود ۲۰-۱۰ نانومتر مشخص می باشد و با مشخصات ذکر شده از طرف شرکت سازنده مطابقت دارد.

### ۳-۲-۴- آب :

آب مورد استفاده در این تحقیق برای تمام آزمایشها آب آشامیدنی در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد .

\*\*\*در این قسمت خلاصه نتایج آزمایشهای بخش شناسایی، فیزیکی و مکانیکی خاک مورد مطالعه در (جدول ۳-۱۱) آمده است.

جدول ۳-۱۱: نتایج آزمایشهای شناسایی، فیزیکی و مکانیکی خاک مورد مطالعه

رنگ ظاهری	رده بندی خاک	حد خمیری	حد روانی	دامنه خمیری	چگالی ذرات جامد	رطوبت بهینه	دانسیتته خشک طبیعی
Appearance	Soil Classification	PL	LL	PI	GS	$\omega\%$	$\gamma_d$ (KN/cm <sup>3</sup> )
قهوه ای	CL	15	21	6	2.672	15%	1.80
شاخص تراکم مجدد (بیش تحکیمی)	شاخص تراکم از آزمایش تحکیم		شاخص تورم	چسبندگی	زاویه اصطکاک داخلی		
Cr	Cc	Cs	C (Kpa)	$\phi^\circ$			
0.04	0.38	0.04	22	11			

## فصل چهارم

نتایج و بحث بر روی آزمایشهای انجام

شده

در این فصل به شرح و بحث بر روی نتایج بدست آمده از آزمایشهای برش مستقیم و حدود اتربرگ با در صدهای مختلف نانو رس و آهک پرداخته می شود.

#### ۴-۱-۱- تعیین پارامترهای مقاومت برشی

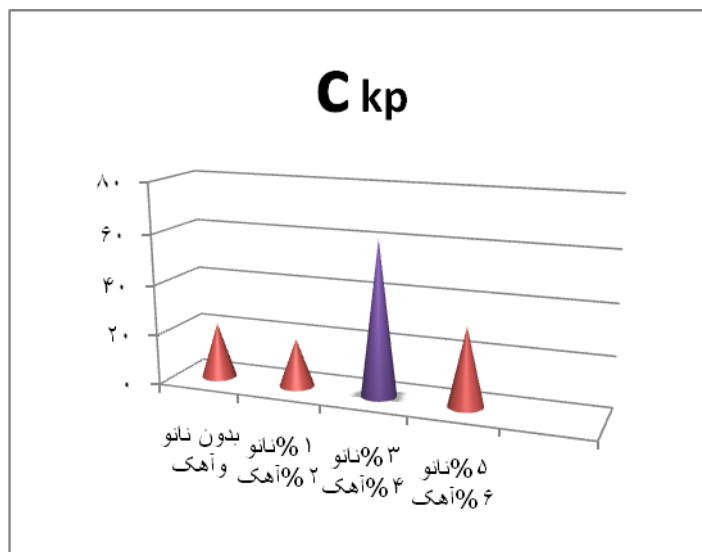
در این تحقیق، پارامترهای مقاومت برشی خاک از آزمایش برش مستقیم بدست آمده است. روش آماده سازی نمونه ها:

جهت آماده سازی نمونه ها ، ابتدا با استفاده از مقادیری که براساس (حجم قالب دستگاه برش مستقیم، درصد رطوبت بهینه و جرم حجمی خاک خشک حداکثر بدست آمده از آزمایش تراکم مطابق (جدول ۴-۶ بخش ضمیمه) محاسبه و تهیه گردیده است، مقدار آب مورد نظر را درون بشر ریخته و نانورس را به آن اضافه می کنیم و به مدت ۱۰ دقیقه توسط میکسر آنرا هم زده تا نانو رس به طور همگن در آب حل شود. سپس محلول فوق را به خاک مخلوط شده با آهک اضافه کرده و مدت ۲۰ دقیقه به هم می زنیم تا در پایان مخلوط همگن و بدون کلوخه ای بدست آید. بدیهی است تهیه نمونه های تحت شرایط مساوی و همگن در نتایج بسیار موثر می باشد. نمونه های تهیه شده برای جذب رطوبت مطابق (جدول ۳-۶ بخش ضمیمه) به مدت ۱۸ ساعت درون محفظه عایق (زیپ کیف) قرار گرفته و سپس به مدت ۲۴ ساعت در آب اشباع شدند. و در دور کاملاً آرام به منظور بدست آوردن پارامترهای تحکیم یافته - زهکشی شده در دستگاه برش مستقیم مورد آزمایش قرار گرفتند.

