

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران
رشته مهندسی عمران گرایش ژئوتکنیک
پایان نامه کارشناسی ارشد

اثر انرژی تراکم بر تنش پیش تحکیمی خاک رسی

نگارنده : حسن اعتراف

استاد راهنما

دکتر سید مهدی حسینی

شهریور ۱۳۹۵

فرم شماره ۷: صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای حسن اعتراف به شماره دانشجویی ۹۳۰۲۶۷۴، رشته عمران گرایش ژئوتکنیک تحت عنوان: اثر انرژی تراکم بر تنش پیش تحکیمی خاک رسی که در تاریخ ۹۵/۶/۱۵ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه : <u>خوب</u> امتیاز : <u>۱۷/۶۸</u>) ☒	دفاع مجدد ☐	مردود ☐
نوع تحقیق: نظری ☐ عملی ☒		

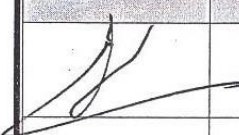
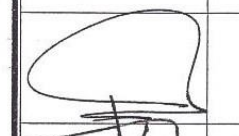
۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

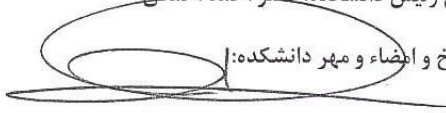
۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر سید مهدی حسینی	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم			
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر پویان برومند	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر امیر بذرافشان مقدم	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر رمضان واقعی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر احمد احمدی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده: 

تقدیم به:

پدر و مادر عزیزم که در تمامی مراحل زندگی پشتیبان همیشگی ام بوده اند

و همسر مهربانم که با محبت و همدلی در انجام این امر مهم همراهی ام کرد

تقدیر و شکر:

حد و پاس یکتای بی همتا که لطف بر ماعیان است، ادای شکرش رانچ زبان و دیای فحلش رانچ کران نیست و اگر در این وادی هستیم، همه محبت اوست. الهی ای مهربانتر از ما، از تومی خواهیم همه کسانی را که حتی ذره ای در انجام این امر مریاری نموده اند، در سایه لطف و محبت بی کرانت، سلامت، شاد کام و موفق بدار.

وظیفی خود می دانم از تلاش و زحمات بی دریغ و راهبانی های ارزنده استاد کرانقدر و دلسوزم، جناب آقای دکتر سید مهدی حسینی، در تمام مراحل انجام این پایان نامه صمیمانه تقدیر و شکر نمایم و از خداوند متعال برای ایشان زندگی سرشار از موفقیت آرزو مندم.

از برادر عزیزم که همواره در تمام مراحل زندگی و خصوصاً در انجام این امر مهم مایه دلگرمی من بودند صمیمانه تقدیر و شکر می کنم و برایش توفیق روز افزون در زندگی را آرزو مندم.

از دوست و بھار عزیزم جناب آقای مهندس فرامر زبھادر که در تمام مراحل کارهای آزمایشگاهی مریاری کردند تقدیر و شکر می نمایم.

از دوستان عزیزم آقایان امیر مصلایی و حسن زارع که در تمام مسیر انجام این کار در کنار من بودند شکر و قدردانی می نمایم.

در آخر از همه کسانی که گامی موثر در انجام این اثر برداشتند تقدیر و شکر می نمایم.

تعهد نامه

اینجانب **حسن اعتراف** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته عمران - ژئوتکنیک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه اثر انرژی تراکم بر تنش پیش تحکیمی خاک رسی تحت راهنمایی 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 ۱۳۹۵/۶/۱۵

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها 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

بررسی و شناخت ارتباط مشخصه‌های مختلف در خاک‌ها در شرایط امروزی ضروری است. یکی از پارامترهای مهم در مکانیک خاک تنش پیش‌تحکیمی، یعنی بزرگترین تنش که در گذشته به خاک وارد شده است، می‌باشد. همچنین یکی از فرآیندهای اصلی در صنعت ساخت و ساز، تراکم خاک است. موضوع ما در این پژوهش بررسی اثر انرژی تراکم بر تنش پیش‌تحکیمی خاک‌های رسی است. خاک مورد آزمایش ما متعلق به روستای سعدآباد واقع در حومه شهرستان شاهرود بوده است. در ابتدا بر روی خاک، عملیات تراکم با ۵ انرژی متفاوت انجام شد. و برای هر یک رطوبت بهینه و دانسیته خشک حداکثر به دست آمد. دوباره خاک‌ها در رطوبت بهینه به دست آمده و با انرژی‌های مربوطه متراکم شدند. از هر عملیات تراکم دو نمونه مناسب تهیه شد و در دستگاه تحکیم جهت انجام آزمایش تحکیم قرار گرفت. در انتها پارامترهای ضریب تغییر حجم، شاخص فشردگی، ضریب تحکیم و تنش پیش‌تحکیمی به دست آمده از آزمایش‌ها مورد بررسی قرار گرفت. برای به دست آوردن تنش پیش‌تحکیمی از آزمایش، دو روش کاساگرانده و سیلوا مورد استفاده قرار گرفت که نتایج حاصل از آنها مورد مقایسه قرار گرفتند. یافت شد که با افزایش انرژی تراکم مقدار تنش پیش‌تحکیمی به دست آمده از هر دو روش افزایش پیدا کرده که این میزان به صورت تابع غیر خطی بوده است. همچنین روش سیلوا مقادیر تنش کمتری را نسبت به روش کاساگرانده نشان داده است.

کلمات کلیدی: انرژی تراکم، تنش پیش‌تحکیمی، تحکیم، سیلوا، کاساگرانده

عنوان	صفحه
۱- فصل اول: مقدمه.....	۱
۱-۱ کلیات	۲
۱-۲ ضرورت و اهداف پژوهش	۲
۱-۳ ساختار پایان نامه	۳
۲- فصل دوم: مروری بر مطالعات گذشته	۵
۲-۱ مقدمه	۶
۲-۲ روشهای محاسبه ی تنش پیش تحکیمی از منحنی	۸
۲-۳ تاثیر میزان رطوبت بر افزایش تنش پیش تحکیمی	۹
۲-۴ انرژی تراکم	۱۱
۲-۵ تعیین پوش گسیختگی موهر -کولمب	۱۲
۲-۶ تعیین نسبت پیش تحکیمی (OCR)	۱۸
۲-۷ سایر مقالات	۲۰
۲-۸ مقالات خارجی	۲۵
۲-۹ روش آزمایش شاخص در تخمین تاثیر تنش پیش تحکیمی در رس ها	۲۹
۲-۱۰ ارزیابی فشار پیش تحکیمی در رس های اشباع دست نخورده	۳۰
۳- فصل سوم: نحوه انجام آزمایش ها و نتایج شناسایی خاک	۳۳
۳-۱ مقدمه	۳۴
۳-۲ محل و نحوه نمونه گیری	۳۴
۳-۳ آزمایشهای اولیه برای شناسایی خاک	۳۴
۳-۳-۱ چگالی نسبی دانه های جامد خاک (Gs)	۳۴

۳۶.....	۳-۳-۲ آزمایشهای دانه‌بندی و هیدرومتری
۳۷.....	۳-۳-۳ حدود اتربرگ
۳۸	۳-۳-۴ آزمایش تعیین درصد رطوبت طبیعی
۳۹.....	۳-۴ آزمایش تراکم
۴۰.....	۳-۴-۱ دستگاه آزمایش تراکم
۴۱.....	۳-۴-۲ آزمایش تراکم پروکتور استاندارد
۴۲.....	۳-۴-۳ آزمایش تراکم پروکتور اصلاح شده
۴۳.....	۳-۴-۴ انرژی های انتخاب شده برای تراکم نمونه‌ها
۴۳.....	۳-۵ آزمایش تحکیم
۴۵.....	۳-۵-۱ روش محاسبه تنش پیش‌تحکیمی
۴۵.....	۳-۵-۱-۱ روش کاساگرانده (۱۹۳۶)
۴۶	۳-۵-۱-۲ روش سیلوا (۱۹۷۰)
۴۷.....	۳-۵-۱-۳ مقایسه دو روش
۴۷.....	۳-۶ نتیجه‌گیری
۴۹.....	۴- فصل چهارم: تحلیل نتایج
۵۰	۴-۱ مقدمه
۵۰	۴-۲ محاسبه انرژی تراکم
۵۲.....	۴-۳ نتایج حاصل از آزمایش تراکم در انرژی های مختلف
۵۵.....	۴-۴ تحکیم
۵۵.....	۴-۴-۱ نمونه‌گیری صحیح
۵۵.....	۴-۴-۲ نتایج حاصل از آزمایش تحکیم
۵۸.....	۴-۵ تعیین تنش پیش‌تحکیمی به روش کاساگرانده و نتایج آزمایش

۵۸.....	۴-۵-۱ محاسبه نتایج.....
۶۲.....	۴-۶ تنش پیش تحکیمی به روش سیلوا و نتایج آزمایش.....
۶۲.....	۴-۶-۱ محاسبه نتایج.....
۶۵.....	۴-۷ مقایسه نتایج تنش پیش تحکیمی به دست آمده از دو روش.....
۶۶.....	۴-۸ پارامترهای جانبی حاصل از آزمایش تحکیم.....
۶۶.....	۴-۸-۱ بررسی پارامتر mv
۷۰.....	۴-۸-۲ بررسی پارامتر cv
۷۳.....	۴-۸-۳ بررسی پارامتر cc
۷۵.....	۵- فصل پنجم: نتایج و پیشنهادها.....
۷۶.....	۵-۱ مقدمه.....
۷۶.....	۵-۲ نتایج حاصل از منحنی های تراکم.....
۷۷.....	۵-۳ بررسی پارامتر نشانه فشردگی c_c (شاخص تراکم پذیری).....
۷۸.....	۵-۴ بررسی پارامتر ضریب تغییر حجم (mv).....
۷۹.....	۵-۵ بررسی پارامتر ضریب تحکیم (cv).....
۸۰.....	۵-۶ نتایج حاصل از تعیین تنش پیش تحکیمی به روش کاساگرانده.....
۸۱.....	۵-۷ نتایج حاصل از تعیین تنش پیش تحکیمی به روش سیلوا.....
۸۲.....	۵-۸ مقایسه مقادیر تنش پیش تحکیمی به دست آمده از روش سیلوا و کاساگرانده.....
۸۲.....	۵-۹ نتیجه گیری.....
۸۳.....	۵-۱۰ مطالعات آینده.....
۸۴.....	منابع.....

ب- فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۲-۱. نمودار لگاریتم تنش - کرنش	۷
شکل ۲-۲. نمودار تغییرات تنش پیش تراکمی با رطوبت خاک.	۱۰
شکل ۲-۳. منحنی تراکم برای انواع خاک با استفاده از آزمایش تراکم پراکتور اصلاح شده	۱۱
شکل ۲-۴. پوش گسیختگی پیش تحکیمی یافته موهر-کولب مخلوط ماسه	۱۴
نمودار (۲-۵). فشار در مقابل حجم مخصوص نمونه‌ها	۱۵
شکل ۲-۶. مدل فردلند-ایگزینگ	۱۹
شکل ۲-۷. مدل ون گنشتاین	۲۰
شکل ۲-۸. رابطه تنش پیش تراکمی و مقاومت برشی با روش کاساگرانده و الکساندر ارل	۲۲
شکل ۲-۹. منحنی تغییرات تنش پیش تحکیمی و ضریب فشردگی نمونه‌های بهسازی شده	۲۴
شکل ۲-۱۰. ارتباط بین انرژی تراکم و رسانایی هیدرولیکی	۲۵
شکل ۲-۱۱. تعیین تنش پیش تحکیمی به کمک روش سیلوا	۲۷
شکل ۲-۱۲. نمودار اشمرتمن در پیش بینی نمونه‌های دست نخورده	۳۱
شکل ۳-۱. پیکنومتر مورد استفاده برای آزمایش تعیین درصد چگالی دانه‌های جامد	۳۵
شکل ۳-۲. نمودار دانه‌بندی از آزمایش الک تر و هیدرومتری	۳۶
شکل ۳-۳. الف) روش فیتیله برای آزمون حد خمیری ب) جام کاساگرانده برای آزمون حد روانی	۳۸
شکل ۳-۴. دستگاه چکش برقی اتوماتیک	۴۱
شکل ۳-۵. دستگاه تحکیم مورد استفاده در آزمایش تحکیم یک بعدی	۴۴
شکل ۳-۶. محاسبه تنش پیش تحکیمی به روش کاساگرانده	۴۶
شکل ۳-۷. محاسبه تنش پیش تحکیمی به روش سیلوا	۴۷
شکل ۴-۱. نمودار آزمایش تراکم خاک با انرژی 312 kN.m/m^3	۵۲

- شکل ۴-۲. نمودار آزمایش تراکم خاک با انرژی 600 kN.m/m^3 ۵۳
- شکل ۴-۳. نمودار آزمایش تراکم با انرژی 1620 kN.m/m^3 ۵۳
- شکل ۴-۴. نمودار آزمایش تراکم با انرژی 2700 kN.m/m^3 ۵۴
- شکل ۴-۵. نمودار آزمایش تراکم با انرژی 4320 kN.m/m^3 ۵۴
- شکل ۴-۶. نمودار تحکیم به دست آمده از نمونه متراکم شده با انرژی 312 kN.m/m^3 ۵۶
- شکل ۴-۷. نمودار تحکیم به دست آمده از نمونه متراکم شده با انرژی 600 kN.m/m^3 ۵۶
- شکل ۴-۸. نمودار تحکیم به دست آمده از نمونه متراکم شده با انرژی 1620 kN.m/m^3 ۵۷
- شکل ۴-۹. نمودار تحکیم به دست آمده از نمونه متراکم شده با انرژی 2700 kN.m/m^3 ۵۷
- شکل ۴-۱۰. نمودار تحکیم به دست آمده از نمونه متراکم شده با انرژی 4320 kN.m/m^3 ۵۸
- شکل ۴-۱۱. تعیین تنش پیش تحکیمی به روش کاساگرانده از نمودار تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی 312 kN.m/m^3 ۵۹
- شکل ۴-۱۲. تعیین تنش پیش تحکیمی به روش کاساگرانده از نمودار تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی 600 kN.m/m^3 ۵۹
- شکل ۴-۱۳. تعیین تنش پیش تحکیمی به روش کاساگرانده از نمودار تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی 1620 kN.m/m^3 ۶۰
- شکل ۴-۱۴. تعیین تنش پیش تحکیمی به روش کاساگرانده از نمودار تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی 2700 kN.m/m^3 ۶۰
- شکل ۴-۱۵. تعیین تنش پیش تحکیمی به روش کاساگرانده از نمودار تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی 4320 kN.m/m^3 ۶۱
- شکل ۴-۱۶. تعیین تنش پیش تحکیمی به روش سیلوا از نمودار تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی 312 kN.m/m^3 ۶۲
- شکل ۴-۱۷. تعیین تنش پیش تحکیمی به روش سیلوا از نمودار تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی 600 kN.m/m^3 ۶۳
- شکل ۴-۱۸. تعیین تنش پیش تحکیمی به روش سیلوا از نمودار تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی 1620 kN.m/m^3 ۶۳

- شکل ۴-۱۹. تعیین تنش پیش‌تحکیمی به روش سیلوا از نمودار تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی ۶۴..... ۲۷۰۰ kN.m/m³
- شکل ۴-۲۰. تعیین تنش پیش‌تحکیمی به روش سیلوا از نمودار تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی ۶۴..... ۴۳۲۰ kN.m/m³
- شکل ۴-۲۱. تنش پیش‌تحکیمی به دست آمده از هر نمونه به دو روش کاساگرانده و سیلوا..... ۶۵
- شکل ۴-۲۲. نمودار ضریب تغییر حجم به دست آمده از آزمایش تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی ۶۷..... ۳۱۲ KN.m/m³
- شکل ۴-۲۳. نمودار ضریب تغییر حجم به دست آمده از آزمایش تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی ۶۷..... ۶۰۰ KN.m/m³
- شکل ۴-۲۴. نمودار ضریب تغییر حجم به دست آمده از آزمایش تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی ۶۸..... ۱۶۲۰ KN.m/m³
- شکل ۴-۲۵. نمودار ضریب تغییر حجم به دست آمده از آزمایش تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی ۶۸..... ۲۷۰۰ KN.m/m³
- شکل ۴-۲۶. نمودار ضریب تغییر حجم به دست آمده از آزمایش تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی ۶۹..... ۴۳۲۰ KN.m/m³
- شکل ۴-۲۷. مقایسه ضریب های تغییر حجم به دست آمده از آزمایش تحکیم..... ۶۹
- شکل ۴-۲۸. ضریب تحکیم به دست آمده از آزمایش تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی ۷۰..... ۳۱۲ KN.m/m³
- شکل ۴-۲۹. ضریب تحکیم به دست آمده از آزمایش تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی ۷۱..... ۶۰۰ KN.m/m³
- شکل ۴-۳۰. ضریب تحکیم به دست آمده از آزمایش تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی ۷۱..... ۱۶۲۰ KN.m/m³
- شکل ۴-۳۱. ضریب تحکیم به دست آمده از آزمایش تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی ۷۲..... ۲۷۰۰ KN.m/m³
- شکل ۴-۳۲. ضریب تحکیم به دست آمده از آزمایش تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی ۷۲..... ۴۳۲۰ KN.m/m³

- شکل ۴-۳۳. مقایسه ضریب تحکیم های به دست آمده از آزمایش تحکیم ۷۳
- شکل ۴-۳۴. مقایسه مقادیر C_c به دست آمده از آزمایش تحکیم ۷۴
- شکل ۵-۱. نتایج حاصل از آزمایش های تراکم در انرژی های مختلف ۷۶
- شکل ۵-۲. روند نزولی C_c با افزایش انرژی تراکم ۷۷
- شکل ۵-۳. تغییرات پارامتر ضریب تغییر حجم ۷۸
- شکل ۵-۴. شکل ۴-۳۲ مقایسه ضریب تحکیم های به دست آمده ۷۹
- شکل ۵-۵. تنش های پیش تحکیمی به دست آمده به روش کاساگرانده ۸۰
- شکل ۵-۶. تنش های پیش تحکیمی به دست آمده به روش سیلوا ۸۱

ج- فهرست جدول‌ها

صفحه

عنوان

جدول ۱-۲. تنش پیش تراکمی در رطوبت های مختلف	۱۰
جدول ۱-۳. نتایج آزمایش چگالی نسبی دانه‌های جامد خاک	۳۵
جدول ۲-۳. اطلاعات حد روانی و خمیری	۳۷
جدول ۳-۳. نتایج حدود ات‌برگ	۳۸
جدول ۴-۳. تعیین درصد رطوبت خاک	۳۹
جدول ۱-۴. انرژی تراکم های مختلف مورد آزمایش	۵۱
جدول ۲-۴. مقادیر رطوبت بهینه و دانسیته خشک حداکثر به دست آمده از آزمایش تراکم	۵۵
جدول ۳-۴. تنش های پیش تحکیمی به دست آمده به روش کاساگرانده	۶۱
جدول ۴-۴. تنش های پیش تحکیمی به دست آمده به روش سیلوا	۶۵
جدول ۵-۴. داده‌های مربوط به مقادیر mv در پنج آزمایش مختلف	۶۶
جدول ۶-۴. نمودار مربوط به داده‌های cv در آزمایش‌های مختلف	۷۰
جدول ۷-۴. مقادیر cc به دست آمده از آزمایش تحکیم برای هر ۵ نمونه	۷۳
جدول ۱-۵. مقادیر cc به دست آمده از آزمایش تحکیم برای هر ۵ نمونه	۷۷

فصل اول

مقدمه

۱-۱ کلیات

عدم شناخت از ویژگی‌های خاک باعث می‌شود که گاهی برای رسیدن به شرایط مناسب، هزینه‌های گزافی و اضافه‌ای را متحمل شویم. یکی از پارامترهای مهم در مکانیک خاک تنش پیش‌تحکیمی، یعنی بزرگترین تنش که در گذشته به خاک وارد شده است، می‌باشد. از مرسوم‌ترین خاکهای موجود در سطح زمین می‌توان به خاک رسی اشاره کرد که در صنعت ساخت و ساز با آن روبرو هستیم. یکی از فرآیندهای مهم ژئوتکنیکی که در بسیاری از پروژه‌های عمرانی از آن استفاده می‌شود عملیات تراکم می‌باشد. بررسی و شناخت ارتباط مشخصه‌های مختلف در خاک‌ها در شرایط امروزی ضروری است.

۱-۲ ضرورت و اهداف پژوهش

تراکم خاک مبحث مهمی در مکانیک خاک و مهندسی ژئوتکنیک می‌باشد. آشکار است که خاک پارامتر مهمی در ساخت و ساز می‌باشد، چرا که لازم است برای تامین هدف پروژه، شرایط فعلی خاک محل اجرا مورد ارزیابی قرار گیرد. به طور کلی تراکم خاک فرآیند بالا بردن دانسیته خاک می‌باشد که با خروج هوای موجود در میان ذرات خاک و دستیابی به مقاومت هدف همراه خواهد بود. ولی تحکیم فرآیندی است که طی آن میزان آب موجود در خاک اشباع کاهش می‌یابد بدون آنکه هوا جایگزین آب گردد. بنابراین تراکم خاک فرآیندی است که می‌تواند به صورت طبیعی و یا با تکنیک‌های مکانیکی و مصنوعی حاصل شود. در فرآیند طبیعی تراکم، نیروهای مکانیکی اعمال شده از سوی ماشین آلات دخالتی نداشته و خاک توسط نیروهای طبیعی اعم از تردد حیوانات و انسان‌ها، فشار لایه‌های خاک بالایی، تبخیر آب موجود بین ذرات خاک و دیگر آثار طبیعی در طول زمان متراکم می‌شود. به طور کلی خاک محلی که برای یک پروژه

عمرانی انتخاب می‌شود می‌بایست، مقاومت کافی داشته، به طور نسبی غیر قابل تراکم باشد تا نشست‌های احتمالی در آینده اتفاق نیافتد، در برابر تغییر حجم پایدار باشد و در برابر حملات شیمیایی دوام داشته و نفوذپذیری مناسبی داشته باشد. خاک زیر پی یک سازه، زیر روسازی جاده، سد، نیروگاه، تونل‌ها و ... می‌بایست پیش از احداث پروژه متراکم گردد. بررسی اینکه تراکم چه به صورت طبیعی و چه به وسیله ماشین‌آلات بر روی پارامترهای مشخصه خاک چه تأثیراتی ممکن است داشته باشد امری ضروری است. یکی از پارامترهای اصلی و پر کاربرد در مکانیک خاک ضریب پیش‌تحکیم‌یافتگی می‌باشد. ضریب پیش‌تحکیم‌یافتگی یا (OCR) برابر است با نسبت بزرگترین تنش مؤثری که خاک در گذشته تجربه کرده است به تنش مؤثری که هم‌اکنون تحمل می‌کند. دلیل اهمیت این ضریب در دو مطلب است. یکم، چون میزان فشردگی خاک در حالت عادی تحکیم یافته خیلی بیشتر از فشردگی آن در حالت پیش‌تحکیم یافته است و دوم اینکه رفتار برشی خاک‌های رسی با توجه به معیارهایی که در مکانیک خاک تعریف شده است، وابسته به ضریب پیش‌تحکیم‌یافتگی آن‌ها است. خاک‌های پیش‌تحکیم یافته با تنش‌های بزرگ بیشتر تمایل به افزایش حجم دارند در حالی که خاک‌های عادی تحکیم یافته بیشتر تمایل به کاهش حجم و انقباض دارند. از آنجا که این ضریب به تنش پیش‌تحکیمی وابسته است، لذا ما در این پژوهش به بررسی اثر انرژی تراکم به تنش پیش‌تحکیمی در خاک‌های رسی پرداختیم.

۳-۱ ساختار پایان‌نامه

در این پژوهش ابتدا و در فصل دوم به بررسی متون فنی گذشته پرداخته و پس از تعاریف جامعی از تراکم، انرژی تراکم، تحکیم، و تنش پیش‌تحکیمی و همچنین نسبت پیش‌تحکیمی، پوش گسیختگی مور کولمب بیان شده و در ادامه مقالات داخلی و مقالات خارجی مرتبط با موضوع بیان شده است.

در فصل سوم نیز ابتدا به بیان آزمایش‌های شناسایی مشخصات خاک از قبیل چگالی دانه‌های جامد خاک، دانه‌بندی و هیدرومتری، تعیین حدود اتربرگ و درصد رطوبت پرداخته شده و سپس آزمایش‌های اصلی مورد نظر پژوهش شامل تراکم و تحکیم توضیح داده شد. در انتهای فصل نیز روش‌های کاساگرانده و سیلوا برای به دست آوردن تنش پیش‌تحکیمی از روی نمودار تحکیم شرح داده شده است.

در فصل چهارم به شرح آزمایشات پرداخته شده و نتایج و نمودارهای حاصل از آزمایشات تراکم و تحکیم تحت انرژی‌های مختلف بیان شده و در نهایت در فصل پنجم نیز علاوه بر نتیجه‌گیری از نتایج فوق به بیان پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی نیز پرداخته شده است.

فصل دوم

مروری بر مطالعات گذشته

تراکم خاک به عنوان مشکلی جهانی و فرآیندی پیچیده و چند بعدی شامل تاثیر متقابل خاک- ماشین- گیاه- اقلیم شناخته می شود که دارای آثار قابل توجه اقتصادی و زیست محیطی باشد. در طبیعت معمولاً خاک ها تحت اثر وزنشان، بارهای خارجی و یا داخلی (حاصل از نیروهای مکش آب خاک) دچار کاهش حجم می شوند. اگر این کاهش حجم به دلیل کاهش حفره های هوا در خاک باشد، در این حالت فرآیند تراکم اتفاق می افتد. تعیین درجه تراکم پذیری خاک، نیازمند تعیین شاخصی برای نشان دادن میزان تغییر در ویژگی های خاک است. [۱]

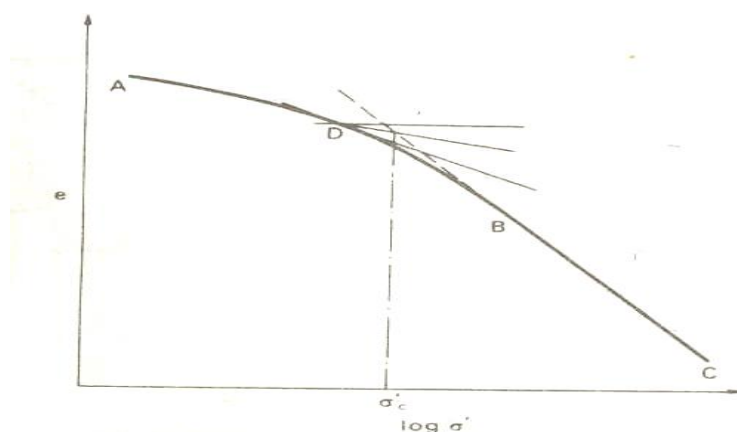
یکی از این شاخص های مهم، تنش پیش- تراکمی می باشد که اغلب به عنوان معیاری برای تراکم پذیری خاک استفاده می شود. مفهوم تنش پیش تراکمی (σ_p) اولین بار توسط کاساگران^۱ برای خاک اشباع تحکیم یافته تعریف شد.

تنش پیش تراکمی به عنوان حداکثر تنشی که خاک می تواند تحمل کند بدون اینکه ساختار فیزیکی آن دچار آسیب شود، تعریف شده است. این تنش به عنوان معیاری جهت پایدار نگه داشتن ساختمان خاک در برابر نیروهای داخلی و خارجی مورد استفاده قرار می گیرد.