ارائه نتایج حاصله بوسیله نمودارها و جداول :

\*\*\*به منظور یافتن در صد بهینه نانو رس و آهک برای پارامترهای مقاومت برشی از ۱ و ۳ و ۵ در صد نانورس و ۲ و ۴ و ۶ در صد آهک استفاده شده است.





شکل ۴-۱: تاثیر افزودن نانورس و آهک به خاک برای یافتن درصد افزودنی بهینه

به منظور افزایش پارامتر چسبندگی

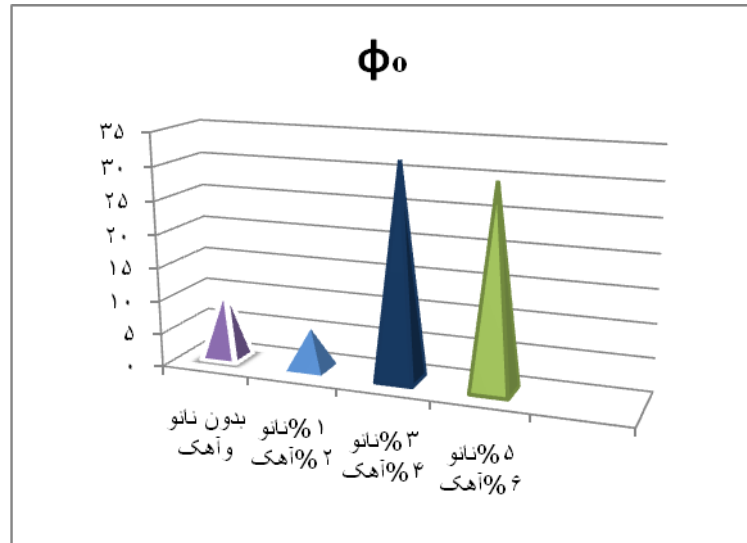
جدول ۴-۱: جدول مقایسه مقادیر چسبندگی

نوع نمونه	C (Kpa)
دست نخورده	29
بدون نانورس و آهک بازسازی شده	22
۱% نانورس ۲% آهک بازسازی شده	19
۳% نانورس ۴% آهک بازسازی شده	61
۵% نانورس ۶% آهک بازسازی شده	31

در نمودار (شکل ۴-۱)، تغییرات میزان چسبندگی را بر حسب درصد نانورس و آهک نشان می دهد

همانطوری که در نمودار مشخص است نمونه با ۳% نانورس و ۴% آهک بیشترین چسبندگی را داراست

و به عنوان درصد بهینه انتخاب می گردد.



شکل ۴-۲: تاثیر افزودن نانورس و آهک به خاک برای یافتن درصد افزودنی بهینه

به منظور افزایش پارامتر زاویه اصطکاک داخلی

در نمودار شکل (شماره ۴-۲)، تغییرات میزان زاویه اصطکاک داخلی را برحسب درصد نانو رس

و آهک نشان می دهد همانطوری که در نمودار مشخص است نمونه با ۳٪ نانو و ۴٪ آهک بیشترین

زاویه اصطکاک را داراست و به عنوان درصد بهینه انتخاب می گردد.

جدول ۴-۲: جدول مقایسه مقادیر زاویه اصطکاک داخلی

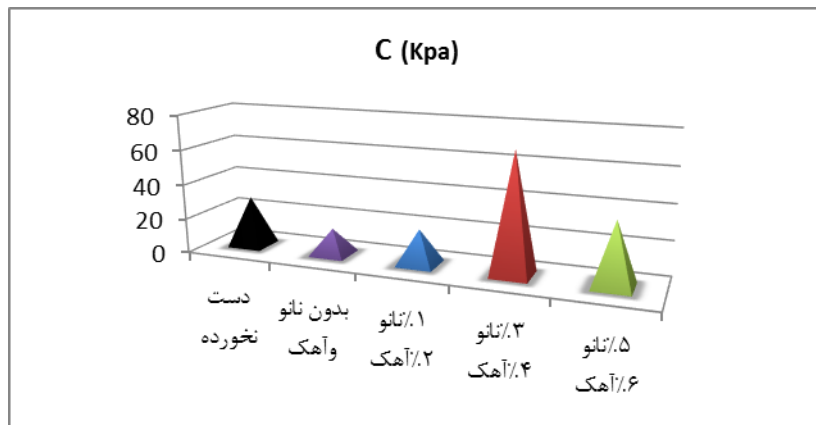
نوع نمونه	φ °
دست نخورده	9
بدون نانورس و آهک بازسازی شده	11
۱٪ نانورس ۲٪ آهک بازسازی شده	6
۳٪ نانورس ۴٪ آهک بازسازی شده	32
۵٪ نانورس ۶٪ آهک بازسازی شده	30