اولین بار کاساگران روشی برای یافتن حداکثر فشار گذشته پیشنهاد کرد که از روی منحنی نسبت پوکی- لگاریتم تنش تعیین می شود. با توجه به شکل ۱-۲ چنانچه از نقطه D (نقطه ای که در آن انحنا منحنی لگاریتم تنش- کرنش حداکثر می باشد)،

¹- Casagrand

مماسی بر منحنی رسم کرده و نیمساز زاویه بین این مماس و خط افقی مار بر D ترسیم گردد، نقطه برخورد این نیمساز با امتداد مستقیم الخط نمودار نشان دهنده حداکثر فشار موثری است که در گذشته بر خاک وارد آمده است که آن را فشار پیش تحکیمی (σ_p) می نامند. به σ_p در شرایط خاک های غیر اشباع تنش پیش - فشردگی یا پیش تراکمی گفته می شود. امروزه روش های دیگری همچون تقاطع خط فشردگی بکر (VCL) با محور X ها در نقطه کرنش صفر و یا تنش خاک در کرنش از قبل تعیین شده ($\epsilon/5$ درصد کرنش) جهت تعیین تنش پیش تراکمی استفاده می شود.



شکل ۲-۱. نمودار لگاریتم تنش - کرنش

از عوامل تاثیر گذار بر تراکم پذیری خاک ها، رطوبت، میزان مواد آلی، آهک، بافت خاک و زمان (سخت شدگی) می باشند.

۲-۲ روش‌های محاسبه‌ی تنش پیش‌تحکیمی از منحنی

σ_p از منحنی تحکیم (نسبت نسبت پوکی در مقابل لگاریتم تنش عمودی) توسط آزمایش‌هایی مانند مانند PST^1 و CCT^2 و ادومتر^۳ بدست می‌آید. فراسنجه‌هایی که برای مدلسازی تراکم پذیری خاک استفاده می‌شوند معمولاً از آزمایش‌های CCT و PST بدست می‌آیند. در روش ادومتر، بارگذاری مرحله‌ای با فواصل زمانی طولانی برای تعیین تنش پیش‌تراکمی خاک‌های اشباع و غیر اشباع استفاده می‌گردد. در این آزمایش، مرحله بعد بارگذاری زمانی صورت می‌گیرد که کاهش در حجم نمونه حاصل از مرحله بارگذاری قبلی پایدار شده باشد. پس از گذشت زمان مناسب (در خاک‌های کشاورزی، بعد از ۴۵ دقیقه نشست نمونه تحت بار، ثابت گردیده که بیانگر آماده بودن نمونه برای بارگذاری بعدی می‌باشد)، بار یا تنش قائم به مقدار مشخصی افزایش یافته و در نهایت در تنش‌های حدود ۳ یا ۴ برابر، آزمایش متوقف می‌شود.

CCT یک روش جهت تعیین رفتار خاک تحت σ_1 (تنش اصلی) در شرایط غیر زهکشی می‌باشد و زمانی که خروج هوا پایان یابد و خاک اشباع شود آزمایش متوقف می‌شود. در آزمایش CCT خاک در درون یک سیلندر صلب توسط یک پیستون متحرک به سمت پایین متراکم می‌شود و بار روی پیستون و تغییر حجم خاک بطور پیوسته ثبت می‌شود.

¹ Plate sinkage test

²-Confined compression test

³- Oedometer

الکساندرو و ارل اولین بار روش PST (آزمایش نیمه محصورشده) را جهت تخمین σ_p استفاده کردند [۲]. در این آزمایش بر یک صفحه روی سطح خاک بارگذاری قائم صورت گرفته و منحنی بار - نشست ترسیم می گردد که چگونگی رفتار خاک در مقابل تنش را نشان می دهد.

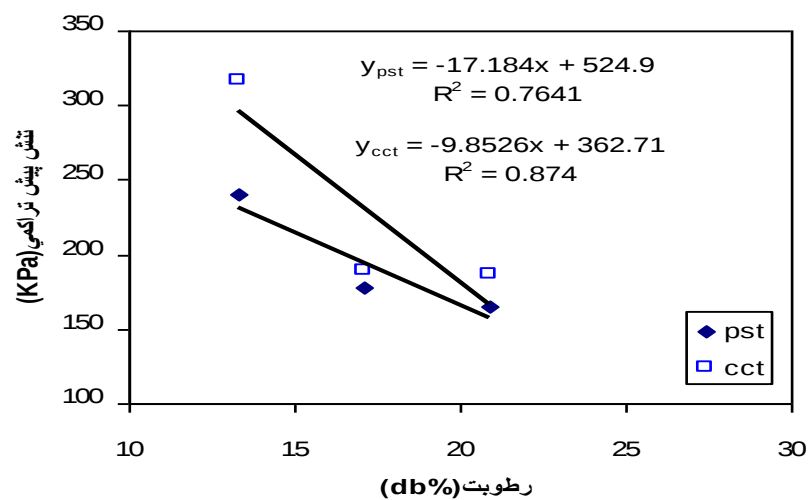
۲-۳ تاثیر میزان رطوبت بر افزایش تنش پیش تحکیمی

کانیلاس و سالوخه (۲۰۰۱) بیان کردند که تنش پیش تحکیمی در رطوبت های پایین بیشتر بوده و علت این افزایش تنش در رطوبت های پایین (۱۳٪/۳)، بزرگتر شدن نیروی چسبندگی بین ذرات است [۳]. در رطوبت های نزدیک به رطوبت PL ، آب بین ذرات مانند یک روان کننده عمل کرده، بنابراین نیروی اصطکاک بین ذرات را کاهش داده و حرکت ذرات را نسبت به هم بیشتر نموده و در نتیجه تراکم را افزایش می دهد.

ناهید عقیلی ناطق و همکاران [۴] نیز نمودار زیر را در مورد رابطه ی رطوبت با تنش پیش تحکیمی به کمک دو روش CCT و PST انجام داده و جدول (۲-۱) و نمودار (۲-۲) را ارائه کردند.

جدول ۲-۱. تنش پیش تراکمی در رطوبت های مختلف

تنش پیش تراکمی (kPa)		درصد وزنی رطوبت خاک
PST	CCT	
۳۱۷	۲۴۰	۱۳/۳
۲۰۵	۱۷۸	۱۷/۱
۷۱۸	۱۶۵	۲۰/۹

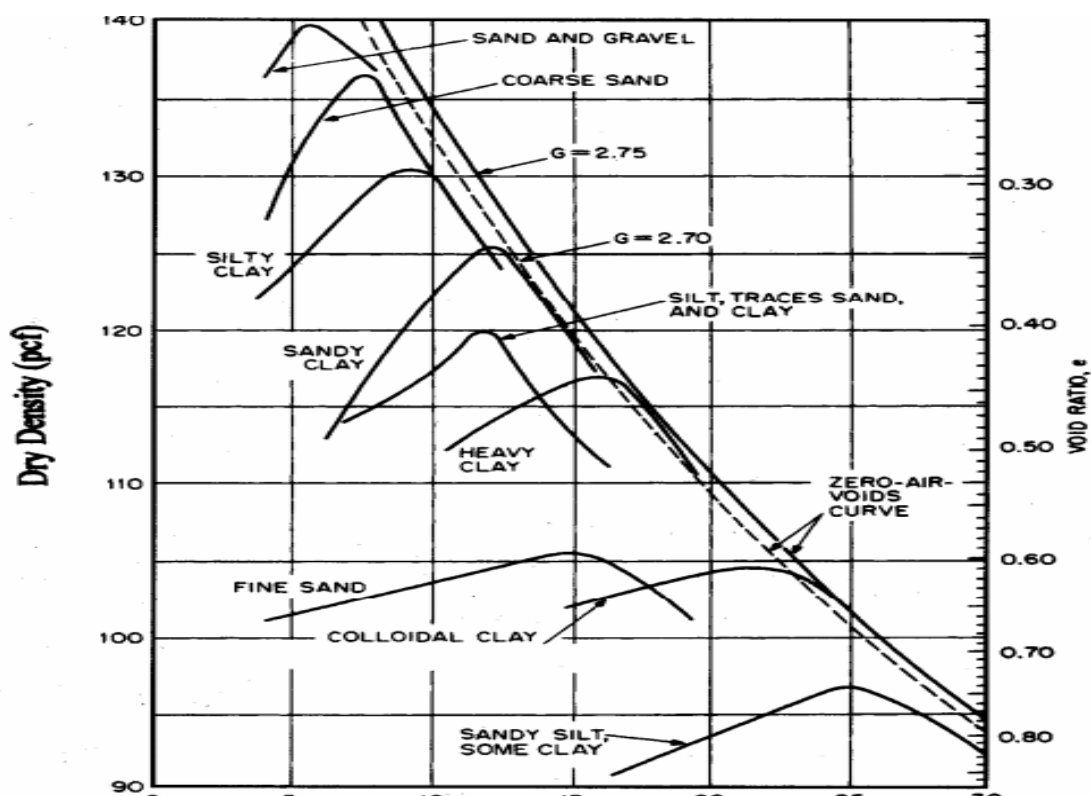


شکل ۲-۲. نمودار تغییرات تنش پیش تراکمی با رطوبت خاک.

۴-۲ انرژی تراکم

انرژی تراکم در واقع میزان انرژی اعمالی به خاک است. معمولاً با افزایش تراکم، میزان تراکم افزایش می‌یابد. هرچند موارد استثنایی نیز مثل رس‌های اشباع وجود دارد که با افزایش انرژی تراکم نیز نمی‌توانند متراکم‌تر شوند.

خاک‌های خوب دانه‌بندی شده مثل ماسه‌ها و شنهای خوب دانه‌بندی شده، بیشترین وزن مخصوص خشک ماکزیمم و کمترین میزان رطوبت بهینه را دارند. از طرف دیگر نیز خاکهای ماسه‌ای نرم، لای‌ها و خاک‌های دارای رس زیاد، کمترین مقدار وزن مخصوص خشک ماکزیمم و بیشترین میزان رطوبت بهینه را دارند. در شکل ۳-۲ منحنی تراکم برای انواع خاک‌های مختلف قابل مشاهده است.



شکل ۳-۲. منحنی تراکم برای انواع خاک با استفاده از آزمایش تراکم پراکتور اصلاح شده

۲-۵ تعیین پوش گسیختگی موهر - کولمب

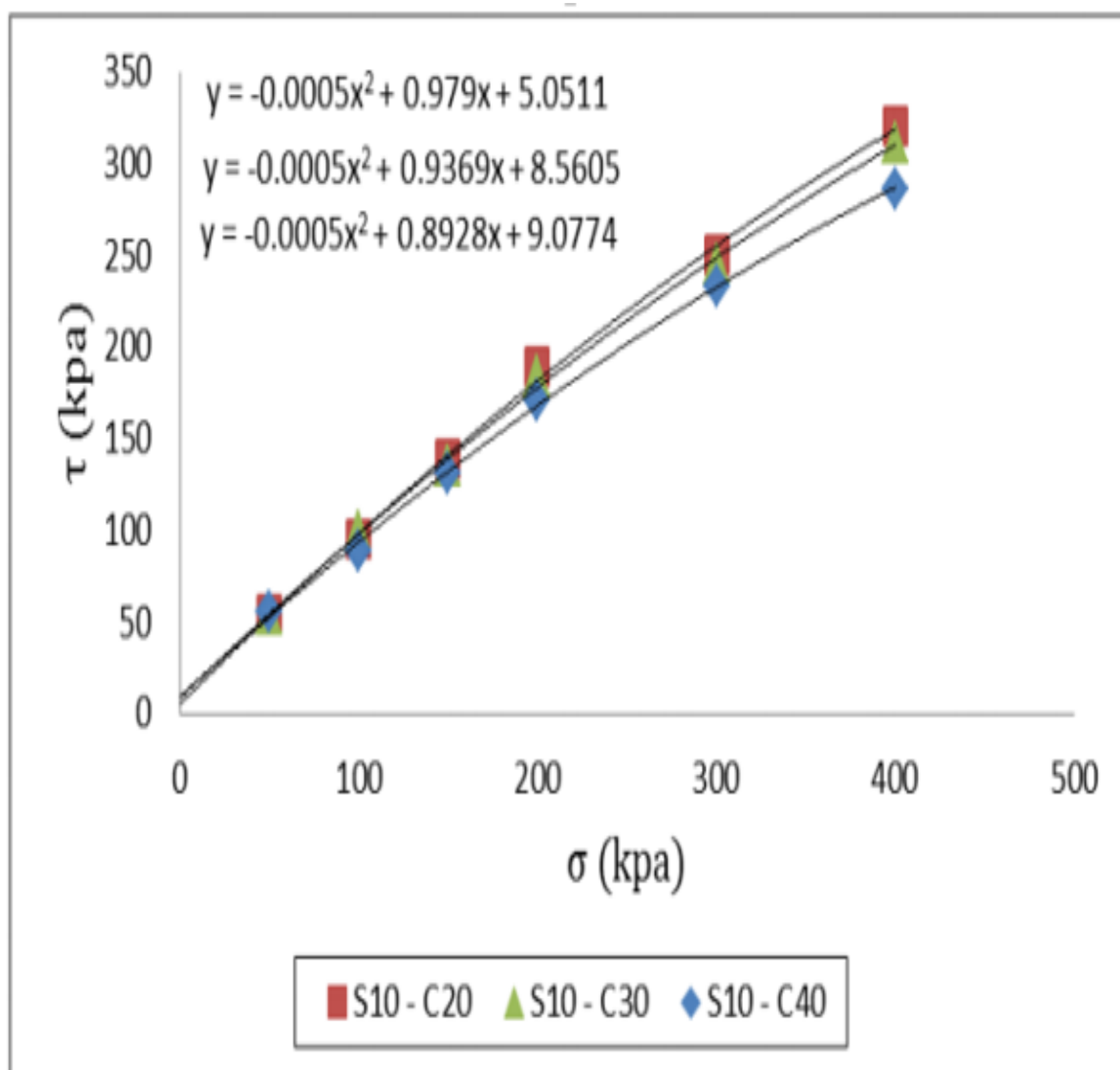
مقاومت برشی زهکشی نشده خاک رس پیش تحکیم یافته معمولاً باید بزرگتر از مقاومت برشی زهکشی شده خاک رس تحکیم یافته معمولی با ترکیبات یکسان باشد. عمدتاً به دلیل این که خاک رس پیش تحکیم یافته قبل از برش دارای نسبت تخلخل کمتری می باشد. از طرفی، مقاومت برشی زهکشی شده بسیج شده یا موجود خاکهای رسی بسیار پیش تحکیم یافته به شدت، تابع وضعیت آنها قبل از برش و زمانی که گسیخته میشوند، می باشد. بنابراین، اختلاف بین مقاومت برشی آنها، در وجود چسبندگی در خاک های پیش تحکیم یافته و نیز زاویه اصطکاک بزرگتر حالت پیش تحکیم یافته نسبت به حالت عادی تحکیم یافته است، به گونه ای که مقاومت برشی زهکشی شده خاک های چسبنده و عادی تحکیم یافته با زاویه اصطکاک φ' به صورت رابطه ۱-۲ تعریف شده است:

$$S = \sigma' \tan \varphi' \quad (1-2)$$

ولی در خاک های پیش تحکیم یافته، مقاومت برشی زهکشی شده در حالت اشباع عموماً بر اساس عرض از مبدأ (C') و زاویه اصطکاک (φ') به صورت رابطه ۲-۲ بیان می شود. کولمب (۱۷۷۲) با نظر به اینکه زاویه در معادله ۲-۲ مشابه زاویه اصطکاک در معادله ۱-۲ نمی باشد.

$$S = C' + \sigma' \tan \varphi'_{oc} \quad (2-2)$$

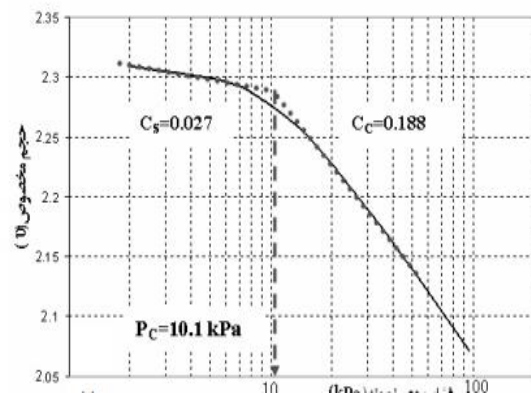
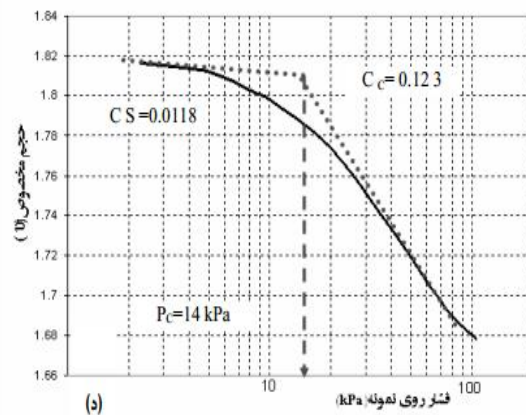
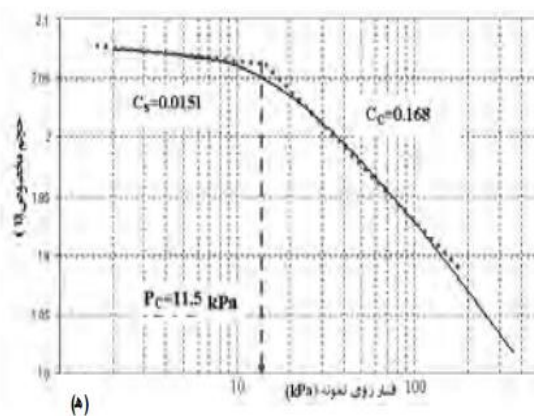
پس از استخراج مقاومت برشی حداکثر در هر تنش نرمال مؤثر از منحنی های تنش برشی - کرنش برشی و رسم نقاط مقاومت برشی حداکثر در برابر تنش نرمال مؤثر مربوطه در حالت پیش تحکیم یافته مطابق آنچه در شکل زیر آمده است، پوش گسیختگی حاصل شده است. پس از برآزش کردن مشخص گردید که برآزش یک منحنی از میان نقاط به دست آمده دارای ضریب همبستگی بالاتری نسبت به برآزش یک خط راست است، از طرفی چون فشار پیش تحکیمی نمونه های مخلوط ماسه - رس، ۱۶۰۰ کیلو پاسکال می باشد و تمام آزمایشات برش مستقیم بر روی نمونه های مذکور در محدوده تنش های مؤثری کمتر از فشار پیش تحکیمی آنها انجام شده است، لذا مشخص شده که پوش گسیختگی در تنش های نرمال کمتر از فشار پیش تحکیمی دارای انحنا می باشد. این انحنا در پوش گسیختگی به گونه ای است که در هر تنش نرمال مؤثر مقادیر ϕ' و C' متفاوتی را نشان می دهد و به دست آوردن مقادیر و از پوش گسیختگی پیش تحکیم یافته وابسته به محدوده تنش نرمال مؤثر می باشد.



شکل ۲-۴. پوش گسیختگی پیش‌تحکیمی یافته موهر-کولب مخلوط ماسه ۱۰-۲۰۰ در درصدهای مختلف

علی‌تابع بردبار و همکاران [۵] نیز در مقالشان به بررسی تاثیر افزودن فیبرهای طبیعی و مصنوعی بر روی پارامترهای تحکیمی خاک از جمله تنش پیش‌تحکیمی پرداخته و

با افزودن درصدهای مختلف وزنی فیبر و انجام آزمایشات تحکیم بیان کردند که افزایش مواد موجب کاهش فشارپیش تحکیمی و افزایش ضرایب تورم و فشردگی خاک گردیده و دامنه این تغییرات در خصوص فیبرهای طبیعی (در درصدهای وزنی یکسان) نسبت به فیبرهای مصنوعی بیشتر می‌باشد. آنها نمودارهای (۲-۵) را ارائه دادند.



نمودار ۲-۵. فشار در مقابل حجم مخصوص نمونه‌ها

در این نمودارها، فشار پیش‌تحکیمی از ادامه دادن دو بخش انتهایی منحنی که علاوه بر روش قراردادی کاساگرانده جهت تعیین فشار پیش‌تحکیمی، روش دیگری می‌باشد و نیز شیب قسمت الاستیک یا قسمت باربرداری CS یا نشانه تورم و قسمت پلاستیک یا قسمت منحنی بکر CC یا نشانه فشردگی به دست آمده است که برای هر نمونه بر روی نمودار مربوطه ارائه شده است. می‌توان نتیجه گرفت که مقدار فشارپیش‌تحکیمی در خاک رسی مسلح‌نشده ($PC=17kPa$) با افزودن فیبر طبیعی و مصنوعی کاهش می‌یابد. کاهش مقدار فشار پیش‌تحکیمی در خاکهای مسلح شده با فیبر طبیعی، بیشتر از مقدار کاهش این فشار در خاکهای مسلح‌شده با فیبر مصنوعی می‌باشد. کاهش فشار پیش‌تحکیمی به دلیل بیشتر بودن تخلخل یا کمتر بودن تراکم در نمونه خاکهای مسلح شده نسبت به نمونه خاک مسلح نشده بیشتر می‌باشد و این رفتار نیز مشخص است که با کاهش تراکم خاک، فشار پیش‌تحکیمی کاهش می‌یابد. مقدار فشار پیش‌تحکیمی برای خاکهای مسلح شده با نایلون نسبت به خاکهای مسلح شده با فیبر طبیعی خرما در درصدهای وزنی یکسان، به دلیل تخلخل کمتر نمونه‌های حاوی نایلون نسبت به افزودن فیبر طبیعی و مصنوعی به خاک غیرمسلح‌بیشتر می‌باشد. مقدار کاهش PC در خاکهای مسلح‌شده با فیبر طبیعی بیشتر از فیبر مصنوعی می‌باشد. خاکهای مسلح شده با فیبر طبیعی نسبت به خاکهای مسلح‌شده با فیبر مصنوعی مقداری از ضریب فشردگی و تورم را، بیشتر افزایش می‌دهند که افزایش ضریب فشردگی باعث کاهش سختی خاک می‌گردد. فیبرهای طبیعی اثر بیشتری را نسبت به فیبرهای مصنوعی در هنگام باربرداری از خود نشان می‌دهند. جهت انجام عملیات اجرایی

استفاده از فیبرهای مصنوعی نسبت به فیبرهای طبیعی بیشتر توصیه می گردد.

الهه مهنی نوش و علی حیدر پناه نیز با بررسی ماتریس مکش ناشی از انرژی تراکم رابطه ی این پارامتر را با مقاومت برشی خاک های غیر اشباع بیان کردند [۶] در مطالعه آنها از یک نوع خاک غیر اشباع با درصد معین که تحت انرژی های متفاوت در آزمایشگاه متراکم میگردد، استفاده گردیده است. با توجه به تغییر انرژی تراکم، تغییرات قابل ملاحظه ای در ماتریس مکش خاک به وجود آمده است که این تغییرات ناشی از تغییر فشار هوای حفره ای می باشد و تغییر در ماتریس مکش منجر به تغییر در مقاومت برشی خاک می شود.

در این مطالعه تاثیر درصد رطوبت و به طور کلی انرژی تراکم بر روی مقاومت برشی یک خاک رسی متراکم شده غیراشباع بررسی شده است. نتایج نشان می دهد که افزایش انرژی تراکم باعث تغییر در منحنی مشخصه خاک-آب می گردد به گونه ای که افزایش انرژی تراکم باعث می شود که منحنی مشخصه پایین تر قرار بگیرد. با افزایش انرژی تراکم مقدار هوای ورودی نیز افزایش می یابد. افزایش مقدار هوای ورودی باعث افزایش ماتریس مکش می شود. رفتار مکانیکی یک خاک غیراشباع به طور متفاوت با تغییر تنش نرمال خالص و تغییر ماتریس مکش تحت تاثیر قرار می گیرد.

۲-۶ تعیین نسبت پیش تحکیمی (Over consolidation ratio)

این مقدار به صورت نسبت فشار پیش تحکیمی یا فشار موثر حداکثری که در گذشته بر روی خاک بوده است به فشار سربار موجود یا فشار موثر روباره که در حال حاضر در روی خاک است. تعریف میشود. باید توجه داشت تنها وزن روباره تعیین کننده نسبت پیش تحکیمی نبوده و عوامل متعددی در این امر دخیل میباشند که برخی از آنها عبارتند از :

- تغییر در تنش کلی در اثر از بین رفتن فشار روباره، ساختمانهای قبلی و یخبندان
- تغییر در فشار آب حفرهای ناشی از تغییر در ارتفاع سفره آب و...

- تغییر در ساختمان خاک در اثر تراکم ثانویه

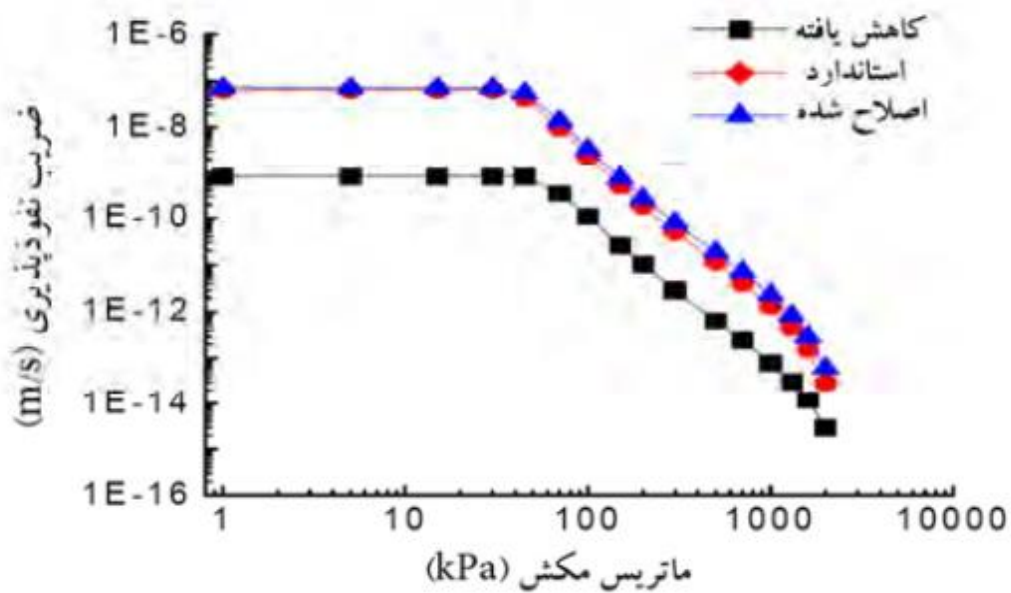
- تغییرات محیطی شامل تغییر PH، حرارت و غلظت نمک

- تغییر شیمیائی ناشی از هوازدگی، رسوبگذاری مواد سیمانی کننده، مبادله یونی

عبد الکريم خسروی و همکاران نیز با مطالعه بر روی انرژی تراکم [۷] تاثیر این پارامتر بر روی نفوذ پذیری خاکهای غیر اشباع، با بکارگیری روابط ون گنشتاین van Genuchten و فردلند ایگزینگ Fredlund and Xing را مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش برای تعیین تاثیر میزان رطوبت تراکم بر نفوذپذیری رس غیر اشباع پنج نمونه در میزان رطوبت های مختلف با انرژی تراکم پروکتور استاندارد متراکم شدند. نمونه اول در میزان رطوبت بهینه 18.4% متراکم شد. نمونه های دوم و سوم به ترتیب در درصد رطوبت های بیشتر از رطوبت بهینه 20.4% و

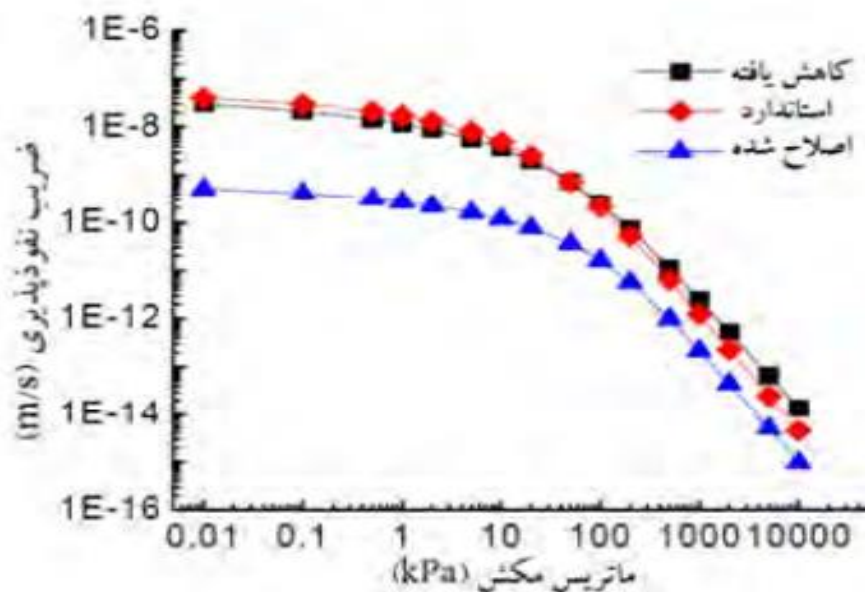
22.4% متراکم شدند. نمونه‌های چهارم و پنجم نیز به ترتیب در درصد رطوبت‌های کم‌تر از رطوبت بهینه 14.4% و 16.4% متراکم شدند.