جدول ۴-۳: جدول مقایسه مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی

نوع نمونه	C (Kpa)	φ °
دست نخورده	29	9
بدون نانورس و آهک بازسازی شده	22	11

۱٪ نانورس ۲٪ آهک بازسازی شده	19	6
۳٪ نانورس ۴٪ آهک بازسازی شده	61	32
۵٪ نانورس ۶٪ آهک بازسازی شده	31	30

جهت ارزیابی تاثیر نانو رس بدون حضور آهک آزمایش با ۱ لی ۵ درصد نانورس به صورت نمونه های بازسازی شده مورد آزمایش قرار گرفتند، که نتایج آن در نمودار (شکل ۴-۳) مشاهده می شود.



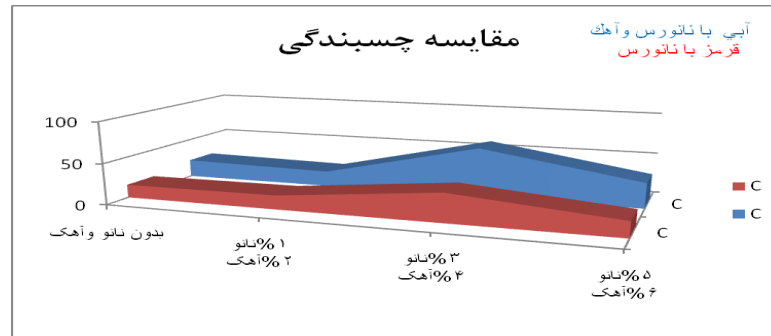
شکل ۴-۳: تاثیر افزودن نانورس به خاک برای یافتن درصد افزودنی بهینه به منظور افزایش پارامتر چسبندگی

جدول ۴-۴: جدول مقایسه مقادیر چسبندگی نمونه های بانانورس و آهک - بدون آهک

نوع نمونه	C (Kpa)	نوع نمونه	C (Kpa)
دست نخورده	29	دست نخورده	29
بدون نانورس و آهک بازسازی شده	22	بدون نانورس و آهک بازسازی شده	22
۱٪ نانورس بازسازی شده	17	۱٪ نانورس ۲٪ آهک بازسازی شده	19
۳٪ نانورس بازسازی شده	35	۳٪ نانورس ۴٪ آهک بازسازی شده	61
۵٪ نانورس بازسازی شده	19	۵٪ نانورس ۶٪ آهک بازسازی شده	31

به منظور نشان دادن رابطه بین تاثیر نانو رس بدون حضور آهک و با حضور آهک بر پارامتر چسبندگی

نمودار (شکل ۴-۴) ترسیم گردیده است.



شکل ۴-۴: مقایسه تاثیر نانورس بدون حضور آهک و با حضور آهک بر روی پارامتر چسبندگی

- از نمودار فوق نتیجه می گیریم که افزایش بیش از ۳٪ نانو رس باعث کم شدن چسبندگی شده یا به عبارتی در صدهای بالای این ماده تاثیر چندانی در تغییر پارامتر های مقاومت برشی ندارد.
- همچنین می توان چنین نتیجه گرفت که ، نانورس نیاز به یک ماده فعال کننده مثل آهک(تبادل کاتیونی) دارد. در نمودار (شکل ۴-۴) این مورد به خوبی مشهود می باشد.