برای آنالیز اثر انرژی تراکم بر نفوذپذیری رس غیر اشباع، سه نمونه تحت انرژی‌های تراکم پروکتور کاهش یافته، پروکتور استاندارد و پروکتور اصلاح شده متراکم شده‌اند. در نهایت ارتباط ضریب نفوذپذیری غیراشباع با انرژی‌های تراکم مختلف در دو مدل بیان شده به صورت زیر حاصل گشت.



مدل فردلند-ایگزینگ

شکل (۶-۲)



- مدل ون گشتاین

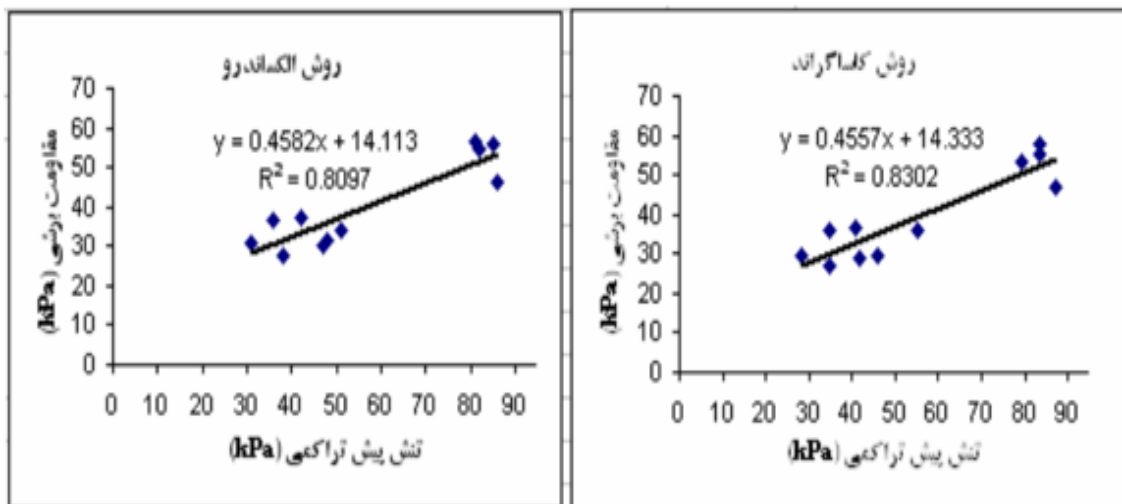
شکل (۷-۲)

۷-۲ سایر مقالات

خانجانی و حسین پور [۸] آزمایش تحکیم یک بعدی، برای محاسبه مقدار و سرعت نشست از نتایج آزمایش ادومتری، را مبنی بر نظریه تحکیم یک بعدی ترزاقی و در خاکهای با نفوذ پذیری کم انجام دادند و بیان کردند که ((آزمایش ها نشان می دهد که مقدار تنش پیش-تراکمی یک مقدار مطلق نبوده و به عواملی همچون نوع آزمایش و نرخ بارگذاری بستگی دارد. همچنین نتایج نشان می دهد با افزایش مواد آلی و نرخ بارگذاری مقاومت به تراکم (تنش پیش-تراکمی) افزایش یافته و با افزایش رطوبت تنش پیش تراکمی کاهش می یابد.))

محمدرضا باغبان گلپسند و همکاران [۹] نیز به بررسی پیش‌تحکیمی در رسوبات دریاچه ارومیه و با کمک گرفتن از آزمایش CPTu و آزمایش تحکیم پرداخته و نسبت پیش‌تحکیمی OCR در رسوبات نرم دریاچه ارومیه به دو روش آزمایشگاهی (دستگاه ادمتر) و صحرایی با استفاده از آزمایش CPTu اندازه‌گیری و مقادیر بدست آمده باهم مقایسه شده‌اند. با وجود پراکندگی که‌گاهی در نتایج به چشم می‌خورد، نتایج این دو نوع آزمایشات تطابق خوبی با یکدیگر دارند. رسوبات دریاچه ارومیه نسبت پیش‌تحکیمی چندانی را نشان نمی‌دهند، لذا باید آنها را عادی تحکیم یافته در نظر گرفت. در نتایج آزمایشات نسبت پیش‌تحکیمی عموماً حدود یک بدست آمده است. البته‌گاهی نسبت پیش‌تحکیمی رسوبات بیش از یک بدست آمده که دلیل آن احتمالاً وجود نمک‌های زیاد در رسوبات و فعل و انفعالات شیمیایی است.

مناطهماسی و همکاران نیز [۱۰] به بررسی رابطه‌ی بین تعیین تنش پیش‌تحکیمی و مقاومت برشی را با استفاده از آزمایش نشست صفحه‌ای پرداخته و با الهام‌گیری از روش الکساندر-ارل و روش کاساگراندا اشکال زیر را برای ارتباط بین این دو پارامتر اصلی معرفی کردند.



شکل ۲-۸. رابطه تنش پیش تراکمی و مقاومت برشی با روش کاساگراند و الکساندری

کیوان کریمی عسکرانی و همکاران نیز [۱۱] با افزودن آهک و سیمان به خاک رسی، تاثیر این افزودنی ها بر افزایش مقاومت برشی خاک پیش تحکیم یافته را بررسی کرده و با استفاده از آزمایش برش مستقیم و دریافتند

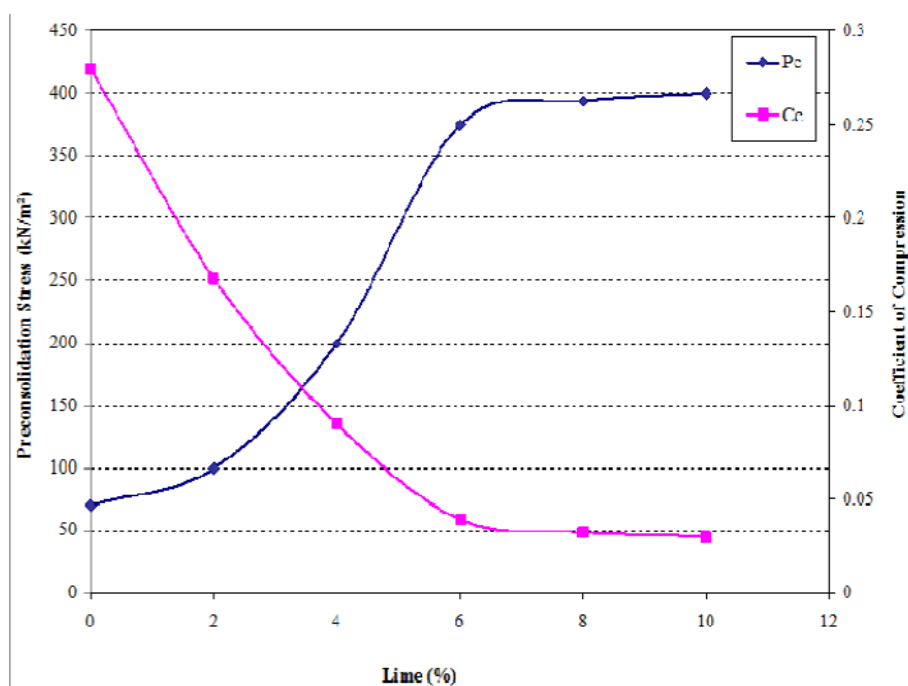
پیوندهای بین ذره ای و نسبت پیش تحکیمی OCR متغیرهای مهم تأثیر گذار بر مقاومت برشی زهکشی شده خاک های رس پیش تحکیم یافته هستند. آنها همچنین بیان کردند که افزایش در مقدار و شدت پیوندهای شیمیایی بین ذره ای که بواسطه ایجاد سمنتاسیون بین ذرات خاک بدست آمده است باعث افزایش مقاومت اصطکاکی و لغزشی و در نتیجه افزایش مقاومت برشی زهکشی شده برای خاکها پیش تحکیم یافته میشود. خاک سمنته شده با آهک پس از ۷ روز عمل آوری به حدود ۹۲٪ از مقاومت خود می رسد و با ادامه زمان عمل آوری تا ۲۸ روز تاثیر قابل توجهی در پارامترهای مقاومت چسبندگی C و مقدار m آن حاصل نمی گردد در

صورتی که در خاک سمنته شده با سیمان با ادامه زمان عمل آوری از ۷ روز تا 28 روز تاثیر قابل توجهی در پارامترهای مقاومت چسبندگی C و مقدار m حاصل می‌شود. در یک تنش نرمال مؤثر و زمان عملآوری مشخص، نمونه‌های با 3% سیمان 3% آهک مقاومت برشی، مقاومت چسبندگی C و ضریب m از خود نشان میدهند.

وحید رضا اوحدی و همکاران [۱۲] نیز با بررسی تاثیر افزودن آهک به خاکهای واگرا و یافتن میزان پیش‌تحکیمی در یافتند که مهمترین نتیجه پژوهش حاضر را میتوان تعیین درصد بهینه آهک بر اساس میزان افزایش تنش پیش‌تحکیمی و آزمایشهای ریز ساختاری بیان نمود، که به ازای افزودن 6 درصد آهک میزان تنش پیش‌تحکیمی حدود 430٪ افزایش یافته و به ازای هر درصد آهک تنش پیش‌تحکیمی حدود 50 کیلو نیوتن بر متر مربع افزایش نشان داده است.

اگر به صورت خاص به بررسی منحنی تنش پیش‌تحکیمی بر اساس میزان درصد آهک افزوده پرداخته شود، با توجه به شکل ۲-۵ مشاهده میشود به ازای افزایش 2% آهک میزان تنش پیش‌تحکیمی حدود 42% افزایش یافته است. به عبارت دیگر، به ازای هر درصد آهک میزان تنش پیش‌تحکیمی حدود kN/m^2 15 افزایش یافته است. در این راستا، با افزایش 4% آهک میزان تنش پیش‌تحکیمی حدود 180% افزایش یافته و به ازای هر درصد آهک میزان تنش پیش‌تحکیمی حدود $32/5 kN/m^2$ افزایش یافته است. همچنین با افزایش 6% آهک نرخ رشد درصد تنش پیش‌تحکیمی ادامه یافته و به حدود 435% رسیده و میزان افزایش تنش پیش‌تحکیمی به ازای هر درصد آهک حدود

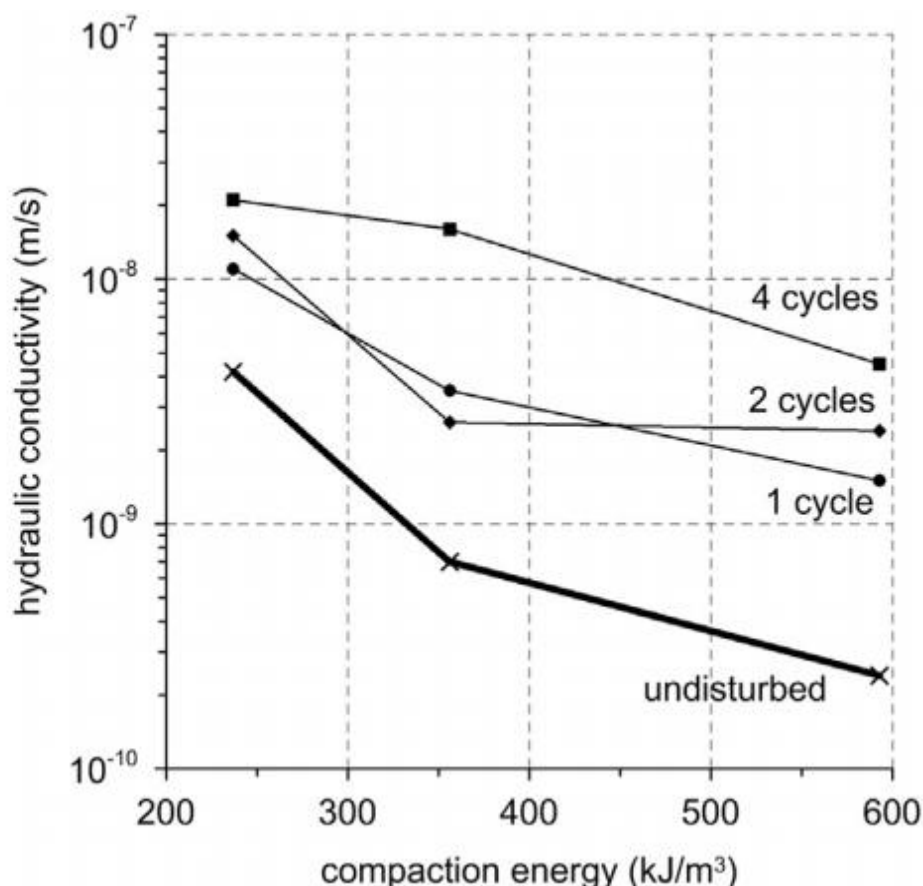
50.8 kN/m² بوده است. توجه به این نکته دارای اهمیت است که با افزایش 8% و 10% آهک با اینکه میزان درصد افزایش تنش پیش تحکیمی به حدود 460% و ۴۷۰٪ رسیده است، اما میزان افزایش تنش پیش تحکیمی به ازای هر درصد آهک به ترتیب به مقادیر ۴۰ kN/m² و 33kN/m² کاهش یافته است. بر این اساس می توان درصد بهینه آهک را برای بهسازی در این پژوهش ۶٪ معرفی نمود، تا بیشترین درصد بهره وری ارائه شود.



شکل ۲-۹. منحنی تغییرات تنش پیش تحکیمی و ضریب فشردگی (CC) نمونه های بهسازی شده با درصد های مختلف آهک.

۸-۲ مقالات خارجی

دوناتلو استرپی [۱۳] با بررسی تاثیر چرخه‌های یخ زدگی بر روی رسانایی هیدرولیکی رس‌های سیلتی متراکم، به بررسی انرژی تراکم در این دسته از خاکها پرداخت. وی با استفاده از آزمایش تراوش دیواره‌ای انعطاف پذیر نمودار زیر را تحت تراکم اولیه و در رابطه با ارتباط بین انرژی تراکم و رسانایی هیدرولیکی در میزان چرخه‌های مختلف ارائه داد.



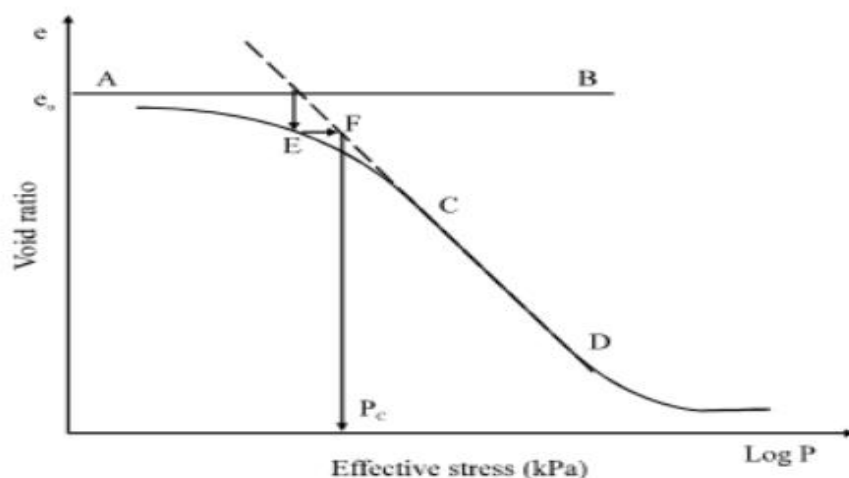
شکل ۲-۱۰. ارتباط بین انرژی تراکم و رسانایی هیدرولیکی

وی در نهایت نتیجه گرفت که زمانی که تنش اعمالی کم باشد حساسیت رس سیلتی به پدیده‌ی یخ زدگی بیشتر بوده و نمونه تحت انرژی بیشتری متراکم می‌شود و زمانی که تنش اعمالی، متوسط تا زیاد باشد تاثیر یخ زدگی نیز در نمونه‌ها با انرژی تراکم زیاد از بین رفته و نمونه‌ها تحت انرژی کم تا متوسط متراکم می‌شوند. همچنین در نواحی که انرژی تراکم کاهش می‌یابد میزان آب اولیه موجود به مقدار بهینه خود رسیده و نشان می‌دهد که انرژی تراکم مقداری معقول را دارا می‌باشد.

نارا و همکاران نیز [۱۴] با مطالعه‌ی تاثیر منحنی‌های تراکم بر روی تنش پیش‌تحکیمی و نسبت تخلخل بیان کردند که ((بسیار مهم است قبل از تعیین تنش پیش‌تحکیمی به دقت به مدل برازش منحنی را انتخاب کنیم چرا که روش‌های محاسباتی مختلف منجر به ایجاد تخمین‌های بیشتر از حد یا کمتر از حد معمول باعث محاسبات فراوانی می‌شوند. همچنین اسولین [۱۵] و ون گونچن نیز [۱۶] از جمله افرادی هستند که مدلهای برازش منحنی مناسبی را ارائه کردند.

برای تخمین تنش‌های پیش‌تحکیمی نیز دو روش اصلی ارائه شده روش‌های کاساگرانده [۱۷] و سیلوا می‌باشد که از بین این دو دومی پاسخ‌های واقع‌گرایانه‌تری را ارائه می‌دهد. پاسخ‌های این دو روش نیز با مدل ون گنچن غالباً تناسب بیشتری را دارند.

شکل (۲-۱۱) منحنی سیلوا را در تعیین پیش‌تحکیمی نشان می‌دهد



شکل ۲-۱۱. تعیین تنش پیش تحکیمی به کمک روش سیلوا

مطالعه‌ی نارا همچنین نشان داد که مقدار تخلخل اولیه و مقادیر تنش‌های پیش تحکیمی با توجه به مدل‌های برآزش منحنی‌های به پاسخ‌های مختلفی در مقدار یک کیلو پاسکال و همچنین در حالت عدم وجود آن، منجر می‌شوند.

علاوه بر وی کیم و دانیل [۱۸] دریافتند که افزایش انرژی تراکم کمتر از میزان محتوای آب موجود در خاک تاثیر داشته و تاثیر شایان ذکر را در آسیب رسانی یا تخریب خاک ندارد و افزایش آن تنها منجر به بهینه شدن رطوبت نمونه‌های تراکمی می‌شود.

مطالعه‌ی دیگر صورت گرفته در این زمینه به مقاله‌ی پاکباز و همکاران [۱۹] بر می‌گردد که تاثیر پارامتر m را بر مخلوط‌های پیش تحکیم یافته مورد بررسی قرار دادند. در کار آنها مخلوط‌های ماسه-رس شامل ماسه شسته شوشتر حاوی ۲۰، ۳۰، ۴۰ درصد وزنی، رس آماده شدند و در رطوبت بهینه تراکم یافته، سپس تا سربار

۲۲۰۰ کیلو پاسکال تحکیم داده شدند و یک سری آزمایش های برش مستقیم تحت سربارهای ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ کیلو پاسکال در شرایط زهکشی شده روی آنها انجام شد. در نهایت نتایج نشان داد که با افزایش ریزدانه تا میزان ۳۰ درصد نسبت تخلخل مینیمم (e_{min}) کاهش یافته سپس با افزایش ریزدانه افزایش می یابد. همچنین با افزایش ریزدانه زاویه اصطکاک داخلی و مقدار پارامتر m کاهش می یابد ولی این کاهش از ۳۰ درصد رس به بعد که مقدار آستانه ی آن است نمود بیشتری دارد. آنها همچنین بیان کردند که ضریب m در مقاومت برشی زهکشی شده خاک های پیش تحکیم یافته، یک پارامتر ساختاری می باشد و برای هر ترکیب خاک، بصورت مستقل از σ_p' وجود دارد؛ برای ترکیبات پیش تحکیم یافته با فشار پیش تحکیمی یکسان، مقدار ضریب m را می توان نماینده ای از تقعر پوش گسیختگی زهکشی شده آنها دانست.

جنوریانو، بورلاند و هایت [۲۰] رفتار زهکشی نشده ماسه های رس دار طبیعی تولیدی از سایت استخراج نفت گولفوکس سی در دریای شمالی را تشریح کردند. رفتار یک مدل از خاک تشکیل شده از ماسه رودخانه هام و کائولین مشاهده شده بود. این مدل خاک برای نشان دادن پاسخ نسبتاً "نزدیک درفیلد انتخاب شد. این دوباره تشکیل یافتن نمونه موضوع مورد مطالعه برای تحکیم به روش k_0 و برش زهکشی نشده در آزمایش فشاری سه محوره تحت کنترل جابه جایی بود. آنها دریافتند که با افزایش نسبت پیش تحکیمی، OCR کاهش می یابد. آنها همچنین نشان دادند که ماسه رس دار در کرنش محوری کوچک به ماکزیمم مقاومتش می رسد. مهمت صالح اولمز در سال ۲۰۰۸ برای مشاهده اثر کائولین در مخلوط ماسه-رس روی رفتار مقاومت برشی سه سری آزمایش انجام داد. آزمایش سه محوره زهکشی شده و زهکشی نشده و همچنین آزمایش برش مستقیم. او پارامترهای مقاومت برشی مؤثر و مقاومت برشی زهکشی نشده را اندازه گیری کرد،

وی همچنین خصوصیات تنش-کرنش را در همه آزمایشات بررسی کرد و نتیجه گرفت که خصوصیات مقاومت برشی و ویژگیهای تنش-کرنش مخلوط ماسه-کائولین تغییرات قابل توجهی در ترکیب دو درصد کائولین با ماسه دارند.

بهنام برومندزاده [۲۱] تحقیقی تحت عنوان بررسی تأثیر ترکیب و OCR بر ضریب m در مقاومت برشی زهکشی شده خاک های پیش تحکیم یافته انجام داد. وی در آزمایشات خود علاوه بر رس طبیعی اهواز و بهبهان، از ترکیب ماسه با درصد های مختلف بنتونیت نیز استفاده کرد. او در نهایت نتیجه گرفت که با افزایش مقدار ریزدانه، مقاومت برشی زهکشی شده تحکیم یافته این ترکیبات کاهش می یابد. بعلاوه زاویه اصطکاک و پارامتر m آنها نیز با افزایش مقدار رس کاهش می یابد. وی همچنین برای بررسی اثر دانه بندی، از دو دانه بندی ماسه در ترکیب با بنتونیت استفاده کرد و نتیجه گرفت که با کاهش اندازه ذرات، مقاومت برشی زهکشی شده پیش تحکیم یافته مخلوط ها افزایش و پارامتر m آن ها کاهش می یابد.

۹-۲ روش آزمایش شاخص در تخمین تاثیر تنش پیش تحکیمی در رس ها

یکی از مسائل مورد توجه در رس ها تنش پیش تحکیمی آنها بوده که بدین لحاظ آزمایش تحکیم یک بعدی و محاسبه ی تنش پیش تحکیمی σ_p' در نمونه های دست نخورده معمولاً انجام می شود. و مقدار تخمین اولیه در آنها از پلاستیسیته و میزان رطوبت خاک موثر خواهد بود. و بدین لحاظ کوتاهی و ماین [۲۲] مطالعه ای را انجام دادند و در آن نمونه های دوگانه در پیش بینی مقدار پیش تحکیمی در روش های تجربی را مورد توجه قرار دادند. این آزمایش بر روی نمونه هایی انجام شده

است که طی آن ۵۰۰ نمونه از ۵۰ سایت مختلف نیز برداشت شده است. روش پیشنهادی توسط تابع ریاضی بیان می‌شود که در آن با در نظر گرفتن میزان رطوبت و کاراکترهای پلاستیسیته خاک‌ها به دو دسته با OCR بیشتر از ۳ و کمتر از ۳ تقسیم شده‌اند. نتایج از حصول یک روش تجربی جدید خبر می‌دهد که رویکرد جدیدی را در پیدا کردن ظرفیت‌ها نسبت به روشهای غیر قابل قبول قبلی بیان می‌کند.

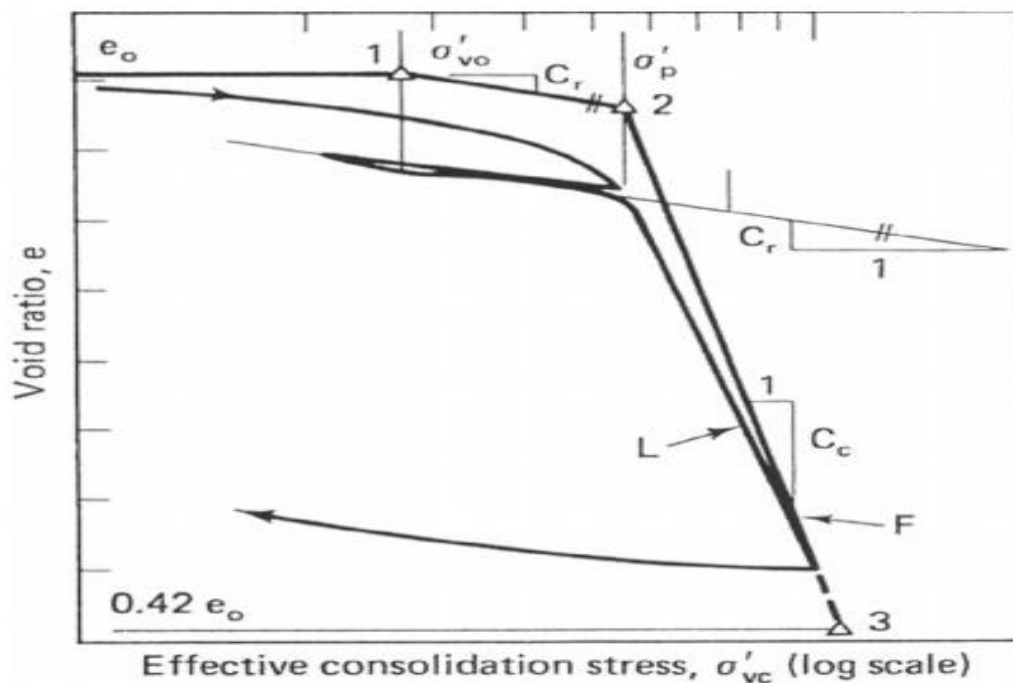
آنها بیان کردند یکی از پارامترهای مهم در رس‌ها تنش پیش‌تحکیمی است که به عنوان پارامتر کلیدی با مقاومت برشی زهکشی نشده و رفتارهای کرنش-تنش و پاسخ فشار خالص آب و محاسبات مرتبط با نشست و همچنین تنش‌های ژئو استاتیک در ارتباط است. به خصوص تاریخچه تنش خاک نیز بر روی تنش پیش‌تحکیمی تاثیر گذار است.

نتایج نشان داده است که عملکرد هدف بهبود یافته و $r^2=83\%$ و $E=83\%$ و $MAE=65KPA$ است که نشان دهنده ی این است که تخمین‌ها برای $OCR<25$ تا حدود زیادی قابل قبول است.

۱۰-۲ ارزیابی فشار پیش‌تحکیمی در رس‌های اشباع دست نخورده

همام و همکاران [۲۳] به بررسی تاثیر دست خوردگی نمونه‌ها بر روی تنش پیش‌تحکیمی پرداختند که با استفاده از روش اشمترمن این تحقیقات انجام شده است. پیش‌بینی σ_c از روی پنترومتر نیز مورد بررسی قرار گرفته است. این کار با محاسبه σ_c برای تخمین نتایج آزمایش تحکیم انجام شده و در آن آزمایش پنترومتر بر روی نمونه‌ها صورت گرفته است. پنترومتر جیبی ابزار ساده ای است که به آسانی

در آزمایشگاه و ساینتهای تحقیقاتی قابل استفاده است. قبل از آزمایش تحکیم بر روی نمونه‌های دست نخورده اعداد پنترومتر جیبی مطالعه شده و اصلاح می‌شود. استفاده از پنترومتر در رس‌های متوسط تا سخت قابل استفاده است. اما در رس‌های نرم این ابزار کاربردی نبوده است. در شکل زیر نمودار اشمرتمن در تخمین بیش تحکیمی قابل ملاحظه است.



شکل ۲-۱۲. نمودار اشمرتمن در پیش بینی نمونه‌های دست نخورده

آنها در نهایت دریافتند که با توجه به نقطه برخورد خطوط اولیه و خطوط دست نخورده (virgin) در نمودار $e - \log \sigma'$ می‌توان به مقدار دقیق در فشار پیش تحکیمی دست یافت. دستخوردگی نمونه‌ها چه رس نرم باشد چه سخت نباید به سادگی از نظر دور شود و تاثیر پارامترهای مهندسی در خاکها خصوصا نسبت

تخلخل و شاخص تراکم در σ_c معمولاً شامل عدم قطعیت ها می شود. این مقاله نشان داد که در σ_c بستگی به داده های جیبی دارد. اندازه گیری های جیبی مستقیماً برای مقاومت فشاری دست نخورده در خاکهای رسی چسبنده و تعیین آن مهم است. در ر سهای نرم این داده ها قابل اعتماد نبوده و در تخمین σ_c میسر نیست. σ_c نیز در داده های جیبی باید در مقدار $1/2$ ضرب شود تا مقدار دقیق در بیاید.

فصل سوم

نحوه انجام آزمایش‌ها و نتایج شناسایی

خاک

۳-۱ مقدمه

در این فصل ابتدا آزمایش‌های اولیه برای شناسایی خاک مورد نظر توضیح داده شده و نتایج آزمایش نیز آمده است. همچنین خاک مورد آزمایش مورد بررسی قرار می‌گیرد و مشخصات کلی آن‌ها ارائه می‌شود.

۳-۲ محل و نحوه نمونه‌گیری

خاک مورد نظر برای آزمایش، رسی بوده و متعلق به روستای سعد آباد واقع در حومه شهرستان شاهرود می‌باشد. در این آزمایش نمونه‌ها به صورت دست خورده انتخاب شده اند.

۳-۳ آزمایش‌های اولیه برای شناسایی خاک

۳-۳-۱ چگالی نسبی دانه‌های جامد خاک (G_s):

این آزمایش مطابق استاندارد ASTM D 854 که برای بدست آوردن چگالی نسبی دانه‌های جامد خاک می‌باشد صورت گرفته است.

برای محاسبه چگالی دانه‌های جامد خاک، از رابطه (۳-۱) استفاده می‌شود.

$$G_s = K * \frac{M_s}{M_s + M_{PW} - M_{PWS}} \quad (۳-۱)$$

M_s : جرم ذرات خاک

M_{PW} : جرم ذرات خاک و آب

$M_s + M_{PW} - M_{PWS}$: جرم ذرات خاک و آب و پیکنومتر

K : ضریب تصحیح دمای آب

چگالی هر خاک در مسائلی چون نشست و پایداری در مهندسی خاک استفاده می شوند. همچنین وزن مخصوص ویژه در محاسبات مربوط به بسیاری از آزمونهای آزمایشگاهی به کار گرفته می شود. به عنوان مثال در آزمایش تراکم، استفاده از وزن مخصوص ویژه خاک ضروری می باشد.

این آزمایش بر روی سه نمونه خاک صورت پذیرفت و در نهایت میانگین آنها به عنوان چگالی نسبی دانه‌های جامد خاک در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است جدول (۳-۱) نتایج آزمایش چگالی نسبی دانه‌های جامد خاک را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۱. نتایج آزمایش چگالی نسبی دانه‌های جامد خاک

شماره آزمایش	Gs
۱	۲/۵۷
۲	۲/۵۴
۳	۲/۵۴
میانگین	۲/۵۵

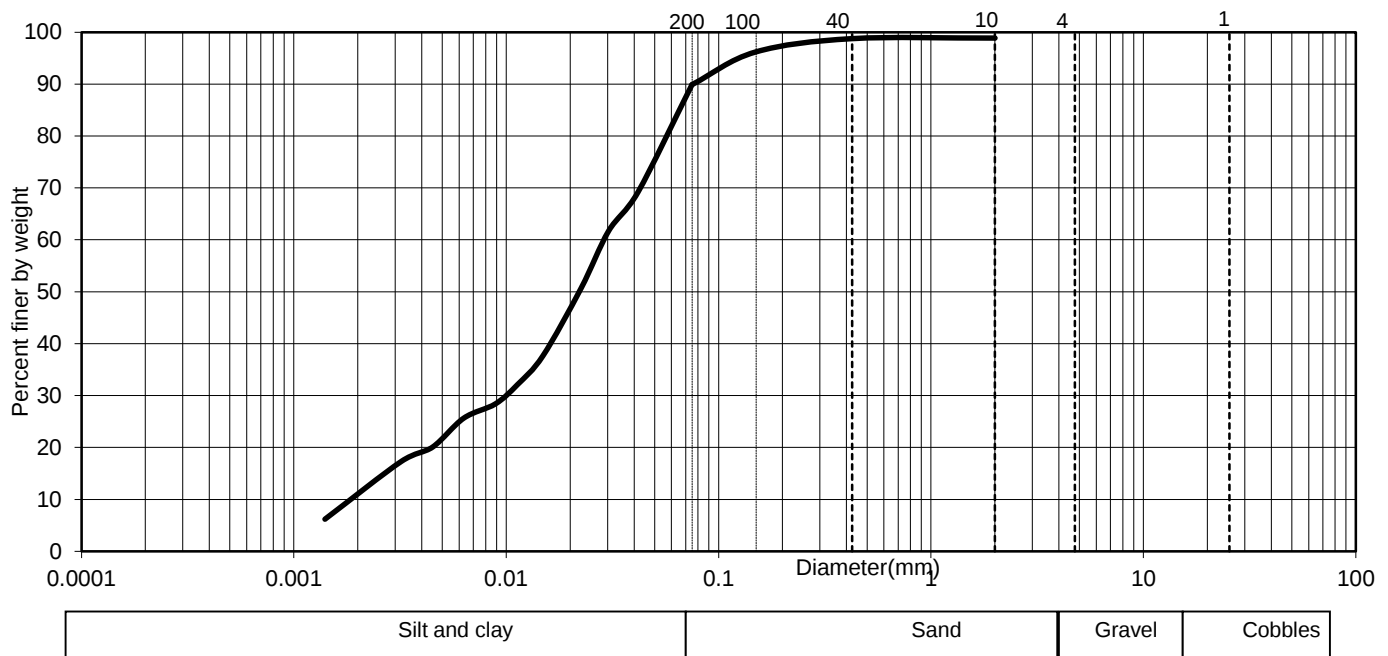


شکل ۳-۱. پیکنومتر مورد استفاده برای آزمایش تعیین درصد چگالی دانه‌های جامد

۳-۲-۳ آزمایش‌های دانه‌بندی و هیدرومتری

آزمایش دانه‌بندی به روش تر برای دانه‌های بزرگتر 0.075mm طبق استاندارد ASTM D 422-87 و آزمایش هیدرومتری بر طبق استاندارد ASTM D 422-63 بر روی خاک انجام شده و پس از آن منحنی دانه‌بندی برای این آزمایش رسم می‌شود.

روند کار بدین ترتیب است که ابتدا مقدار مشخصی از خاک از الک شماره 200 عبور داده تا درصد ریزدانه خاک به دست آید. مشاهده شد که به طور متوسط ۹۰٪ از خاک از الک نمره ۲۰۰ عبور می‌کنند. بنابراین جهت انجام آزمایش دانه‌بندی می‌بایست از روش هیدرومتری استفاده شود. شکل (۳-۲) نمودار حاصل از انجام آزمایش‌های دانه‌بندی خاک را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۲. نمودار دانه‌بندی از آزمایش الک تر و هیدرومتری

۳-۳-۳ حدود اتربرگ

آزمایش حدود اتربرگ طبق استاندارد ASTM D4318 انجام شد. برای تعیین حد روانی از آزمایش جام کاساگرانده و برای تعیین حد خمیری از روش فیتیله استفاده شد.

هدف آزمایش، به دست آوردن حد روانی (میزان رطوبت برای حالتی که خاک چسبنده از حالت روان به یک حالت پلاستیک گونه و خمیری می رسد) و حد خمیری (درصد رطوبت برای حالتی که خاک چسبنده از حالت خمیری به حالت نیمه جامد تغییر می کند) و دامنه خمیری خاک می باشد.

نتایج و اطلاعات آزمایش در جداول (۳-۲) و (۳-۳) آمده است.

جدول ۳-۲. اطلاعات حد روانی و خمیری

	اطلاعات حد روانی			اطلاعات حد خمیری
	مرحله اول	مرحله دوم	مرحله سوم	
وزن ظرف	۲۲,۹	۲۲,۶	۲۴,۴	۲۴
وزن ظرف و خاک مرطوب	۷۰,۸	۷۲,۳	۷۰,۸	۳۰
وزن ظرف و خاک خشک	۵۷,۹	۵۸,۵	۵۷,۶	۲۹
درصد رطوبت متوسط	۳۶	۳۸	۳۹	۲۲
تعداد ضربات	۳۳	۲۷	۲۱	

جدول ۳-۳. نتایج حدود اتربرگ

حد روانی	حد خمیری	شاخص خمیری
۳۹٪	۲۲٪	۱۷٪



ب



الف

شکل ۳-۳. الف) روش فیتيله برای آزمون حد خمیری ب) جام کاساگرانده برای آزمون حد روانی

۳-۳-۴ آزمایش تعیین درصد رطوبت طبیعی

آزمایش تعیین درصد رطوبت طبیعی خاک طبق آیین نامه ASTM D 2216 انجام شد.

هدف از این آزمایش، تعیین درصد وزنی رطوبت در خاک نسبت به دانه‌های خشک می‌باشد.

نتایج آزمایش در جدول (۳-۴) آمده است.

جدول ۳-۴. تعیین درصد رطوبت خاک

شماره آزمایش	$\omega\%$
۱	۸/۸
۲	۹
۳	۸/۳
میانگین	۸/۷

۳-۴ آزمایش تراکم

آزمایش تراکم عبارتست از کاهش دادن حجم خاک در اثر خارج ساختن هوا با استفاده از اعمال نیرو که به منظور افزایش مقاومت نیروی برشی، کاهش نفوذپذیری، کاهش نشست در آینده و بهبودخواص مکانیکی خاک انجام می گردد.

به طور کلی هدف از انجام آزمایش تراکم کاهش میزان تخلخل خاک است. وجود آب تا میزان مشخصی، سبب تسهیل این علیات می گردد. به دست آوردن این حد رطوبت و وزن مخصوص خشک بیشینه خاک پس از به کار بردن میزان های معینی انرژی کوبشی مد نظر ماست.

چهار عامل در تراکم موثر است که به شرح زیر است.

الف) نوع خاک

خاک های غیر چسبنده مانند ماسه ها و شن ها با استفاده از تجهیزات تراکم ارتعاشی و یا لرزشی به خوبی متراکم می شوند. تراکم خاک های چسبنده مانند رس ها و لای ها مشکل تر است و احتیاج به تجهیزات تراکمی مثل غلتک پاچه بزی دارد.

ب) دانه‌بندی مصالح

خاک های خوب دانه‌بندی شده بهتر از خاک های بد دانه‌بندی شده متراکم می شوند و دانسیته خشک بیشتری میتوانند حین تراکم به دست بیاورند.

ج) میزان رطوبت

میزان رطوبت عامل مهمی در تراکم خاک است. آب دور ذرات خاک را گرفته و کمک میکند که در هم فرو روند و متراکم شوند. اما آب بیش از حد، باعث اشباع شدن خاک شده و عمل تراکم را مشکل تر می کند. برای یک انرژی تراکم مشخص، درصد رطوبت بهینه ای وجود دارد که در آن درصد رطوبت، خاک می تواند به بالاترین میزان تراکم خود دست یابد.

د) انرژی تراکم

انرژی تراکم میزان انرژی اعمالی به خاک است. معمولاً با افزایش انرژی تراکم میزان تراکم خاک افزایش می یابد. استثناهایی نیز وجود دارد که با افزایش انرژی تراکم نمی توانند متراکم تر شوند.

۱-۴-۳ دستگاه آزمایش تراکم

برای انجام این آزمایش از دستگاه چکش تراکم برقی اتوماتیک مدل SO 610 ساخت شرکت آزمون که در شکل ۱-۴ قابل مشاهده است و متعلق به آزمایشگاه دانشگاه صنعتی شاهرود است استفاده شده است. دستگاه چکش تراکم مورد استفاده به صورت الکترونیکی تعداد ضربات را نمایش داده و از طرفی امکان تغییر در تعداد ضربات را داشته که بدین ترتیب امکان انجام آزمایش‌هایی خارج از آزمایش تراکم استاندارد و آزمایش تراکم اصلاح شده نیز مقدور شده است. این دستگاه علاوه بر داشتن دقت بالا، امکان تنظیم ارتفاع و همچنین دوران در قالب را دارد. دوران قالب باعث بالاتر رفتن دقت به دلیل یکنواخت تر شدن ضربات در آزمایش و افزایش دقت در تراکم نیز می شود. این دوران‌ها به صورت خودکار و بعد از هر ضربه

انجام می شوند



شکل ۳-۴. دستگاه چکش برقی اتوماتیک

۳-۴-۲ آزمایش تراکم پروکتور استاندارد

تراکم آزمایشگاهی شامل متراکم ساختن خاک در یک میزان رطوبت معین در یک قالب با ابعاد معین با استفاده از انرژی تراکم مشخصی می باشد. این عمل در میزان رطوبت های متفاوتی تکرار می شود تا منحنی تراکم خاک به دست آید. معمولترین روش های آزمایش (از نظر انرژی تراکم، تعداد لایه ها در قالب و ...) آزمایش تراکم استاندارد و تراکم اصلاح شده است. در آزمایش تراکم استاندارد حجم قالب تراکم 944CM^3 و وزن چکش 24.4 N و ارتفاع سقوط چکش 0.31 M است. روش آزمایش به این ترتیب

است که خاک در درصد رطوبت مشخصی تهیه می‌شود و در قالب تراکم متراکم می‌شود و با ثبت جرم خاک درون قالب تراکم، دانسیته مرطوب خاک بدست می‌آید. با دانستن میزان رطوبت خاک درون قالب، دانسیته خشک به راحتی محاسبه می‌شود (با تقسیم دانسیته مرطوب به $1+W$ که W میزان رطوبت خاک است و به صورت عدد اعشاری بیان می‌شود). این عمل تراکم، درمیزان رطوبت های متفاوتی تکرار می‌شود و سپس دانسیته خشک در برابر میزان رطوبت رسم می‌شود. تا منحنی تراکم حاصل شود. نقطه ماکزیمم روی منحنی، ماکزیمم دانسیته خشک آزمایشگاهی نامگذاری شده و دانسیته خشک آن همان γ_{dmax} است. میزان رطوبت متناظر با نقطه ماکزیمم در منحنی تراکم، میزان رطوبت بهینه نام دارد و با W_{opt} نشان داده می‌شود. برای افزایش دقت سه نمونه درون دستگاه گذاشته و با تنظیم دستگاه بر روی وضعیت مورد نظر، هر یک تحت آزمایش قرار داده می‌شود.

۳-۴-۳ آزمایش تراکم پروکتور اصلاح شده

روش انجام آزمایش تراکم اصلاح شده شبیه تراکم استاندارد است اما میزان انرژی آن بیشتر است و خاک در پنج لایه در قالب تراکم ریخته شده و کوبیده می‌شود. برای آزمایش تراکم اصلاح شده پروکتور خاک در قالب ۴ اینچی که دارای حجم $1/30$ فوت مکعب است، متراکم می‌شود. خاک در ۵ لایه و هر لایه با ۲۵ ضربه چکش ۱۰ پوندی با ارتفاع سقوط چکش ۱۸ اینچ درون قالب تراکم، متراکم می‌شود. تراکم اصلاح شده پروکتور دارای انرژی تراکم 2700 KN.m/m^3 می‌باشد.

نمونه خاک مورد استفاده در آزمایش تراکم معمولاً نمونه دست خورده است. خاک نبایستی ذرات درشتی داشته باشد. به طور کلی خاک باید از الک شماره ۴ عبور کند. خاکی که قبلاً برای آزمایش تراکم استفاده شده است نباید دوباره مورد استفاده قرار بگیرد. برای تهیه نمونه خاک، خشک شده در معرض هوا و عبوری از الک ۴ استفاده می‌شود.

این آزمایش طبق استاندارد ASTM D 698 و ASTM D 1557 انجام گردید و پنج انرژی متفاوت با تغییر در تعداد ضربه و روش آزمایش از لحاظ استاندارد و یا اصلاح شده اعمال گردید.

۴-۳-۴ انرژی های انتخاب شده برای تراکم نمونه ها

در این پژوهش نیاز به چند انرژی متفاوت دیگر برای بررسی پارامتر مورد نظر بوده است. از این رو بر پایه دو روش استاندارد و اصلاح شده و نیز با استفاده از رابطه انرژی و تغییر در یکی از مولفه های آن توانستیم انرژی های مورد نظر خود را به دست بیاوریم. رابطه (۳-۲) مقدار انرژی در واحد حجم را می دهد.

$$(۳-۲) \quad \text{تعداد ضربات} \times \text{ارتفاع سقوط چکش} \times \text{تعداد لایه} \times \text{وزن چکش} \\ = \frac{\text{انرژی در واحد حجم}}{\text{حجم قالب}}$$

داریم که برای افزایش یا کاهش انرژی یا می توان تعداد ضربات را کاهش و افزایش داد و یا حجم قالب، ارتفاع سقوط یا تعداد لایه ها را تغییر داد. ما در این آزمایش با تغییر در تعداد ضربات بر حسب روش استاندارد و یا اصلاح شده انرژی های مورد نظر را اعمال کردیم.

۵-۳ آزمایش تحکیم

وقتی خاک اشباع تحت بارگذاری قرار می گیرد، در آغاز تمام بارگذاری توسط آب حفره ای تحمل می شود و به آن افزایش فشار آب حفره ای می گویند. در صورتی که زهکشی انجام شود، به مرور زمان حجم خاک کاهش می یابد که به آن تحکیم گفته می شود و باعث نشست می گردد. از طرفی ممکن است خاک در اثر جذب آب حفره ای یا فشار آب حفره ای منفی افزایش حجم دهد که به آن تورم می گویند. نرخ تغییر حجم نمونه تحت بارگذاری به نفوذپذیری نمونه بستگی دارد، از این رو آزمایش تحکیم معمولاً در خاک های با نفوذپذیری کم (مانند رس) انجام می گردد.

آزمایش تحکیم در واقع آزمایشی جهت برآورد پارامترهای تحکیم یک بعدی ترزاقی است که از حل همزمان دو معادله تعادل و پیوستگی به صورت تک بعدی حاصل شده است.

پارامترهای مهم خاک که از آزمایش تحکیم به دست می آید یکی اندیس های تراکم است که میزان تراکم پذیری نمونه خاک را مشخص می کند (CC و CI) و دیگری ضریب تحکیم (CV) می باشد که شدت تراکم به علت بارگذاری را تعیین می کند.

برای تعیین میزان نشست خاک ها به علت تحکیم از تئوری تحکیم ترزاقی با فرضیات زیر استفاده می گردد:

۱- خاک همگن است

۲- خاک اشباع است

۳- زهکشی و تراکم یک بعدی است

۴- خواص خاک ثابت است

۵- منحنی $e-\log p$ یک خط راست را تشکیل دهد

هدف از انجام آزمایش تحکیم، تعیین پارامترهای موثر در پیش بینی شدت نشست و میزان آن در سازه‌های

متکی بر خاک های رسی است.

این آزمایش طبق استاندارد ASTM D 2435 انجام گردید.



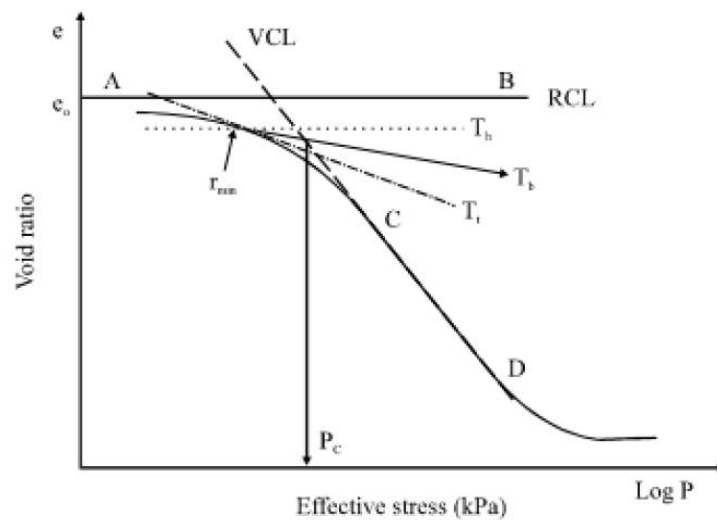
شکل ۳-۵. دستگاه تحکیم مورد استفاده در آزمایش تحکیم یک بعدی

۱-۵-۳ روش محاسبه تنش پیش تحکیمی

در این پژوهش برای محاسبه تنش پیش تحکیمی دو روش مورد استفاده قرار گرفت. که در زیر به شرح و مقایسه آنها پرداخته شده است.

۳-۵-۱-۱ روش کاساگرانده (۱۹۳۶)

در حال حاضر روش گرافیکی ارائه شده توسط کاساگرانده به عنوان یک روش استاندارد و رایج برای محاسبه تنش پیش تحکیمی مورد استفاده قرار می گیرد. کاساگرانده این روش را به صورت تجربی از آزمایشات فراوانی که بر روی انواع مختلف خاک ایجاد کرد، با یک دقت رضایت بخش انتخاب کرد. شکل (۶-۳) روش کاساگرانده که داده های آن از آزمایش تک محوری بدست آمده اند را نشان می دهد. ابتدا موقعیت خط فشردگی دست-نخورده با تعداد کافی از نقاط، تعیین شد (VLC). سپس در شاخه پیشین نقطه ای که کمترین شعاع انحناء را دارد مشخص شد (T). از این نقطه یک خط موازی با محور افق (Th) و یک خط مماس (Tt) رسم و بعد نیمساز بین این دو خط کشیده شد (Tb). محل تلاقی این نیمساز و خط فشردگی رسم شده اولیه (VCL) تعیین شد. این نقطه تقریباً مطابق با تنش پیش تحکیمی در محور افقی (تنش موثر) است. RCL خط فشردگی رگرسیونی است که موازی با محور X در مقدار اندازه گیری شده ی نسبت تخلخل اولیه کشیده می شود.

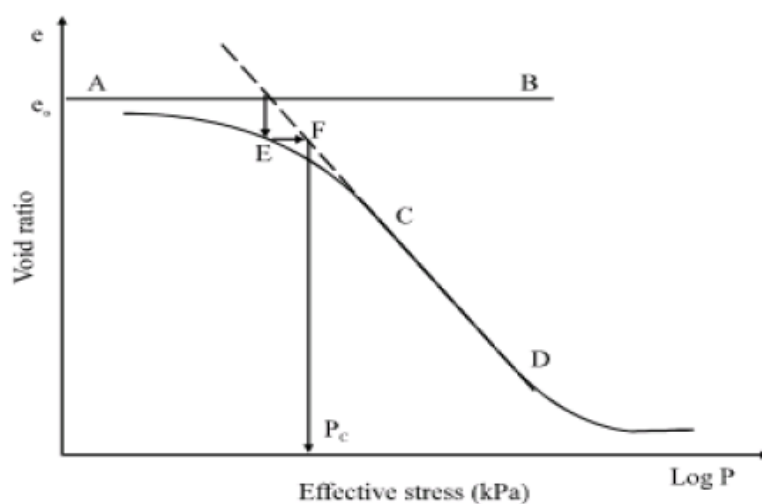


شکل ۳-۶. محاسبه تنش پیش تحکیمی به روش کاساگرانده

۳-۵-۱-۲ روش سیلوا (۱۹۷۰)

روش دیگری برای تعیین تنش پیش تحکیمی توسط سیلوا پیشنهاد شد که به طور گسترده در برزیل مورد استفاده قرار گرفت. همانند روش کاساگرانده، روش سیلوا نیز دارای یک ساختار تجربی از منحنی $e-\log p$ بوده که e نسبت تخلخل و P تنش موثر عمودی است. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است تنش پیش تحکیمی از داده‌های آزمایش ادئومتر در قالب نمودار تعیین شد.

ابتدا خط افقی (AB) در مقدار نسبت تخلخل اولیه (e_0) کشیده شد. خط فشردگی دست نخورده که با خط تیره نمایش داده شده را رسم کرده و آن را تا جایی ادامه می‌دهیم که خط AB را قطع کند. از نقطه تلاقی یک خط عمودی رسم شده که منحنی را قطع می‌کند. این نقطه به نام E نمایش داده شده است. از این نقطه یک خط افقی رسم می‌شود که خط فشردگی را در نقطه F قطع می‌کند. مقدار تنش موثر در نقطه F، تنش پیش تحکیمی است.



شکل ۳-۷. محاسبه تنش پیش تحکیمی به روش سیلوا

۳-۵-۱-۳ مقایسه دو روش

روش کاساگرانده به خاطر تغییرات در پیدا کردن نقطه ماکزیمم انحنا از شخصی به شخص دیگر وابسته به فرد است. این مشکل توسط سیلوا حل شد. مقادیر به دست آمده تنش پیش تحکیمی به روش سیلوا وابسته به افراد نیست. بنابراین این مقادیر همیشه یکسان خواهند بود و مستعد خطا نیستند. همچنین روش سیلوا به مقیاس رسم بستگی ندارد در حالیکه روش کاساگرانده به مقیاس وابسته است.