#### ۴-۲- شرح نتایج و تفسیر آزمایشات برش مستقیم

با استفاده از نمودارهای (اشکال ۴-۳ و ۴-۲) که از نتایج حاصله از آزمایش برش مستقیم ترسیم شده است، می توان چنین نتیجه گرفت که علت اصلی تاثیرات فوق بر پارامتر های مختلف آزمونها تاثیر توام نانو رس و آهک به دلیل تبادل کاتیونی میان Cao موجود در آهک و اجزای متشکله نانو رس شامل ( سیلیس ، سدیم و منیزیم و ... ) موجود در رس بوده که، ذرات رس به یکدیگر نزدیکتر شده و در اثر این فعل و انفعالات ذرات نانو باتوجه به سطح ویژه بالای خود، نانو تخلخل و بار سطحی که دارند باعث فعل و انفعالات بین ذره ای شده و باعث میل ترکیبی با آب ، خاک رس و نهایتا موجب تغییراتی از نظر فیزیکی در میزان تخلخل ، جذب رطوبت، حد روانی، حد پلاستیک همچنین موجب تغییر در پارامتر های چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی می شود. بدیهی است درصدهای بالای نانو رس نمودار (شکل ۴-۴) نه تنها تاثیر چندانی در تغییر خصوصیات مقاومتی خاک نداشته بلکه باعث کاهش مقاومت برشی خاک نیز می گردد. که با توجه به گران بودن نانورس این مورد نقطه مثبتی برای استفاده از در صدهای کم این ماده گران قیمت در اصلاح و بهسازی خاک می باشد و نیز قابل توجه اقتصادی برای یک پروژه می تواند باشد.

فصل پنجم

جمع بندی،

نتیجه گیری

و پیشنهادات

## ۵-۱- نتایج آزمون برش مستقیم واتربرگ:

- با توجه به آزمایشهای انجام شده بر روی نمونه های مختلف مشخص گردید ( ۰.۳/نانو رس و ۰.۴/آهک) برای پارامتر چسبندگی و پارامتر زاویه اصطکاک داخلی بهینه می باشد.
- با توجه به آزمون آتربرگ بالاترین مقدار خصوصیات پلاسیسیته در ۰.۴/ آهک و ۰.۴/ نانورس حاصل شد.
- عامل کوتاه زمان ۱۸ ساعته ی به عمل آوری برای پروژه هایی که نیاز به سرعت اجرا دارند می تواند مفید باشد.
- در این پژوهش عامل اصلی افزایش چسبندگی وزاویه اصطکاک داخلی، ساخت نمونه ها ی یکسان وزمان به عمل آوری آنها همچنین ترکیب، نانو رس و آهک با هم دارد .
- اضافه نمودن نانورس به تنهایی تاثیر چندانی در پارامتر های مقاومت برشی نداشته و نیاز به ماده فعال کننده ای مثل آهک دارد.
- با توجه به اینکه نانو رس ماده گران قیمتی است و در این پژوهش، درصدهای بهینه بین (۱ تا ۳ درصد) بدست آمده است مصرف مقدارکم نانو رس برای بهسازی خاک به همراه آهک از جهت هزینه های اقتصادی نیز می تواند قابل توجیه باشد.

## ۵-۲- پیشنهادات:

- می توان با استفاده از نتایج حاصله از خاکهای مشابه آنها را با یک رابطه ریاضی مدل کرد (نمودارهای همبستگی و مشابه).
- چنانچه تاثیر نانو رس و آهک را بر روی پارامترهای فیزیکی و مکانیکی مانند تحکیم و تراکم نیز مورد ارزیابی قرار دهیم شناخت بهتر و کامل تر رامی توان ارائه نمود.

## فصل ششم

### ضمائم

جدول ۶-۱: حد اقل زمان لازم برای آزمون برش مستقیم بکار رفته در آزمایشها [۳۷].

حد اقل زمان برای گسیختگی	رده بندی متحد (یونیفاید)
۱۰ دقیقه	SP,SW (<۵درصد ریزدانه)
۶۰ دقیقه	SM,SPSM,SW,SM (<۵درصد ریزدانه)
۲۰۰ دقیقه	SP,SC,CL,ML,SC
۲۴ ساعت	CH, MH

\*\*\* برای دست یابی به دور مناسب برای زمان لازم در آزمایش برش مستقیم، جدول زیر تهیه و استفاده شده است.

جدول ۶-۲ محاسبات زمان برای دستگاه برش مستقیم بکار رفته در آزمایشها

تغییر مکان بر حسب (mm) 7، جابجایی					
Gear Lever Position	زمان بر حسب دقیقه t (Min)				
	60-30	54-36	45-45	36-54	30-60
A	5.83333 3	7.77777 8	11.6666 7	17.5	23.33333
B	29.1666 7	38.8888 9	58.3333 3	87.5	116.6667
C	145.833 3	194.444 4	291.666 7	437.5	583.3333
D	729.166 7	972.222 2	1458.33 3	2187.5	2916.667
E	3645.83 3	4861.11 1	7291.66 7	10937.5	14583.33

جدول ۶-۳ زمان لازم برای جذب رطوبت دانه های خاک مورد آزمایش در آزمون برش مستقیم [۴۲].

Classification D 2487	Minimum Standing Time (h)
خاک در طبقه بندی یونیفاید	زمان لازم برای جذب رطوبت



SW, SP	No Requirement
M	3
SC, ML, CL	18
MH, CH	36

جدول ۶-۴: محاسبات درصد های مختلف نانو رس، آهک، آب و خاک رس بکار رفته در آزمایش برش مستقیم.

% درصد د	$W_s$ وزن خاک	$W_w$ وزن آب	$W_N$ وزن نانو رس	$W_L$ وزن آهک	$\sum W_s+W_w+W_N$ وزن مجموع	$\sum W_s+W_w+W_L$ وزن مجموع
1	126.878	20.301	1.487	1.487	148.666	148.666
2	125.597	20.095	2.973	2.973	148.666	148.666
3	124.315	19.890	4.460	4.460	148.666	148.666
4	123.034	19.685	5.947	5.947	148.666	148.666
5	121.752	19.480	7.433	7.433	148.666	148.666
6	120.470	19.275	8.920	8.920	148.666	148.666
7	119.189	19.070	10.407	10.407	148.666	148.666
8	117.907	18.865	11.893	11.893	148.666	148.666
9	116.626	18.660	13.380	13.380	148.666	148.666
10	115.344	18.455	14.867	14.867	148.666	148.666
11	114.062	18.250	16.353	16.353	148.666	148.666
12	112.781	18.045	17.840	17.840	148.666	148.666
13	111.499	17.840	19.327	19.327	148.666	148.666
14	110.218	17.635	20.813	20.813	148.666	148.666
15	108.936	17.430	22.300	22.300	148.666	148.666
16	107.654	17.020	23.786	23.786	148.461	148.461

مثال: برای ۱٪ نانو رس و ۲٪ آهک در جدول بالا با رنگ زرد مشخص شده است



## مراجع:

- [۱] -نشریه شماره ۵۵، (۱۳۸۸)، "مشخصات فنی و عمومی کارهای ساختمانی"، انتشارات معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور.
- [2]. Zhang, J.G, Germanie,T. ,Whittle, A.J., Ladd, C.,2004 .”*Index properties of a highly weathered old alluvium*” Geotechnique 42, No 7,441-451.
- [3]. R.Feynman,”*There’s plenty of room at the bottom*” reprint from speech given at anuual meeting of the American physical Society.Eng Sci:23;22-36(1960)..
- [4]. Compounds 449, pp 242–245.
- [5]. Yong, R. N. and Phadangchewit, Y., (1993), "pH Influence on selectivity and retention of heavymetals in some clay soils", Can. Geotech. J., 30, 821-833.
- [6]. Gutierrez, M.S., (2005), “Potential Applications of nano- mechanics in Geotechnial Engineering”, proc of the International Workshop on MiscoGeomechanics across Multiple Strain Scales, Cambridge,Uk ,pp 29-30.
- [7]. Krishna B. G. and Gupta, S. S., (2008), "Adsorption of a few heavy metals on natural and modifiedkaolinite and montmorillonite: A review", Advances in Colloid and Interface Science 140, pp 114–131.
- [8]. Kónyal, J. and Nagy, N. M. and Földvári, M., (2005), "The formation and production of nano andmicro particles on clays under environmental-like conditions", Journal of Thermal Analysis andCalorimetry, 79, pp 537–543.
- [9]. Lines, M. G., (2008), "Nanomaterials for practical functional uses", Journal of Alloys and

[10]. Gutierrez, M.S., (2005), “*Potential Applications of nano- mechanics in Geotechnical Engineering*”, proc of the International Workshop on Misco-Geomechanics across Multiple Strain Scales, Cambridge, Uk ,pp 29-30.