۳-۶ نتیجه گیری

در این فصل، روش انجام آزمایش‌های شاخص و مشخصات اولیه خاک ارائه شد. همچنین مشخصات دستگاه‌های مورد استفاده، روند انجام آزمایش‌ها و متغیرهای مورد بررسی معرفی شد. در فصل آینده، نتایج آزمایش‌های ارائه شده و به تفسیر و تحلیل آن‌ها پرداخته خواهد شد.

فصل چهارم

تحليل نتايج

۴-۱ مقدمه

در فصل قبل پارامترهای شناسایی خاک مورد آزمایش قرار گرفت و پس از اتمام آزمایش‌های مربوط به یافتن حد روانی خاک و همچنین چگالی و دانسیته آن، در این فصل به انجام آزمایش‌های تراکم و تحکیم و همچنین تعیین تنش پیش‌تحکیمی به روشهای مختلف پرداخته خواهد شد.

خاک شناسایی شده در ابتدا با پنج گروه انرژی‌های مختلف متراکم شده و پس از دستیابی به رطوبت بهینه، دوباره در همان رطوبت عمل تراکم انجام شد. سپس با نمونه‌گیری، این خاک‌ها مورد آزمایش تحکیم قرار گرفتند. در پایان و پس از دستیابی به پارامترهای تحکیم و ترسیم نمودار، تنش پیش‌تحکیمی به دو روش کاساگرانده و سیلوا تعیین شد و مورد مقایسه قرار گرفت.

۴-۲ محاسبه انرژی تراکم

برای اینکه بتوان تغییرات تنش پیش‌تحکیمی را با مقدار انرژی تراکم مقایسه کرد لازم است که علاوه بر دو آزمایش رایج تراکم، در سایر انرژی‌ها نیز به بررسی این پارامتر پرداخت.

همانطور که در فصل قبل بیان شد انرژی تراکم از فرمول ۲-۳ به دست می‌آید. داریم که برای افزایش یا کاهش انرژی، می‌توان تعداد ضربات را افزایش و کاهش داد و یا حجم قالب، ارتفاع سقوط یا تعداد لایه‌ها را تغییر داد. از آنجا که هدف مقایسه انرژی تراکم است لذا یک بار آزمایش استاندارد را با تعداد ضربات کمتر (۱۳ ضربه) انجام داده و بار دیگر آزمایش اصلاح شده (که در حالت عادی انرژی تراکم بیشتری دارد) را با تعداد ضربات بیشتر (۴۰ ضربه) انجام می‌دهیم. در ادامه آزمایش سوم را به صورت حد وسط انرژی تراکم در دو آزمایش انجام داده که برای این کار آزمایش اصلاح شده با ۱۵ ضربه مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج مربوط به انرژی تراکم انتخاب شده با توجه به فرمول ۲-۳ در جدول ۴-۱ آمده است. با تغییر انرژی تراکم، منحنی تراکم نیز تغییر پیدا می‌کند. شایان ذکر است آزمایشات بر مبنای انرژی تراکم از کم به زیاد به ترتیب شماره ۱ الی ۵ را اتخاذ کرده و بدین سبب آزمایش شماره دو دارای انرژی تراکمی برابر با تراکم استاندارد و آزمایش شماره ۴ دارای انرژی تراکمی برابر با آزمایش اصلاح شده خواهد بود. در ادامه نحوه به دست آمدن پنج انرژی متفاوت مورد نظر از رابطه (۲-۳)، آورده شده است.

$$E_1 = \frac{24.4N \times 3 \times 0.31M \times 13}{944cm^3} = 312 \left(\frac{KN.m}{m^3} \right)$$

$$E_2 = \frac{24.4N \times 3 \times 0.31M \times 25}{944cm^3} = 600 \left(\frac{KN.m}{m^3} \right)$$

$$E_3 = \frac{44.5N \times 5 \times 0.46M \times 15}{944cm^3} = 1620 \left(\frac{KN.m}{m^3} \right)$$

$$E_4 = \frac{44.5N \times 5 \times 0.46M \times 25}{944cm^3} = 2700 \left(\frac{KN.m}{m^3} \right)$$

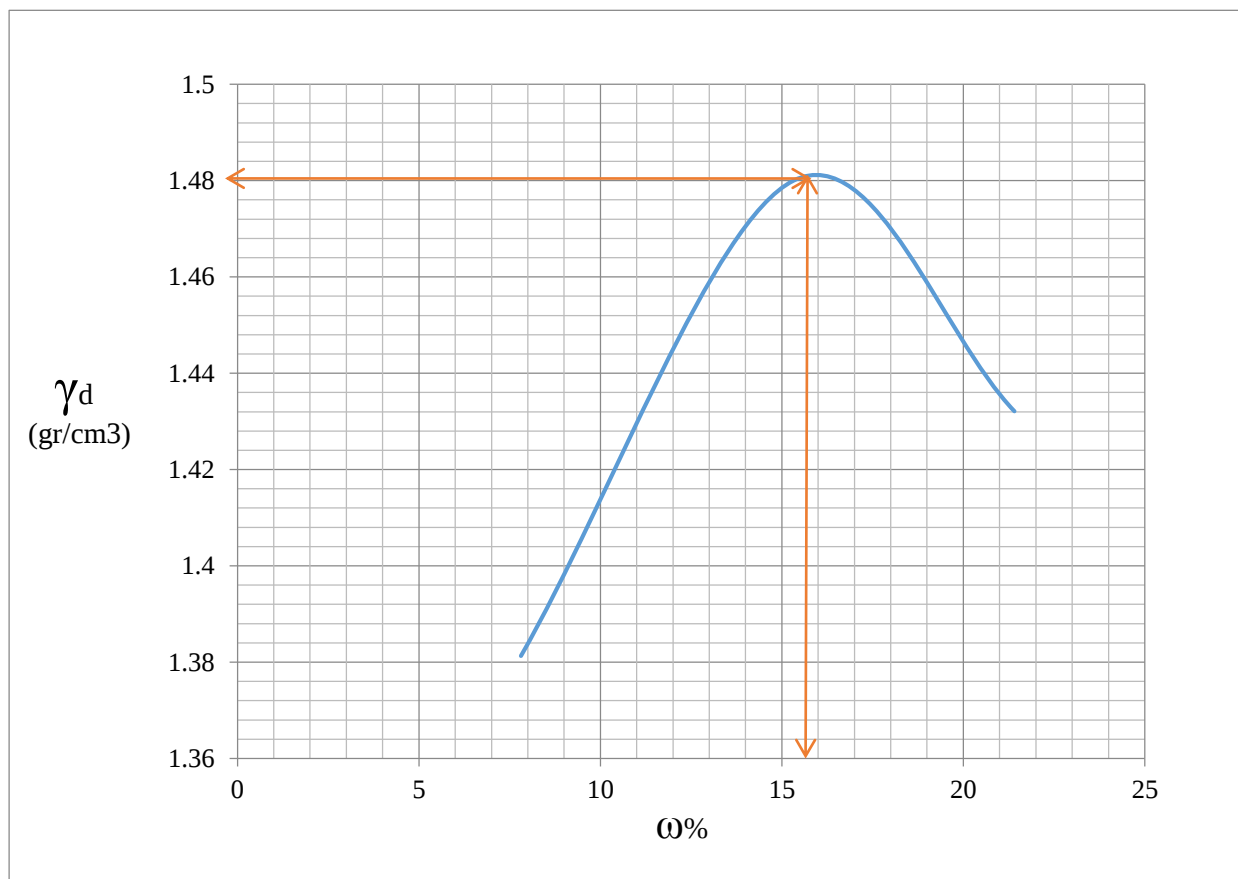
$$E_5 = \frac{44.5N \times 5 \times 0.46M \times 40}{944cm^3} = 4320 \left(\frac{KN.m}{m^3} \right)$$

جدول ۴-۱. انرژی تراکم‌های مختلف مورد آزمایش

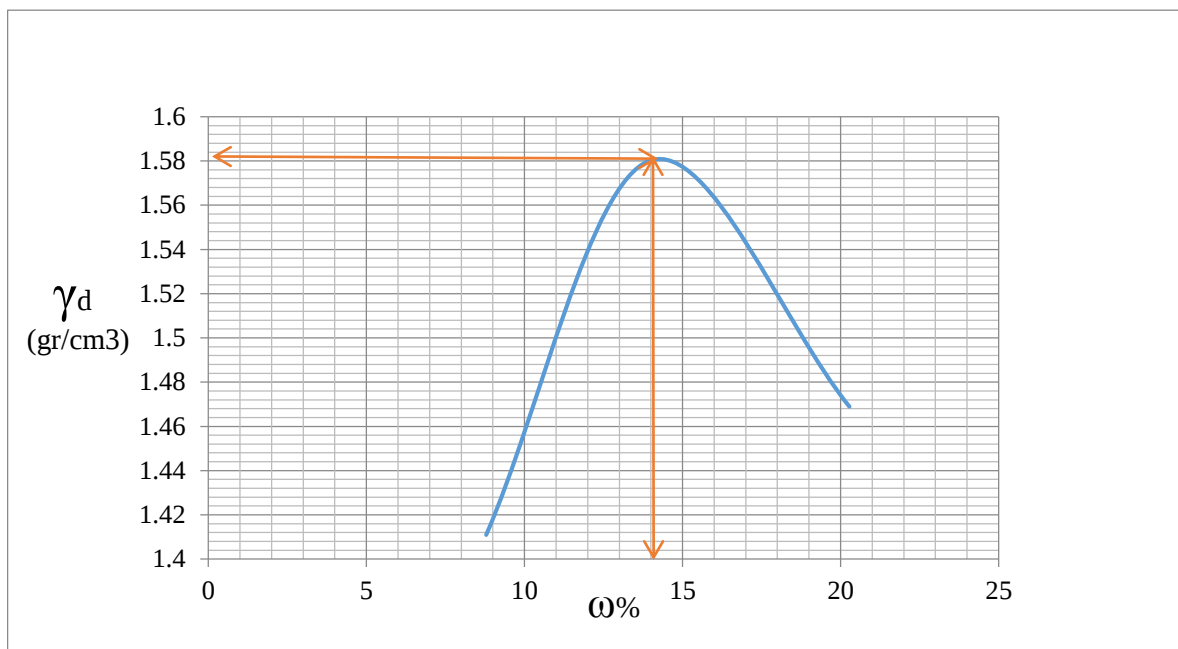
شماره آزمایش	نام آزمایش	انرژی تراکم kN.m/m ³
۱	آزمایش تراکم استاندارد با ۱۳ ضربه	۳۱۲
۲	آزمایش تراکم استاندارد با ۲۵ ضربه	۶۰۰
۳	آزمایش تراکم اصلاح شده با ۱۵ ضربه	۱۶۲۰
۴	آزمایش تراکم اصلاح شده با ۲۵ ضربه	۲۷۰۰
۵	آزمایش تراکم اصلاح شده با ۴۰ ضربه	۴۳۲۰

۳-۴ نتایج حاصل از آزمایش تراکم در انرژی‌های مختلف

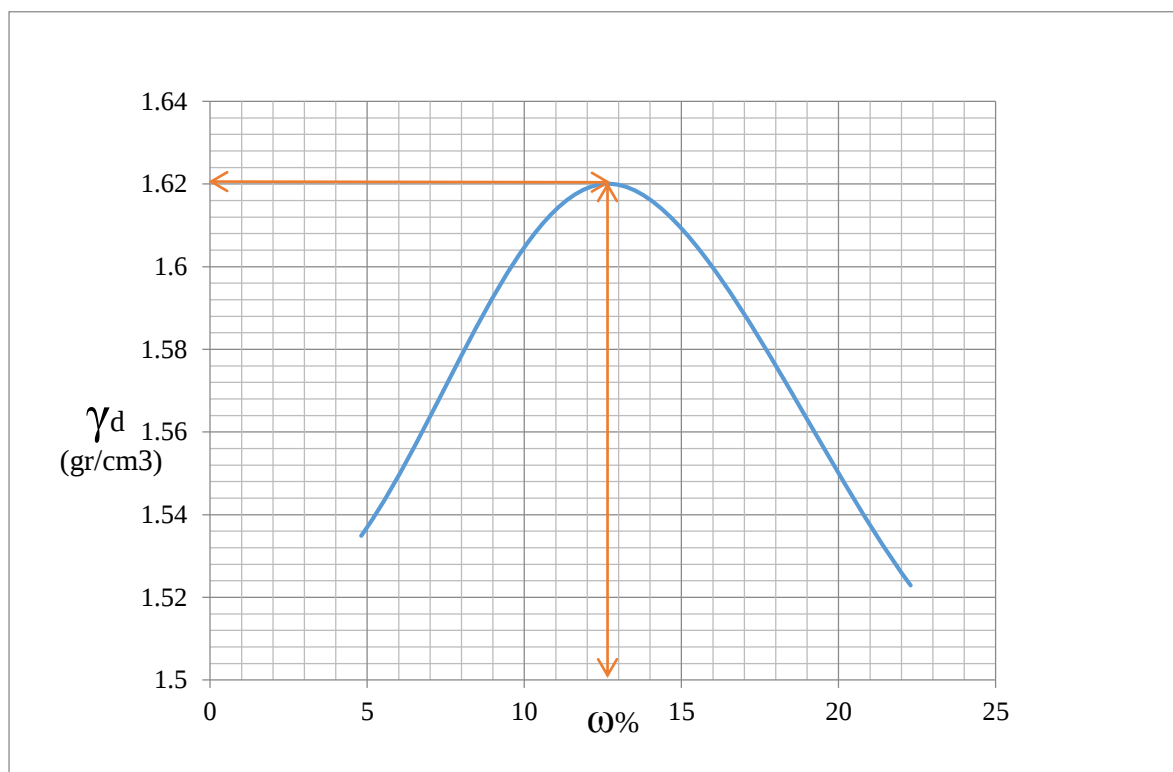
در ادامه شکل‌های (۴-۱) الی (۴-۵) منحنی‌های تراکم حاصل از پنج آزمایش تراکم با انرژی‌های متفاوت را به ترتیب نشان می‌دهد.



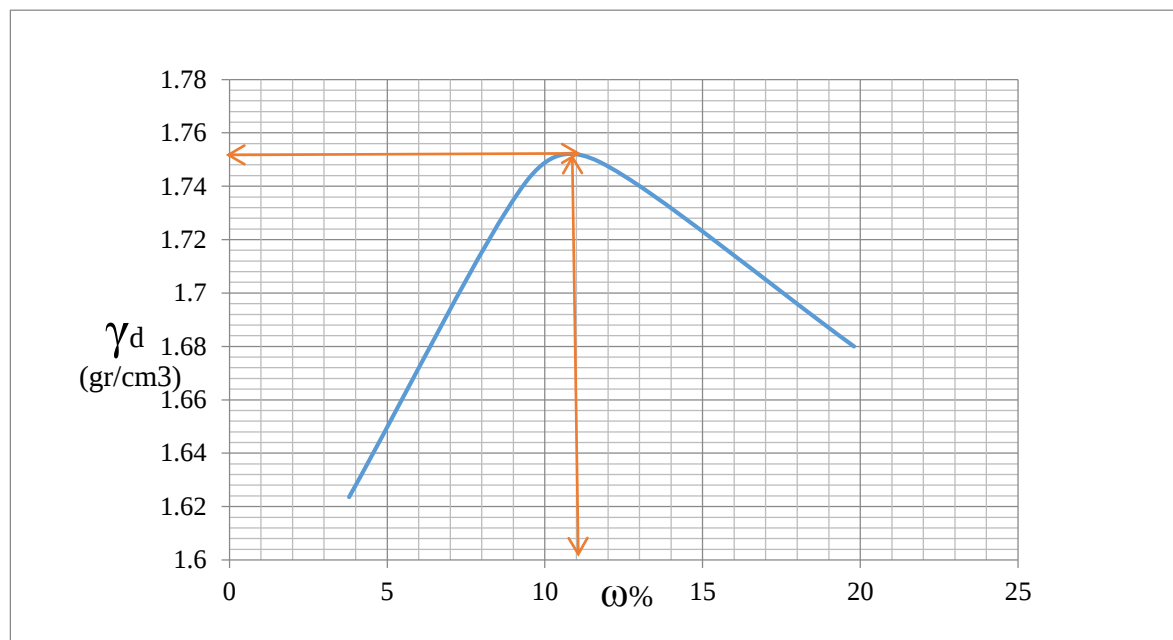
شکل ۴-۱. نمودار آزمایش تراکم خاک با انرژی ۳۱۲ kN.m/m^3



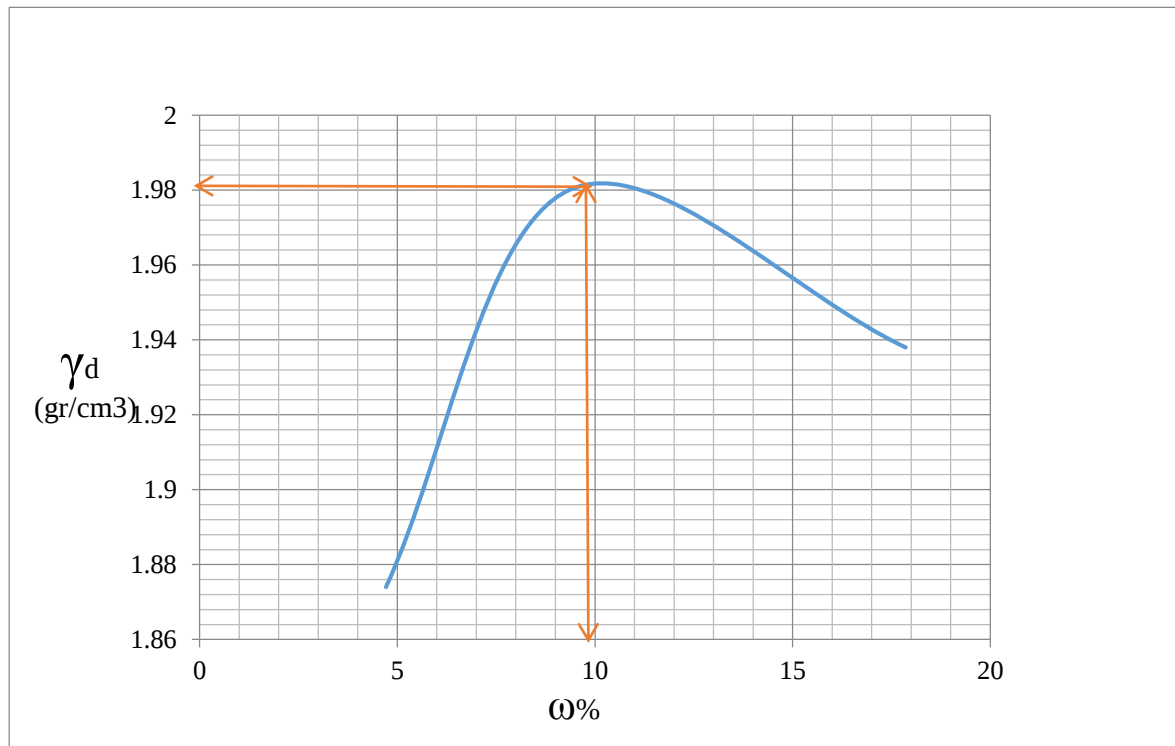
شکل ۴-۲. نمودار آزمایش تراکم خاک با انرژی ۶۰۰ kN.m/m³



شکل ۴-۳. نمودار آزمایش تراکم خاک با انرژی ۱۶۲۰ kN.m/m³



شکل ۴-۴. نمودار آزمایش تراکم با انرژی ۲۷۰۰ kN.m/m³



شکل ۴-۵. نمودار آزمایش تراکم با انرژی ۴۳۲۰ kN.m/m³

جدول (۲-۴) مقادیر رطوبت بهینه و دانسیته خشک حداکثر به دست آمده از آزمایش تراکم با کلیه انرژی های اعمالی انتخاب شده را نشان می دهد.

جدول ۲-۴. مقادیر رطوبت بهینه و دانسیته خشک حداکثر به دست آمده از آزمایش تراکم

	1	2	3	4	5
E (kN.m/m³)	۳۱۲	۶۰۰	۱۶۲۰	۲۷۰۰	۴۳۲۰
ω (%)	15.33	14.05	12.82	11	9.34
γ_d (g/cm³)	1.48	1.58	1.62	1.75	1.98

۴-۴ تحکیم

بعد از پایان آزمایش تراکم بر روی نمونه های اخذ شده جهت تعیین تنش پیش تحکیمی آزمایش تحکیم مطابق استاندارد انجام شد.

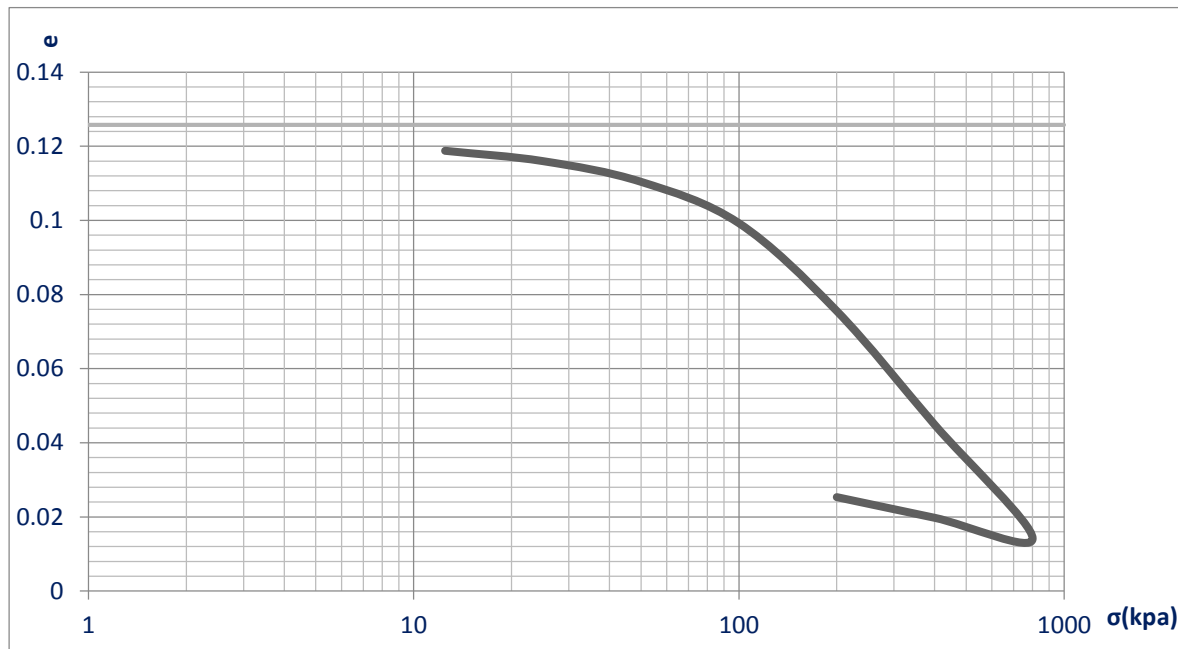
بنابراین ابتدا با استفاده از نمونه گیر از خاک متراکم شده در قالب تراکم نمونه مناسب تهیه شده و سریعاً به دستگاه تحکیم منتقل شده تا رطوبت آن تغییری نکند. سپس دستگاه بر روی فشارهای اولیه قرار گرفته و هر ۲۴ ساعت یکبار این نیرو دو برابر خواهد شد. در هر گام بارگذاری میزان تغییر شکل در طی ۲۴ ساعت یادداشت شده است. نکته شایان ذکر دیگر این است که برای افزایش دقت در محاسبات هر آزمایش دو بار انجام شده و در صورت وجود اختلاف بیش از ۵ درصد در نتایج آزمایش سوم مبنا قرار گرفته است، که خوشبختانه به دلیل همگرایی نتایج در تمامی موارد میانگین دو آزمایش اول به عنوان مقدار نهایی ملاک قرار گرفته است.

۴-۴-۱ نمونه گیری صحیح

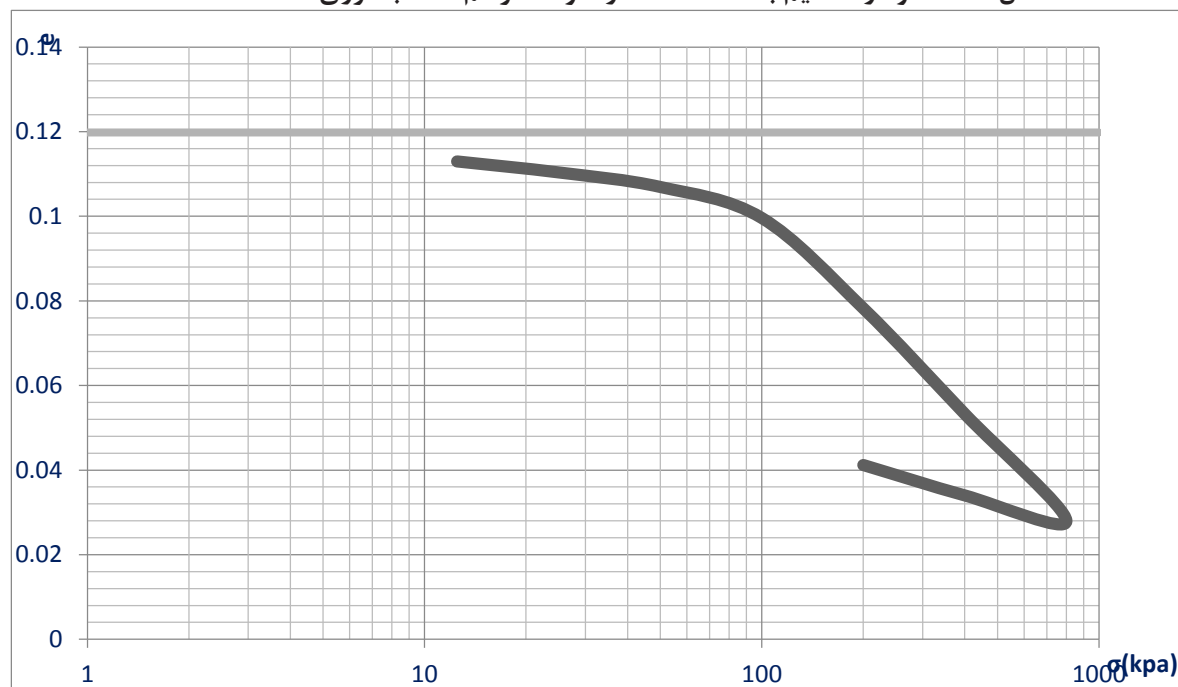
اصولاً دو روش اصلی برای نمونه گیری از قالب انرژی تراکم وجود داشته است نخست آنکه از طریق استفاده از نمونه گیرهای مخصوص، نمونه ی مناسب را برداشت کرده و بلافاصله آن را درون دستگاه تحکیم قرار دهیم و روش دوم اینکه با توجه به اینکه نمونه ما تحت انرژی خاص متراکم شده و رطوبت بهینه در آن همواره می بایست منجر به رسیدن به نمونه ی واحدی شود، از این رو از روش «بازسازی نمونه ها» و ایجاد نمونه جدید استفاده کرد. در اینجا به دلیل کاهش در هزینه های آزمایش، به کمک تکنسین های با تجربه از روش نخست استفاده شده و نمونه های مناسب مستقیماً وارد دستگاه تحکیم می شوند.