[۱۱] - عسکر جانعلی زاده، محسن، جهانشاهی، روشن، نادر، قصابکلایی، نوید، (۱۷ و ۱۸ اردیبهشت ماه ۱۳۹۲)، بررسی تاثیر نانو سیلیس در بهبود رفتار مقاومتی خاکهای رسی (نمونه موردی خاک بندر گز) هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید، نیکبخت، زاهدان.

[۱۲] - محرم مجدی، علی ارومیه ای، محمد رضا نیکو دل، (۱۳۹۳)، بررسی تأثیر افزودن نانو سیلیس بر روی خواص ژئوتکنیکی خاک رس، اولین کنفرانس ملی مکانیک خاک و مهندسی پی مهندسی عمران، تهران، دانشگاه، تربیت دبیر شهید رجایی.

[13]. G.Zhang, J. T.Germaine, A. J. Whittle, C. Ladd: *Index properties of a highly weathered old alluvium. Geotechnique* 54, No. 7, 441-451,(2004).

[14] .P.M. Gallagher, C.T. Conlee, K.M. Rollins: *Full-Scale Field Testing of Colloidal Silica Grouting for Mitigation of Liquefaction Risk*, ASCE\_1090-0241,133:2\_186,( 2007)

[15]. C. Butron: *Silica sol for rock grouting: Laboratory testing of strength, fracture behaviour and hydraulic conductivity, Tunnelling and Underground Space Technology*, Pages 603- 607. (2009).

[16]. T. W. Lambe, R. V. Whitman: *Soil Mechanics. John Wiley & Sons. in measurement and modeling of soil behavior*, ASCE, (2007).

[17]. Zhang, G. (2007). *Soil Nanoparticles and Their Influence on Engineering Properties of soils*.GSP 173 Advances in Measurement and Modeling of Soil Behavior. ASCE, Geo-Denver.New Peaks in Geotechnics.

[18]. Braja M. Das, (2010) “*Principles of Geotechnical Engineering 7<sup>ed</sup>*”, Cengage Learning.

[۱۹] - نجف زاده، عباس (۱۳۸۹)، "دیدگاهی بر فن آوری نانو (مجموعه مقالات)"، انتشارات منحنق اردبیلی.

[۲۰] - فناوری نانو و الهام از طبیعت 1393/07/01. سینا اوسطی، محمد مهدی قربانی، پیمان کریمی  
سلطانی و عبدالحسین شریفی راد، احمدی روشن قروه استان کردستان

[21]. <http://nano-mavad.blogfa.com/post-6.aspx>

[22].. nanopolice افزار sampadcity- nanocor-nanoclub- nano-edu.nano”nanoclay--  
کتاب آشنایی با فناوری نانو ۱ مقیاس نانو، ابزارها، نانو مواد، رویکردهای ساخت- سلیمی، طاهری، احمدوند

[۲۳] -سایت مرکز پژوهش رازی، <http://www.tebyan.net>

[۲۴]-سایت

اینترنتی

[http://nanoclub.ir/index.php?ctrl=paper&actn=paper\\_view&id=2637&lang=1](http://nanoclub.ir/index.php?ctrl=paper&actn=paper_view&id=2637&lang=1)

[۲۵] - اسلامی، ابوالفضل، (۱۳۹۰)، "مهندسی پی طراحی و اجرا"، مرکز تحقیقات مسکن، تهران.

[۲۶] - کاووسی، امیر، هاشمیان، لیلا، (۱۴ و ۱۵ - اسفند ۱۳۸۰)، بررسی تثبیت خاک با استفاده از آهک در فرودگاه پارس مجموعه مقالات نخستین کنفرانس بهسازی زمین، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

[۲۷] - عربانی، کرمی، (۱۳۹۰). تأثیر درصد رس و درصد آهک بر *CBR* ماسه‌های رس دار تثبیت شده با آهک، نشریه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد.

[28].TMH1: Standard Methods of Testing Road Construction Materials, 'METHOD A8, THE DETERMINATION OF THE CALIFORNIA BEARING RATIO OF UNTREATED 'SOILS AND GRAVELS.

[۲۹] - طباطبایی، امیر محمد، (۱۳۶۴)، "روسازی راه"، مرکز نشر دانشگاهی تهران.

[۳۰] -مقایسه تاثیر نانوسیلیس و نانورس بر روی حدود اتربرگ خاک رس مونت موریلونیت

کد COI مقاله: ICCE09\_933

[۳۱]- بررسی تأثیر نانو رس بر خصوصیات ژئوتکنیکی پایه ای خاک رس کائولینیت .

[48].[http://www.civilica.com/Paper-ICCAU01-ICCAU01\\_0677.html](http://www.civilica.com/Paper-ICCAU01-ICCAU01_0677.html)

کد COI مقاله: ICCAU01\_0677

[۳۲]- اثر نانو سیلیس بر خصوصیات مکانیکی و ژئوتکنیکی خاک رس. سمانه مومنی شهرکی، فرهنگ

فرخی، (۱۳۹۳) ، اولین کنفرانس ملی مکانیک خاک و مهندسی پی مهندسی عمران، تهران،

دانشگاه، تربیت دبیر شهید رجایی.

[۳۳]- قنبری، علی، (۱۳۸۸)، "کاوشهای صحرایی در مهندسی ژئوتکنیک"، نشر پژوهشی نوآوران

شریف.

[۳۴]- رحیمی، حسن، (۱۳۹۲)، "مهندسی ژئوتکنیک"، انتشارات دانشگاه تهران.

[35]. ASTM D: 422, "*Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soil*".

[36]. ASTM D: 3418, "*Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*".

[37]. ASTM D: 2487, "*Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*".

[38]. ASTM D: 2216, "*Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil, Rock, and Soil-Aggregate Mixtures*".

[39]. ASTM D: 854, "*Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*".

[40]. National Highway Institute Subsurface Investigations", (Publication No. FHWA HI-97-021)

[41]. ASTM D: 698, "*Standard Test Methods for Laboratory Compaction*

*Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>))*".

[42]. ASTM D: 3080, "*Standard Test Methods for direct shear test*"

[۴۳] - بهنیا، کامبیز، اعرابی، نگین، (۱۳۹۱) "آزمایشهای مکانیک خاک"، انتشارات نگارنده دانش.

[44]. ASTM D: 2435, "*Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading*"

[۴۵] -سایت مرکز پژوهش رازی، [http://www.razi-center.net/farsi/XRfandXRD\\_testing.aspx](http://www.razi-center.net/farsi/XRfandXRD_testing.aspx)

<http://www.binaloud.com/fa/pages.cshtml?id>، سایت بینالود

[۴۶] -سایت بینالود، <http://www.binaloud.com/fa/pages.cshtml?id>،

[۴۷] -/استاندارد شماره ۲۷۰، (۱۳۷۵) "آهک ساختمان"، موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی

ایران، چاپ ۷.

[۴۸] -/ارزیابی ظرفیت باربری و تعیین پارامترهای مقاومتی خاک رس اصلاح شده با میکروسیلیس به

همراه آهک. اوصیا معلم، سید مسعود، معتقدی، حسین، صدراپی، سید امیر، (۱۳۹۳)، اولین

کنفرانس ملی مکانیک خاک و مهندسی پی مهندسی عمران، تهران، دانشگاه پیام نور استان آذربایجان

شرقی - هریس).

[۴۹]. مزینانیا، محمدعلی، (۱۳۹۴)، "ارزیابی پارامترهای مقاومت برشی خاک رس اصلاح شده با آهک

ونانو سیلیس" پایان نامه کارشناسی ارشد.





## **Abstract**

appropriate corrective parameters for soil degradation and the need to research the type of clay is determined. In this study the effect of adding different percentages of nano clay and limestone to clay and clay soil shear strength parameters to be assessed by direct shear tests universe setting've been testing this end, the identification and classification, physical and mechanical properties of soil, direct shear tests on limestone soil with different percentages of 1 to 3 percent and then 1 to 4 percent clay and limestone the results show improved shear strength parameters modified by nano-clay composed of clay and limestone.

**Key words:** nano-clay, shear strength parameters, straight cut, soil improvement



Shahrood University of Technology

Faculty of Kharazmi's Pardis

**Msc Thesis in Civil Engineering Group**

**The Evaluation Effect of Nano Clay on the Properties of  
Plasticity and Shear Strength of Clay Soil Modified with Lime**

By: MEHDI ARAB ALI MOHAMADI

Supervisor:

Dr. Seyed Mahdi Hosseini

September 2016