۴-۴-۲ نتایج حاصل از آزمایش تحکیم

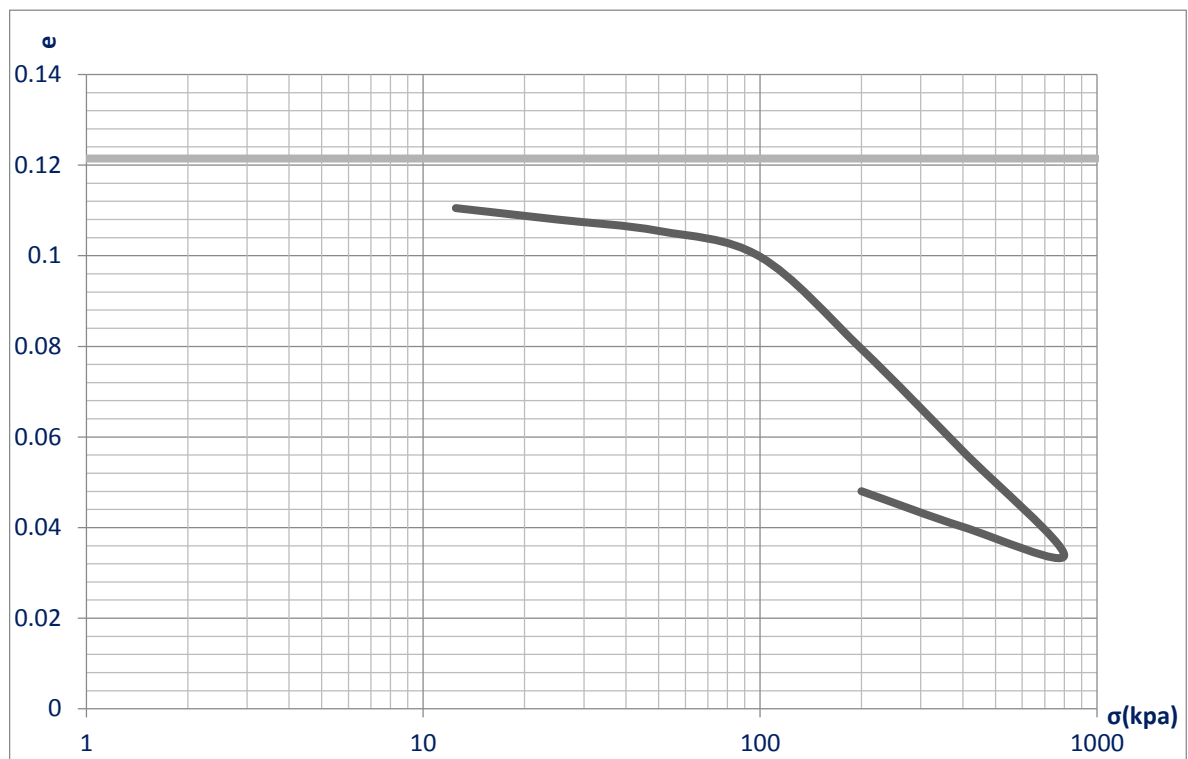
شکل های (۴-۶) الی (۴-۱۰) گراف های به دست آمده از آزمایش های تحکیم را نشان می دهد.



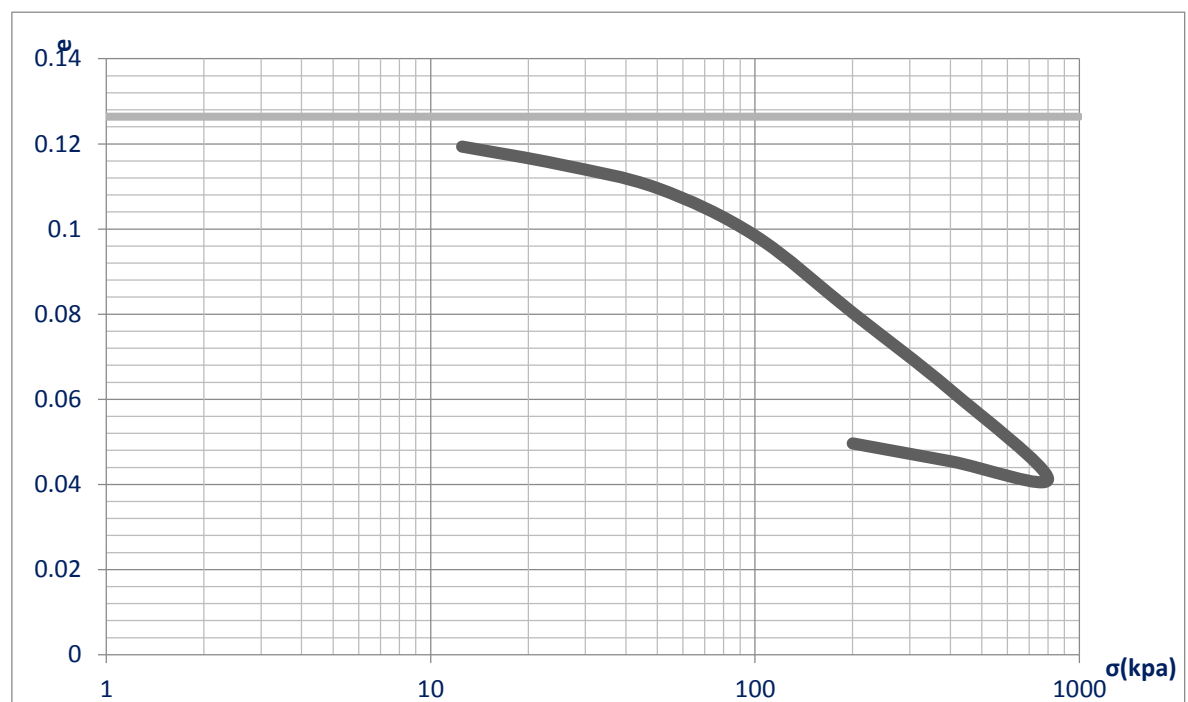
شکل ۴-۶. نمودار تحکیم به دست آمده از نمونه متراکم شده با انرژی ۳۱۲ kN.m/m³



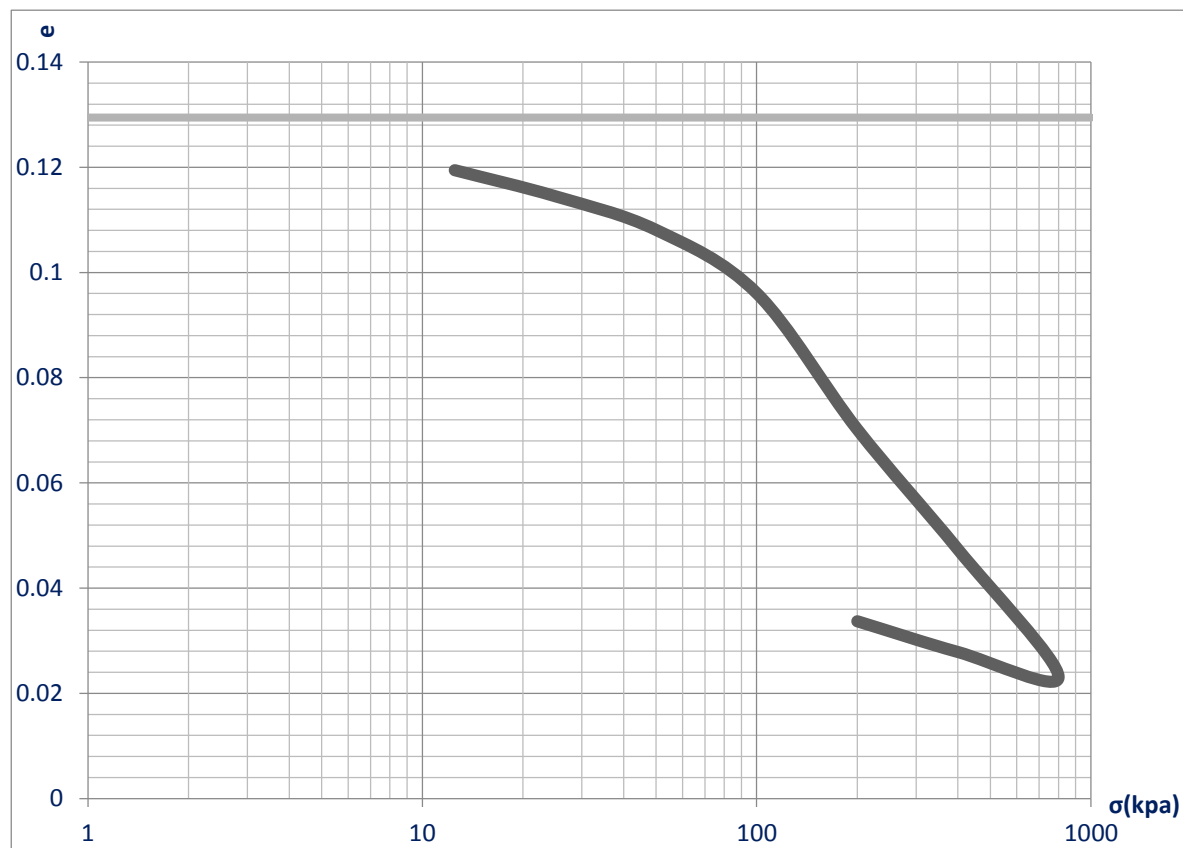
شکل ۴-۷. نمودار تحکیم به دست آمده از نمونه متراکم شده با انرژی ۶۰۰ kN.m/m³



شکل ۴-۸. نمودار تحکیم به دست آمده از نمونه متراکم شده با انرژی 1620 kN.m/m^3



شکل ۴-۹. نمودار تحکیم به دست آمده از نمونه متراکم شده با انرژی 2700 kN.m/m^3



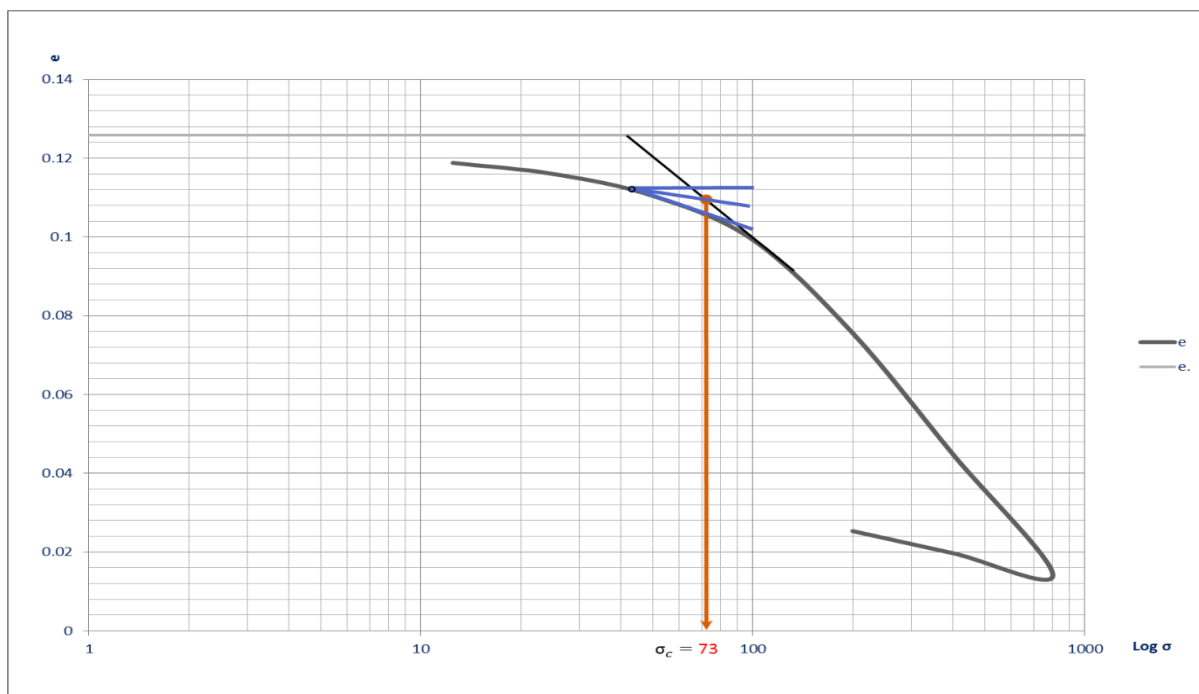
شکل ۴-۱۰. نمودار تحکیم به دست آمده از نمونه متراکم شده با انرژی 4320 kN.m/m^3

۴-۵ تعیین تنش پیش تحکیمی به روش کاساگرانده و نتایج آزمایش

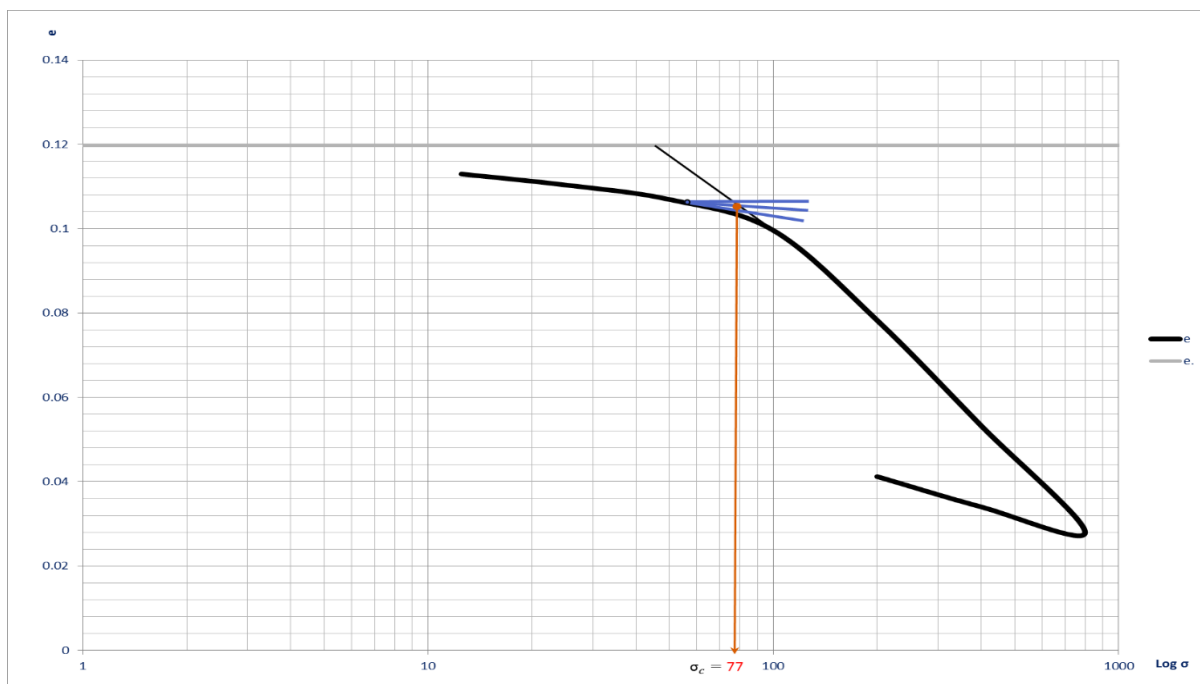
این روش همانطور که در فصل قبل بدان اشاره شد از قدیمی ترین روش‌ها برای تعیین حداکثر فشار وارد شده بر خاک است. در اینجا نمونه‌های حاصل از تحکیم پس از پایان زمان مربوطه، و از طریق داده‌های جدولی مربوط به قرائت‌ها به روش کاساگرانده مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

۴-۵-۱ محاسبه نتایج

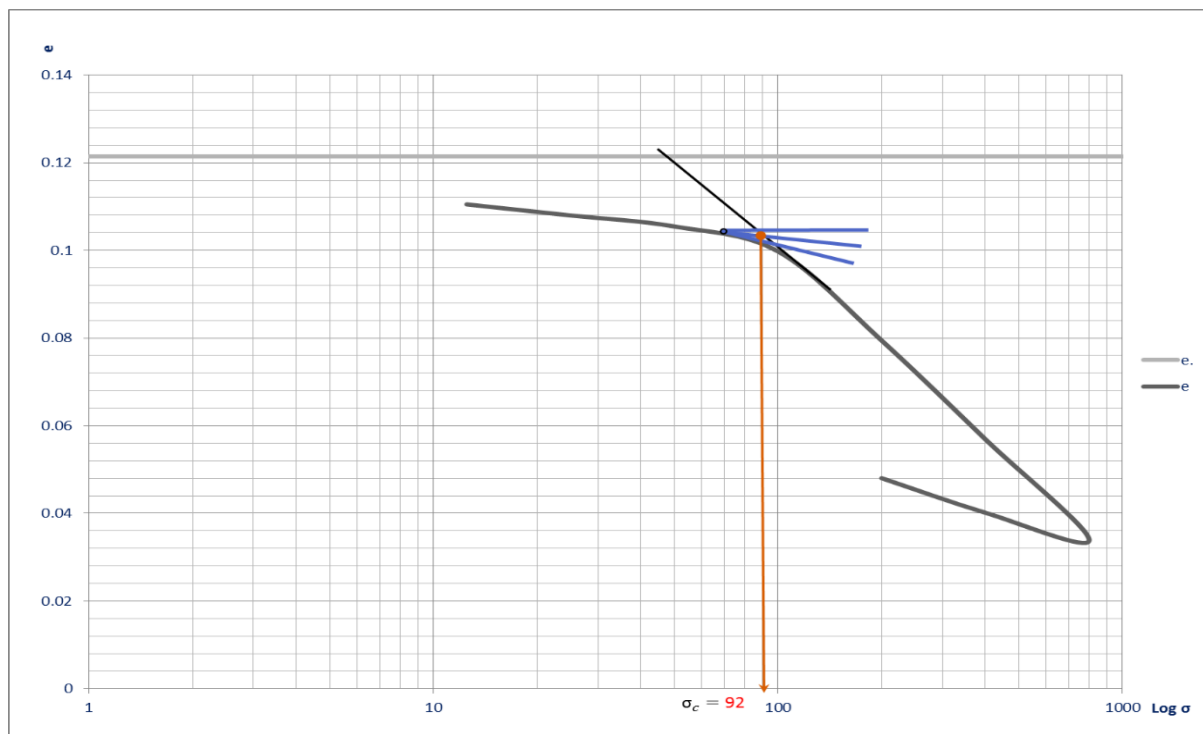
شکل های ۴-۱۱ الی ۴-۱۵ نمودار مربوط به آزمایش‌های شماره ۱ الی ۵ و جدول (۴-۳) تنش های پیش تحکیمی به دست آمده از روش کاساگرانده را نشان می دهند.



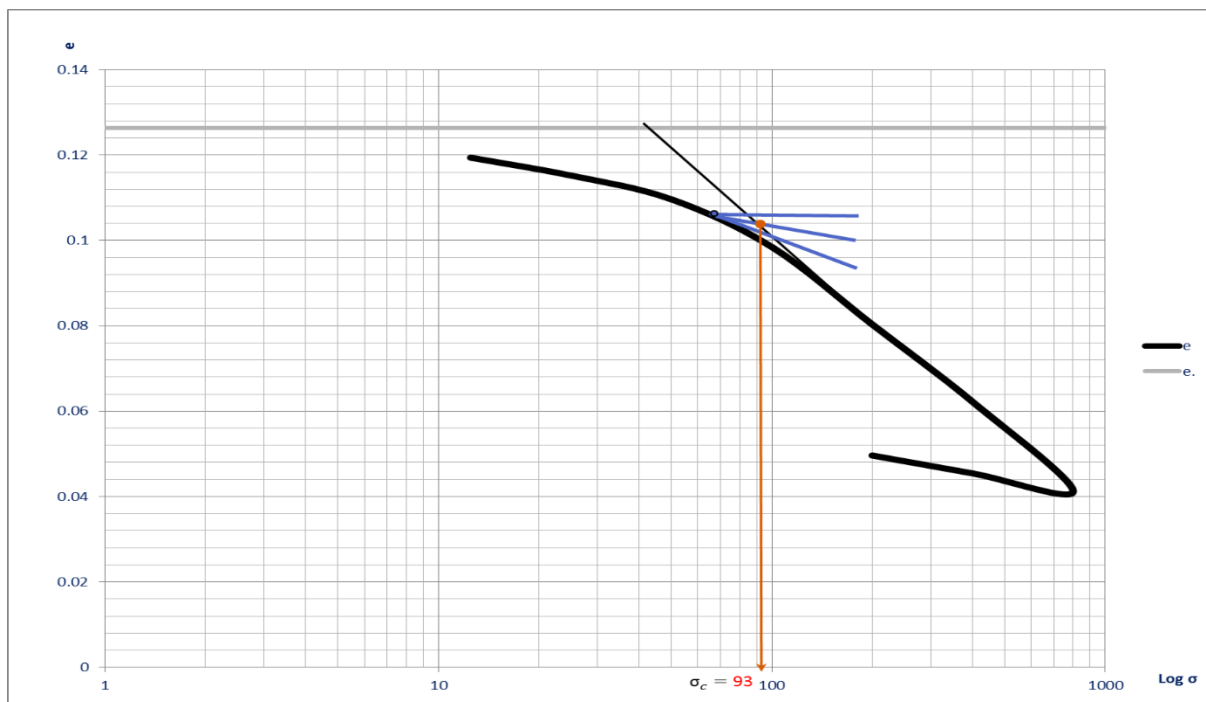
شکل ۴-۱۱. تعیین تنش پیش تحکیمی به روش کاساگرانده از نمودار تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی 312 kN.m/m^3



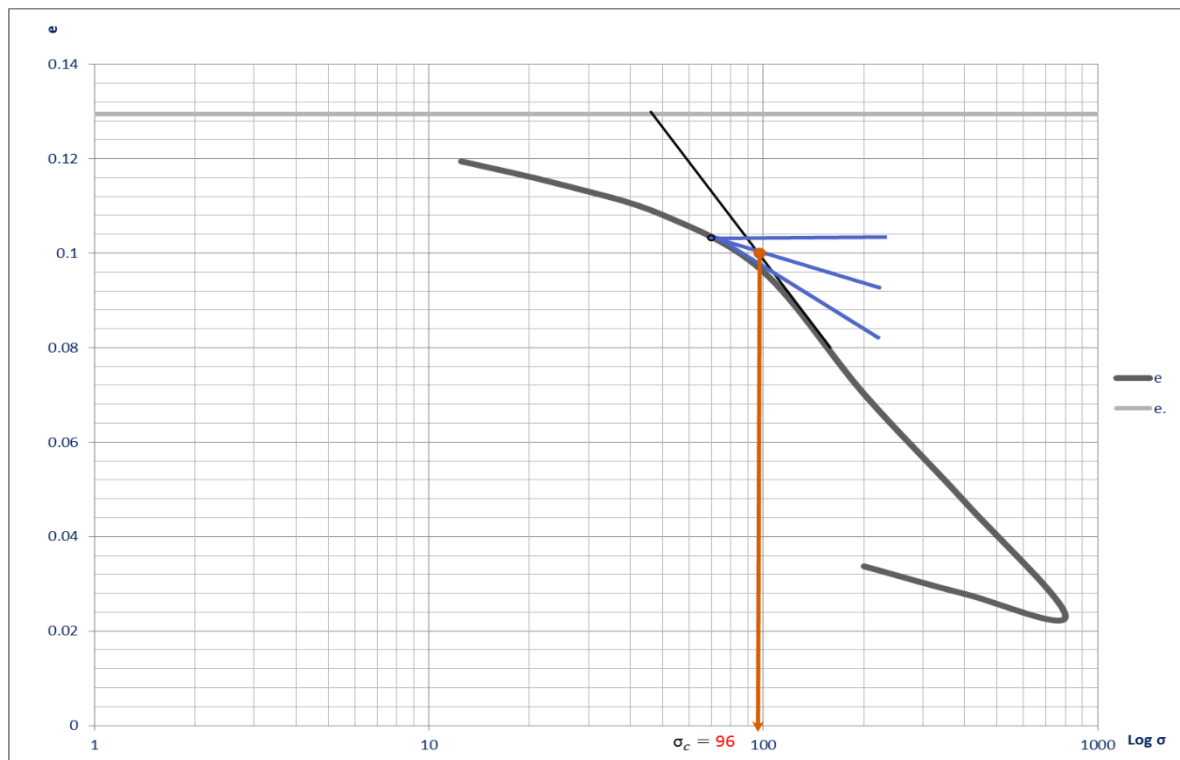
شکل ۴-۱۲. تعیین تنش پیش تحکیمی به روش کاساگرانده از نمودار تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی 600 kN.m/m^3



شکل ۴-۱۳. تعیین تنش پیش تحکیمی به روش کاساگرانده از نمودار تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی
 ۱۶۲۰ kN.m/m^3



شکل ۴-۱۴. تعیین تنش پیش تحکیمی به روش کاساگرانده از نمودار تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی
 ۲۷۰۰ kN.m/m^3



شکل ۴-۱۵. تعیین تنش پیش تحکیمی به روش کاساگرانده از نمودار تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی ۴۳۲۰ kN.m/m³

جدول ۴-۳. تنش های پیش تحکیمی به دست آمده به روش کاساگرانده

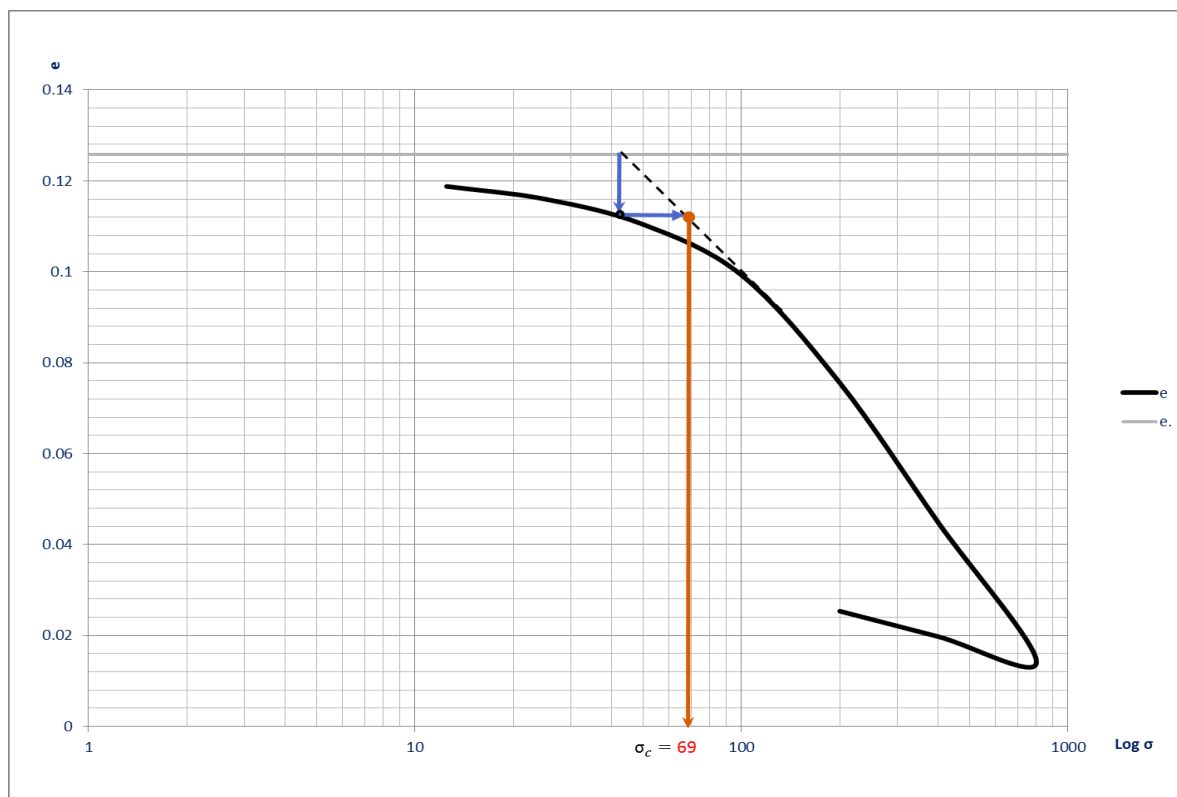
شماره آزمایش	۱	۲	۳	۴	۵
انرژی تراکم kN.m/m ³	۳۱۲	۶۰۰	۱۶۲۰	۲۷۰۰	۴۳۲۰
تنش پیش تحکیمی (kpa)	۷۳	۷۷	۹۲	۹۳	۹۶

۴-۶ تنش پیش تحکیمی به روش سیلوا و نتایج آزمایش

همانطور که در فصل سوم اشاره شد یکی دیگر از روش‌های به دست آوردن مقدار پیش تحکیمی روش سیلوا است که روش جدیدتری بوده و به دفعات در مقالات مختلف و در کتب معتبر مورد استفاده قرار گرفته است.

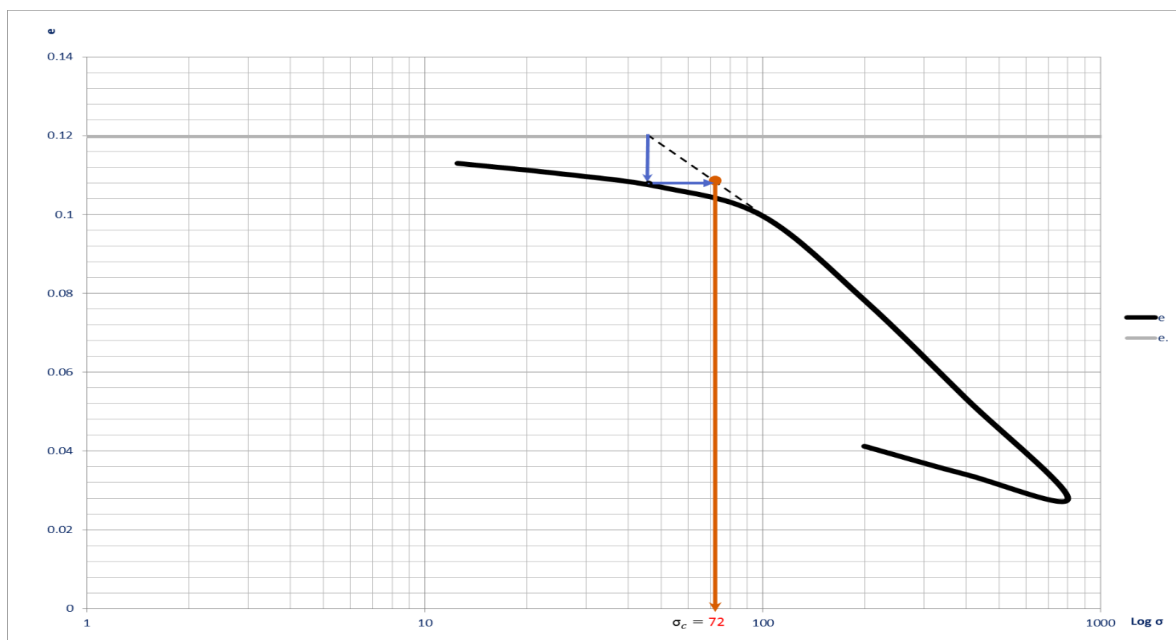
۴-۶-۱ محاسبه نتایج

شکل‌های (۴-۱۶) الی (۴-۲۰) نمودار مربوط به آزمایش‌های شماره ۱ الی ۵ و جدول (۴-۴) تنش‌های پیش تحکیمی به دست آمده از روش سیلوا را نشان می‌دهند.



شکل ۴-۱۶. تعیین تنش پیش تحکیمی به روش سیلوا از نمودار تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی

۳۱۲ kN.m/m³



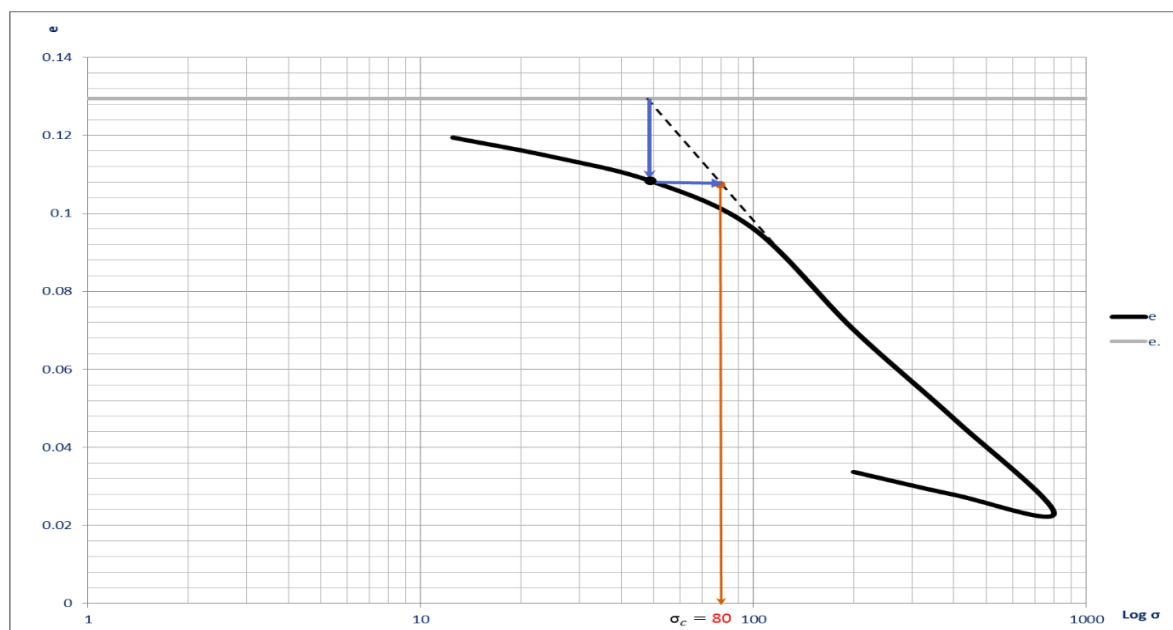
شکل ۴-۱۷. تعیین تنش پیش تحکیمی به روش سیلوا از نمودار تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی ۶۰۰ kN.m/m^3



شکل ۴-۱۸. تعیین تنش پیش تحکیمی به روش سیلوا از نمودار تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی ۱۶۲۰ kN.m/m^3



شکل ۴-۱۹. تعیین تنش پیش تحکیمی به روش سیلوا از نمودار تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی 2700 kN.m/m^3



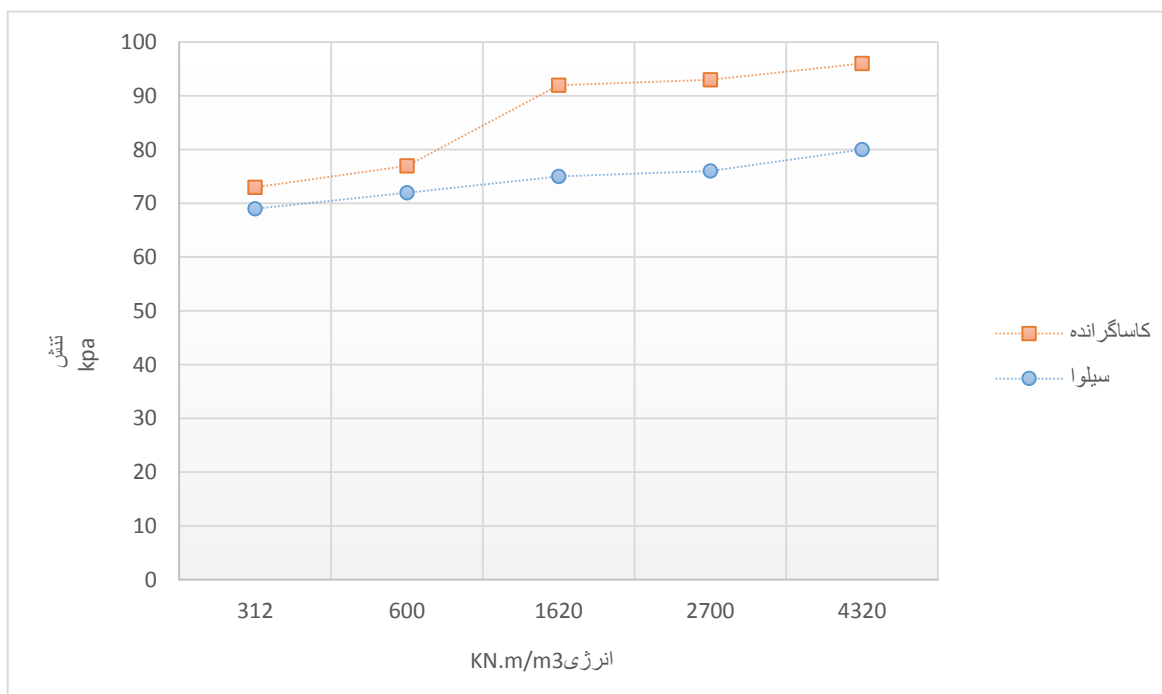
شکل ۴-۲۰. تعیین تنش پیش تحکیمی به روش سیلوا از نمودار تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی 4320 kN.m/m^3

جدول ۴-۴. تنش های پیش تحکیمی به دست آمده به روش سیلوا

شماره آزمایش	۱	۲	۳	۴	۵
انرژی تراکم kN.m/m^3	۳۱۲	۶۰۰	۱۶۲۰	۲۷۰۰	۴۳۲۰
تنش پیش تحکیمی (kpa)	۶۹	۷۲	۷۵	۷۶	۸۰

۴-۷ مقایسه نتایج تنش پیش تحکیمی به دست آمده از دو روش

شکل (۴-۲۱) گراف تنش پیش تحکیمی های به دست آمده از دو روش در انرژی های مورد نظر را نشان می دهد. همانطور که از نمودار پیداست هر دو روش نشان می دهند که با افزایش انرژی تراکم مقدار تنش پیش تحکیمی افزایش می یابد. در فصل بعد به تفسیر کامل نتایج پرداخته خواهد شد



شکل ۴-۲۱. تنش پیش تحکیمی به دست آمده از هر نمونه به دو روش کاساگرانده و سیلوا

۸-۴ پارامترهای جانبی حاصل از آزمایش تحکیم

همانطور که در فصل دوم بیان شد علاوه بر تنش پیش تحکیمی پارامترهای دیگری نیز از نمودار تحکیم قابل برداشت است. پارامترهای شاخص تراکم پذیری (C_c)، ضریب تغییر حجم (m_v) و ضریب تحکیم (C_v) در نتیجه این آزمایشات مورد بررسی قرار گرفت. برای محاسبه C_v از روش ریشه دوم زمان استفاده گردیده است. که بر اساس نمودار نشست بر حسب ریشه دوم زمان متناظر با آن و انجام ساز و کاری که در آن روش آمده است مقدار t_{90} به دست آمد. برای محاسبه پارامتر ضریب تحکیم (C_v) از فرمول زیر استفاده شده است.

$$C_v = \frac{0.848 \times H_{dr}^2}{t_{90}} \quad (۴-۱)$$

برای محاسبه مقدار دو پارامتر دیگر نیز از فرمول های زیر استفاده شده است.

$$m_v = \frac{\Delta H}{H_0 \times \Delta \sigma} \quad (۴-۲)$$

$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma} \quad (۴-۳)$$

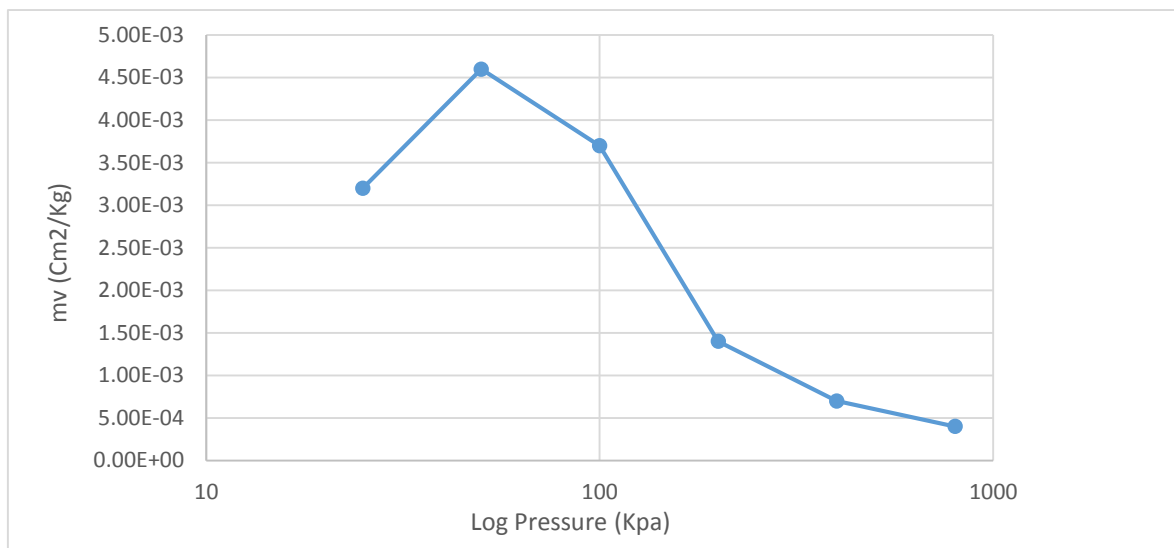
۸-۴-۱ بررسی پارامتر m_v

جدول (۴-۵) ضریب تغییر حجم به دست آمده از آزمایش تحکیم مربوط به هر نمونه متراکم شده با انرژی خاص خود را نشان می دهد که به بررسی آن می پردازیم.

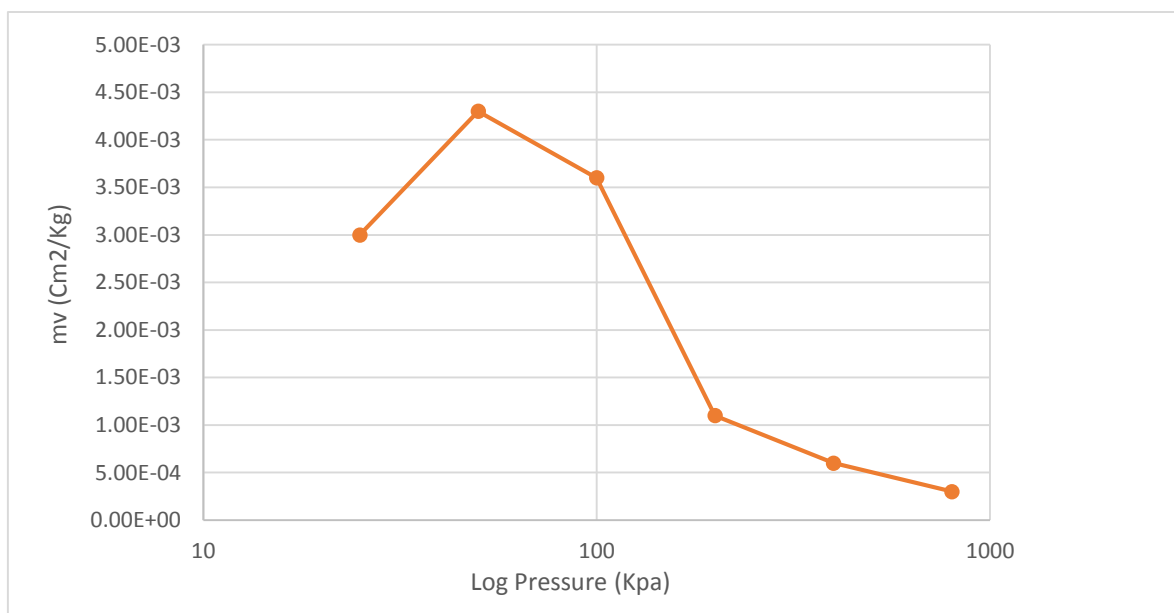
جدول ۴-۵. داده های مربوط به مقادیر m_v در پنج آزمایش مختلف

	E=312 KN.m/m3	E=600 KN.m/m3	E=1620 KN.m/m3	E=2700 KN.m/m3	E=4320 KN.m/m3
stress	mv(1)	mv(2)	mv(3)	mv(4)	mv(5)
25	0.0032	0.003	0.0026	0.0027	0.0023
50	0.0046	0.0043	0.0036	0.0033	0.0031
100	0.0037	0.0036	0.0029	0.0025	0.0027
200	0.0014	0.0011	0.0009	0.0009	0.0006
400	0.0007	0.0006	0.0005	0.0004	0.0004
800	0.0004	0.0003	0.0003	0.0002	0.0001

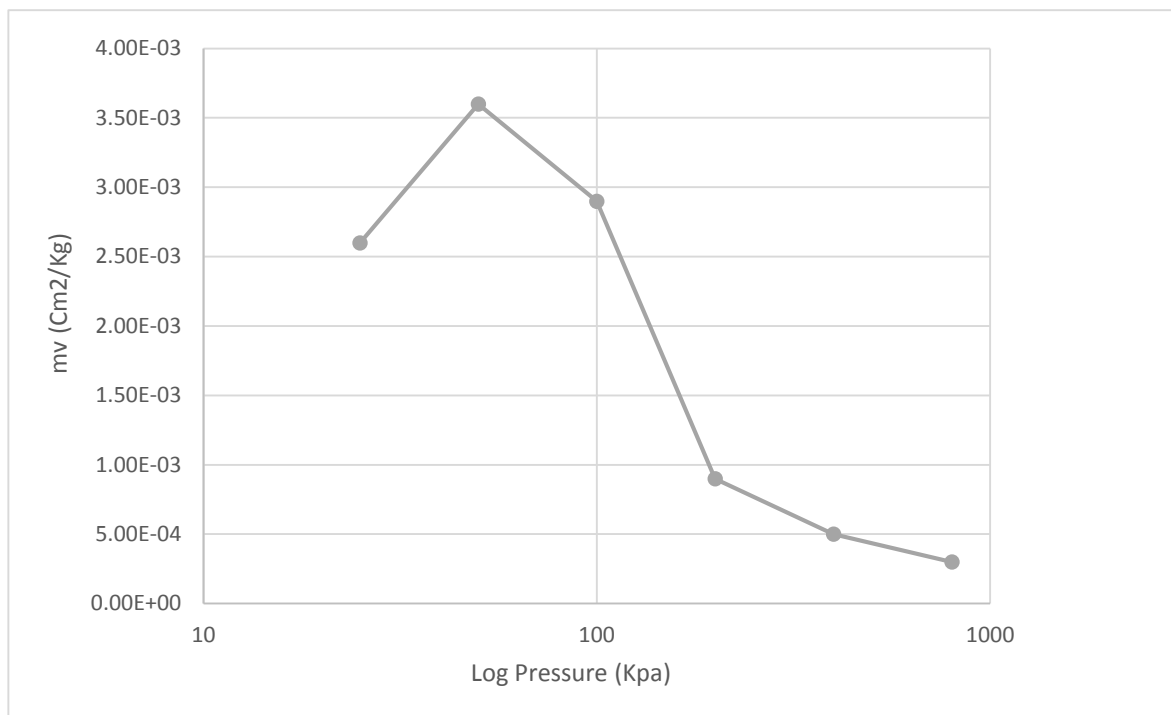
در ادامه اشکال (۴-۲۲) الی (۴-۲۷) به بررسی مقدار m_v در پنج حالت بیان شده در جدول (۴-۴) و نیز مقایسه آنها می پردازد.



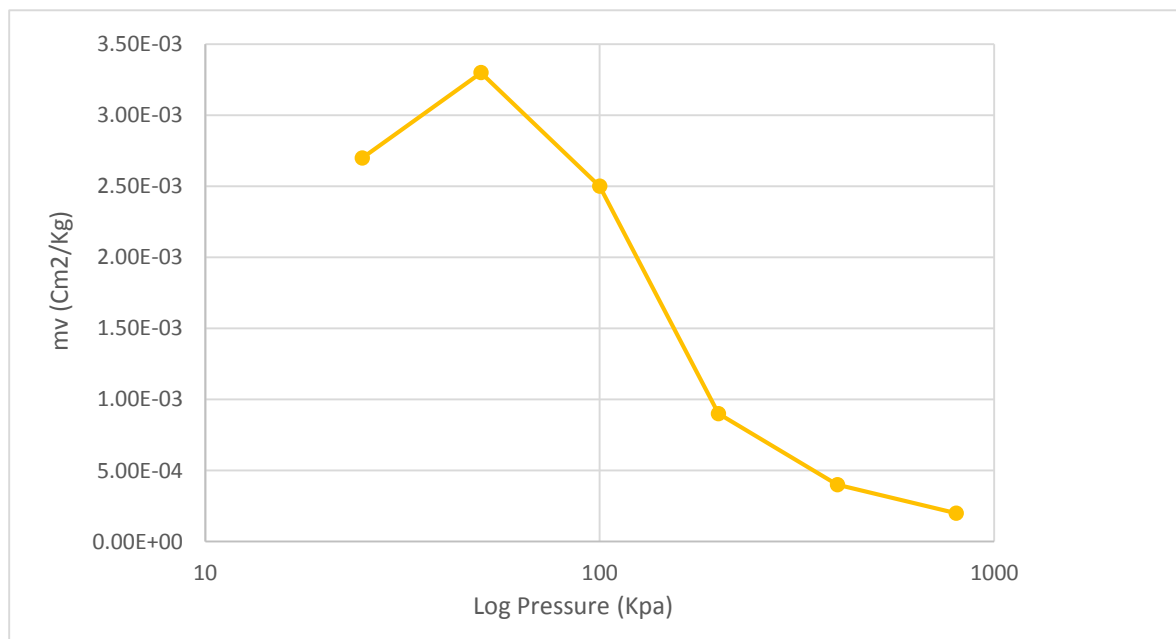
شکل ۴-۲۲. نمودار ضریب تغییر حجم به دست آمده از آزمایش تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی 312 KN.m/m^3



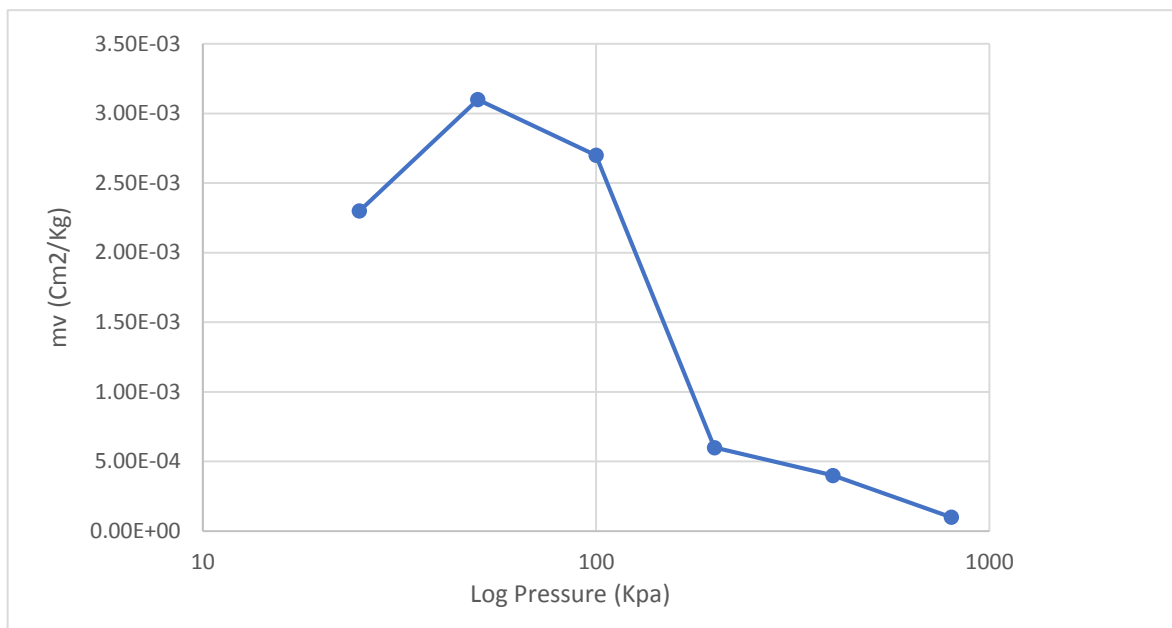
شکل ۴-۲۳. نمودار ضریب تغییر حجم به دست آمده از آزمایش تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی 600 KN.m/m^3



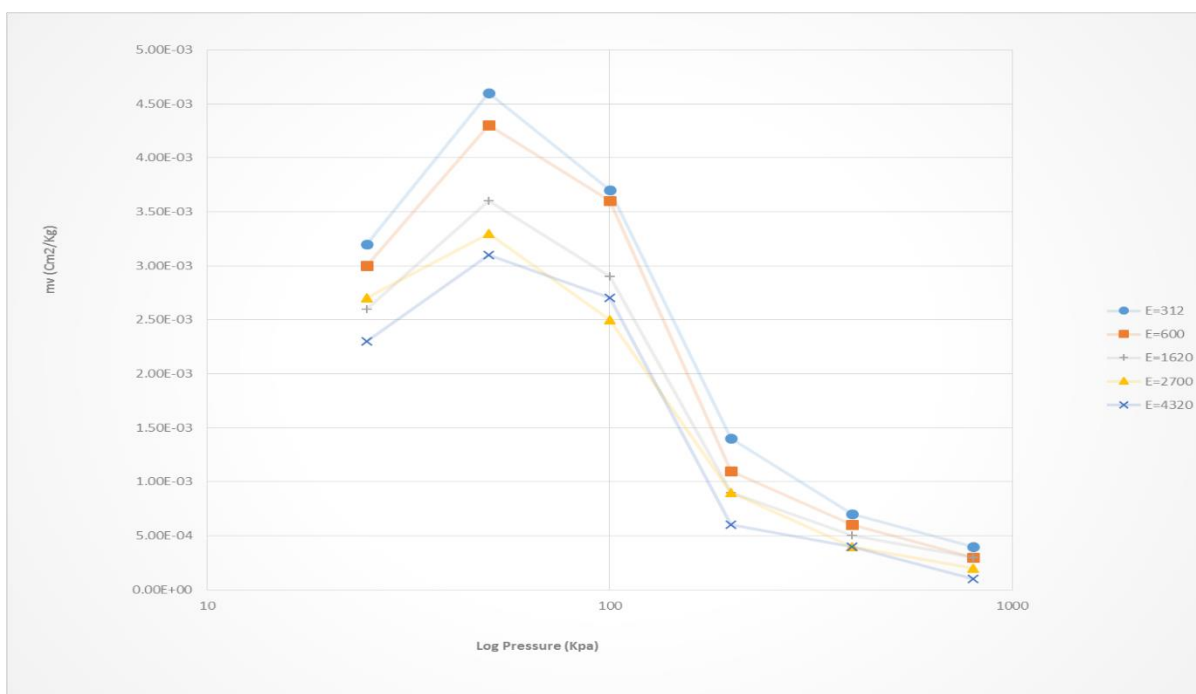
شکل ۴-۲۴. نمودار ضریب تغییر حجم به دست آمده از آزمایش تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی ۱۶۲۰ KN.m/m³



شکل ۴-۲۵. نمودار ضریب تغییر حجم به دست آمده از آزمایش تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی ۲۷۰۰ KN.m/m³



شکل ۴-۲۶. نمودار ضریب تغییر حجم به دست آمده از آزمایش تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی 420 KN.m/m^3



شکل ۴-۲۷. مقایسه ضریب های تغییر حجم به دست آمده از آزمایش تحکیم

۲-۸-۴ بررسی پارامتر C_v

جدول (۴-۶) ضریب تحکیم به دست آمده از آزمایش تحکیم مربوط به هر نمونه متراکم شده با انرژی خاص خود را نشان می دهد که به بررسی آن می پردازیم.

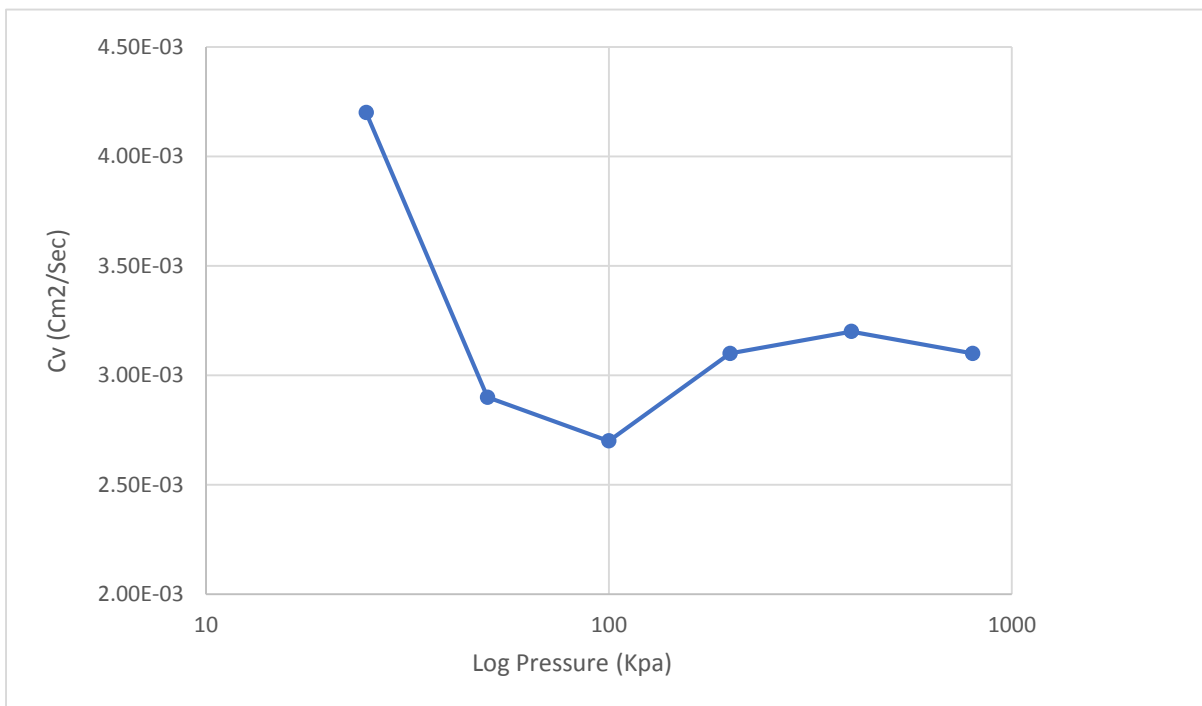
جدول ۴-۶. نمودار مربوط به داده های C_v در آزمایش های مختلف

	E=312 KN.m/m3	E=600 KN.m/m3	E=1620 KN.m/m3	E=2700 KN.m/m3	E=4320 KN.m/m3
stress	cv(1)	cv(2)	cv(3)	cv(4)	cv(5)
25	0.0044	0.0042	0.0045	0.0039	0.0041
50	0.0027	0.0029	0.0032	0.0027	0.0031
100	0.0026	0.0027	0.003	0.0026	0.0031
200	0.0032	0.0031	0.0033	0.003	0.0032
400	0.003	0.0032	0.0035	0.0029	0.0034
800	0.0033	0.0031	0.0035	0.0028	0.003

در ادامه اشکال (۴-۲۸) الی (۴-۳۳) به بررسی مقدار C_v در پنج حالت بیان شده در جدول (۴-۶) و نیز مقایسه آنها می پردازد.



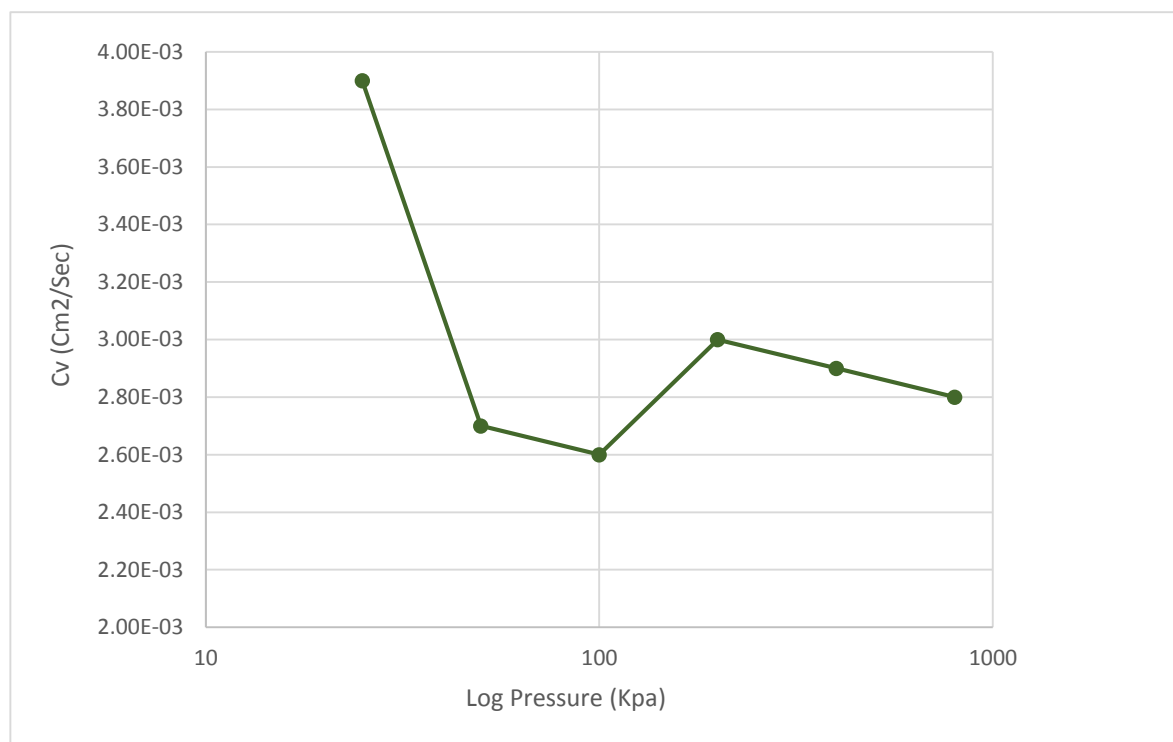
شکل ۴-۲۸. ضریب تحکیم به دست آمده از آزمایش تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی 312 KN.m/m^3



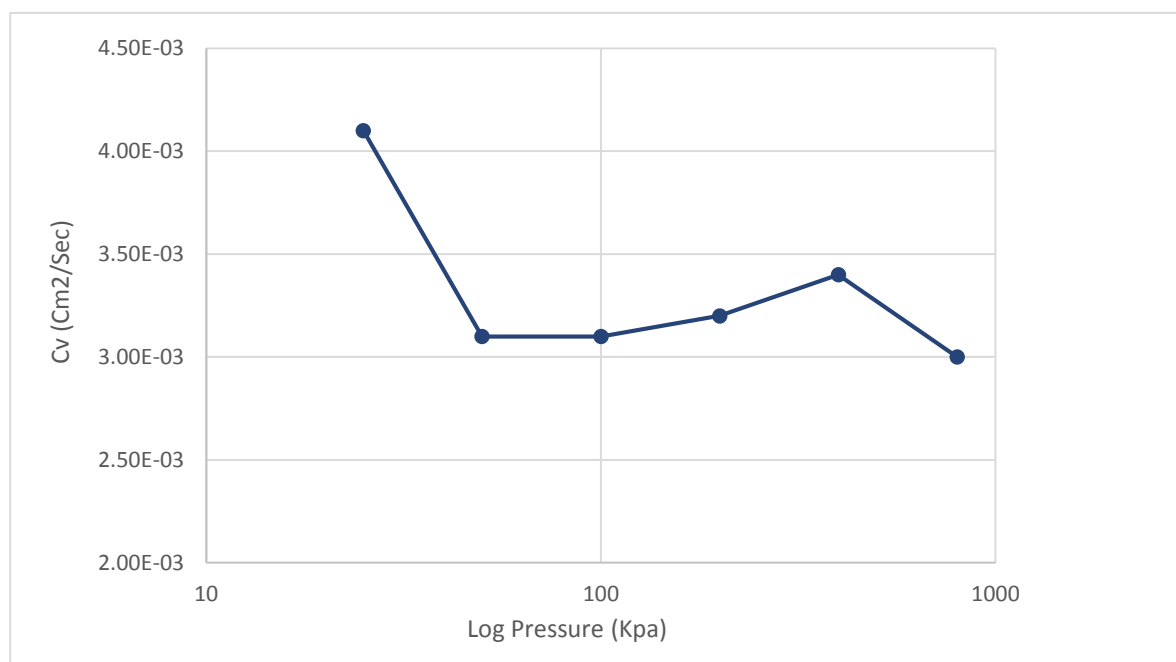
شکل ۴-۲۹. ضریب تحکیم به دست آمده از آزمایش تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی 600 KN.m/m^3



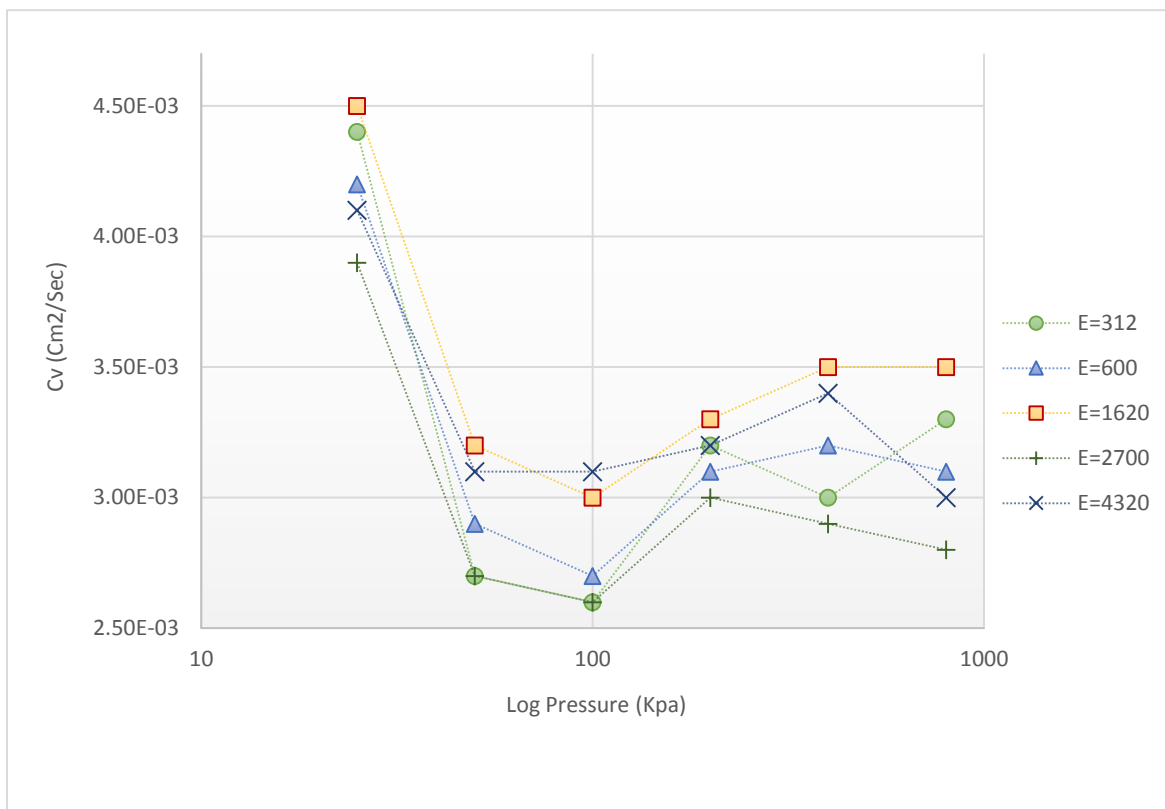
شکل ۴-۳۰. ضریب تحکیم به دست آمده از آزمایش تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی 1620 KN.m/m^3



شکل ۴-۳۱. ضریب تحکیم به دست آمده از آزمایش تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی 2700 KN.m/m^3



شکل ۴-۳۲. ضریب تحکیم به دست آمده از آزمایش تحکیم برای نمونه متراکم شده با انرژی 420 KN.m/m^3



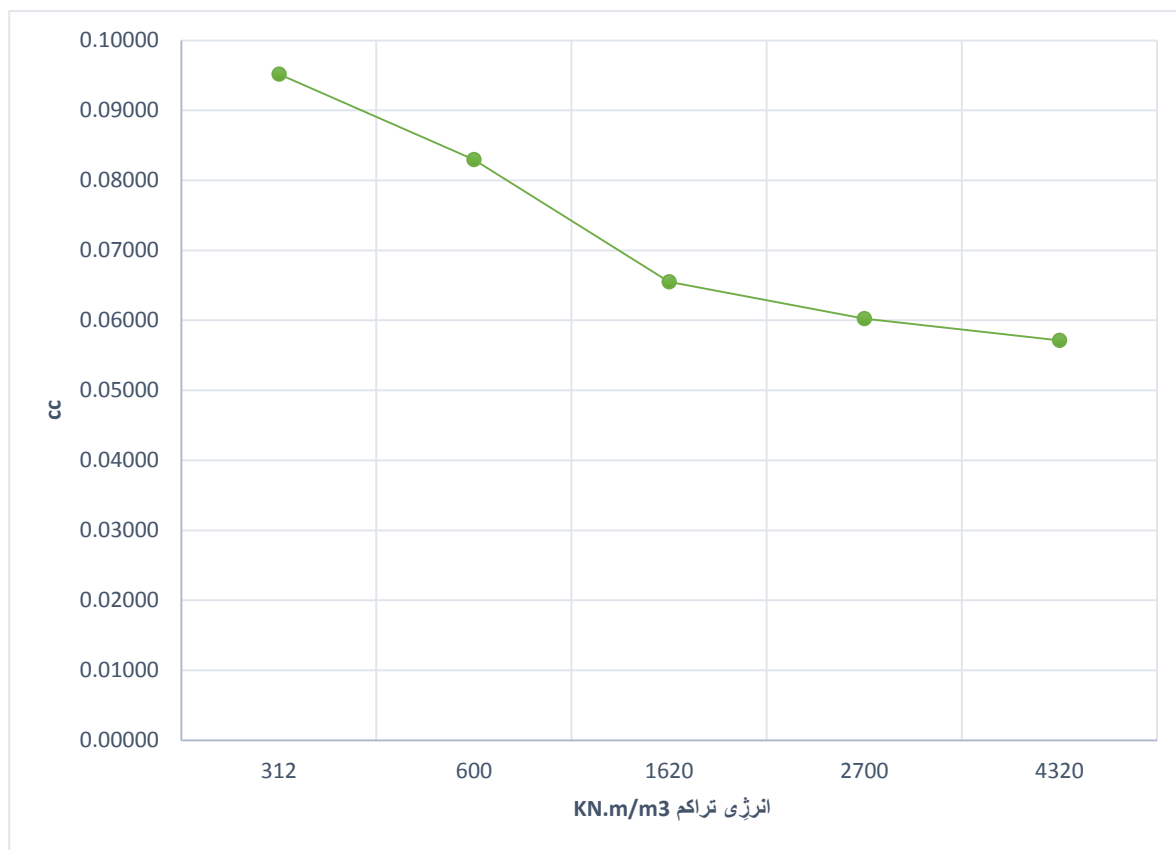
شکل ۴-۳۳. مقایسه ضریب تحکیم های به دست آمده از آزمایش تحکیم

۴-۸-۳ بررسی پارامتر C_c

جدول (۴-۷) مقادیر C_c به دست آمده از آزمایش تحکیم بر روی نمونه های متراکم شده با انرژی های مورد نظر را نشان می دهد و شکل (۴-۳۳) گراف مربوط به آن را نمایش می دهد.

جدول ۴-۷. مقادیر C_c به دست آمده از آزمایش تحکیم برای هر ۵ نمونه

آزمایش شماره	انرژی تراکم (KN.m/m3)	cc
۱	۳۱۲	۰/۰۹۵
۲	۶۰۰	۰/۰۸۳
۳	۱۶۲۰	۰/۰۶۵
۴	۲۷۰۰	۰/۰۶۰
۵	۴۳۲۰	۰/۰۵۷



شکل ۴-۳۴. مقایسه مقادیر C_c به دست آمده از آزمایش تحکیم

نتایج مربوط به این منحنی ها و مقایسه پارامترهای C_v و m_v و C_c و تحلیل آنها در فصل پنجم انجام خواهد شد.

فصل پنجم

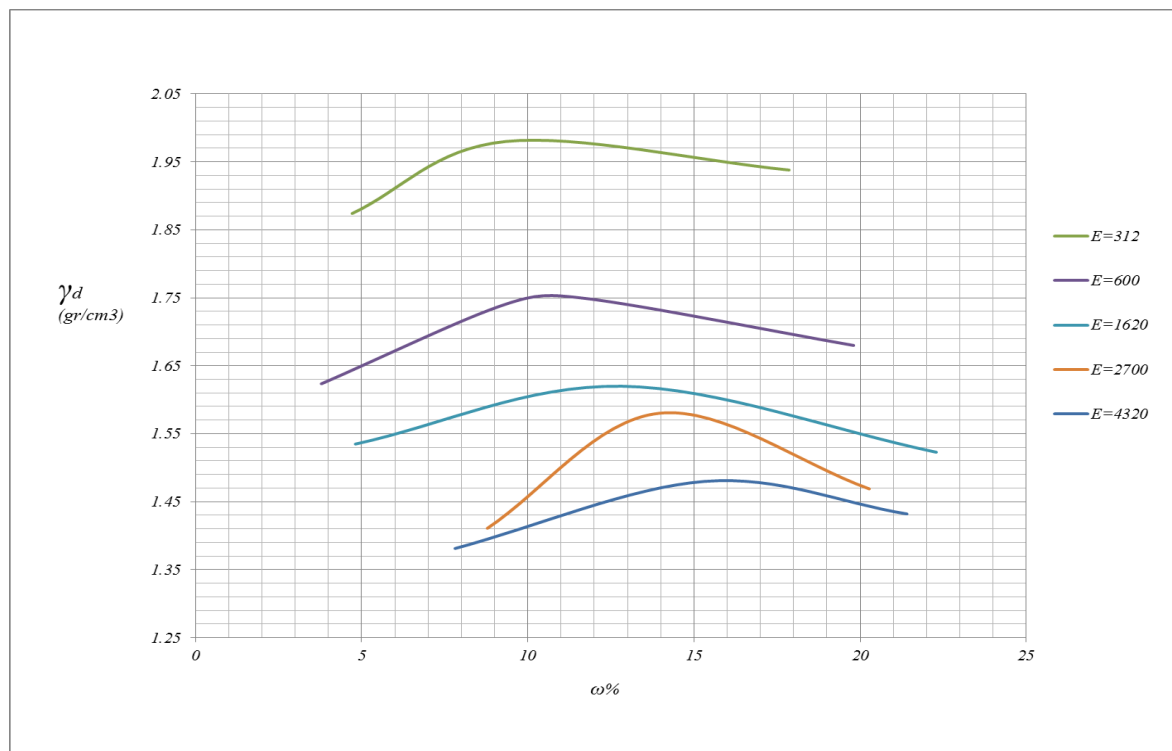
نتایج و پیشنهاد ها

۵-۱ مقدمه

در این پژوهش سعی بر آن بوده است که با بررسی نمونه‌هایی از خاک رس، به یک ارتباط منطقی بین انرژی تراکم و تنش پیش‌تحکیمی دست پیدا کرد. از این رو در فصل قبل ۱۵ نمونه در ۵ گروه مختلف تحت آزمایش تراکم قرار گرفته و دو نمونه از میانگین داده‌های هر گروه به صورت مناسب در دستگاه تحکیم قرار گرفته و پس از برداشت نتایج، نمودارهای مرتبط با تحکیم ترسیم و سپس تنش پیش‌تحکیمی به دو روش کاساگرانده و سیلوا تعیین گردید که در ادامه به بیان نتایج می‌پردازیم.

۵-۲ نتایج حاصل از منحنی‌های تراکم

شکل (۵-۱) به مقایسه بین نتایج حاصل از ۵ آزمایش تراکم با انرژی‌های متفاوت می‌پردازد.



شکل ۵-۱. نتایج حاصل از آزمایش‌های تراکم در انرژی‌های مختلف

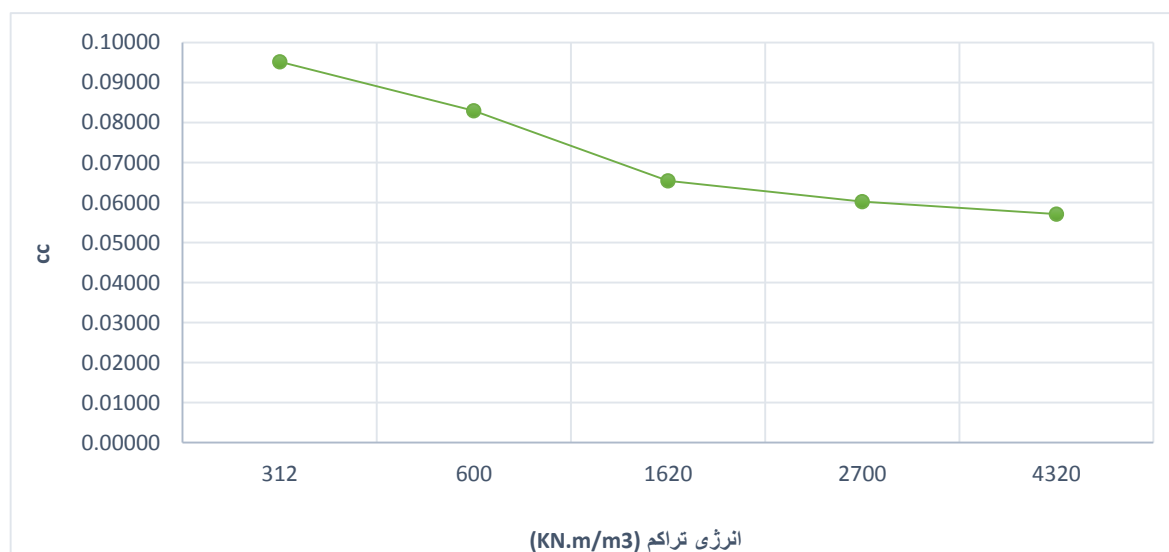
همانطور که انتظار می رفت مشاهده شد با افزایش انرژی تراکم، مقدار درصد رطوبت بهینه کاهش و دانسیته خشک حداکثر افزایش یافت.

۳-۵ بررسی پارامتر نشانه فشردگی c_c (شاخص تراکم پذیری)

یکی دیگر از پارامترهای قابل اتخاذ از روی نمودار مقدار c_c است. در جدول (۱-۵) ارتباط بین نشانه فشردگی با انرژی تراکم بیان شده است.

جدول ۱-۵. مقادیر c_c به دست آمده از آزمایش تحکیم برای هر ۵ نمونه

آزمایش شماره	انرژی (KN.m/m ³) تراکم	C_c
۱	۳۱۲	۰/۰۹۵
۲	۶۰۰	۰/۰۸۳
۳	۱۶۲۰	۰/۰۶۵
۴	۲۷۰۰	۰/۰۶۰
۵	۴۳۲۰	۰/۰۵۷



شکل ۵-۲. روند نزولی c_c با افزایش انرژی تراکم

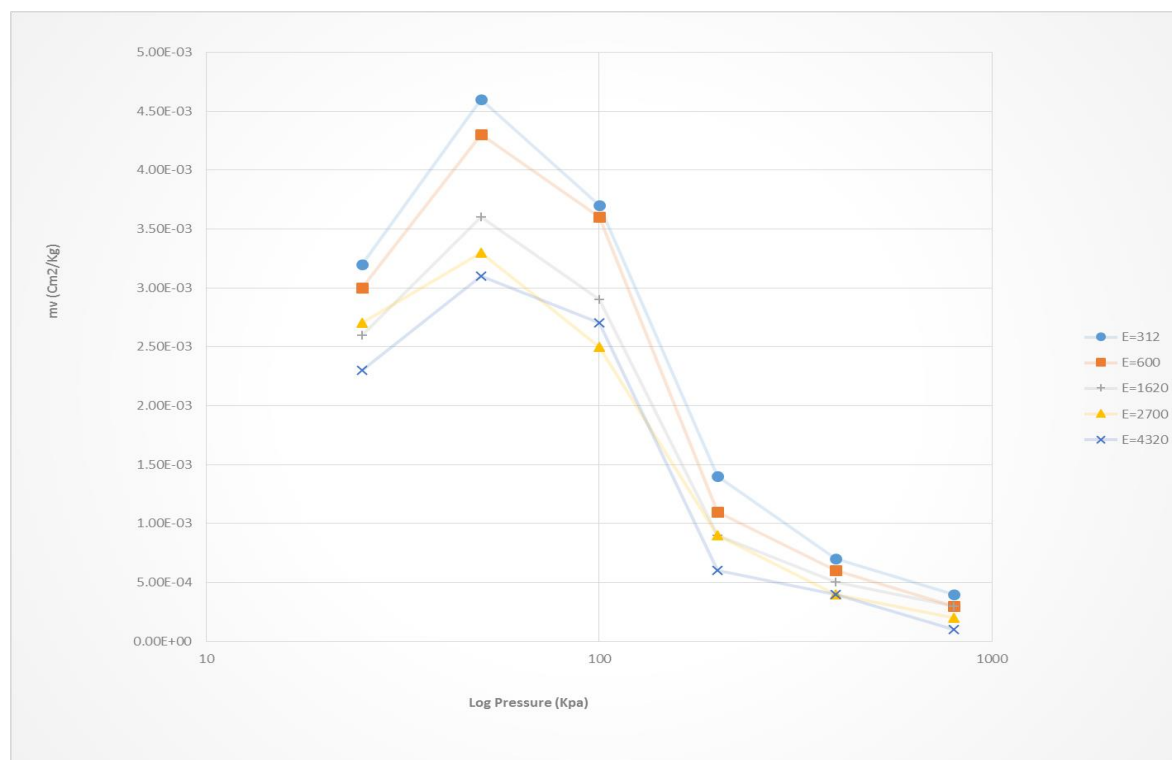
همانگونه که از شکل ۵-۲ قابل برداشت است

الف- با افزایش انرژی تراکم مقدار c_c کاهش می‌یابد و این به معنای سخت‌تر شدن امکان فشردگی در انرژی‌های بالاتر می‌باشد.

ب- بیشترین شیب نمودار مربوط به زمانی است که ما برای تغییر انرژی اعمالی علاوه بر تغییر در تعداد ضربه، تغییر در پارامترهای دیگر نیز داریم. لذا استنباط می‌شود که پارامترهای دیگر موجود در رابطه انرژی تراکم نیز اثر معناداری داشته باشند.

۵-۴ بررسی پارامتر ضریب تغییر حجم (m_v)

در شکل (۵-۳) می‌توان تغییرات ضریب تغییر حجم را در پنج آزمایش مختلف مشاهده کرد.



شکل ۵-۳. تغییرات پارامتر ضریب تغییر حجم

نتایج زیر از نمودار قابل برداشت است:

الف) به طور کلی با افزایش انرژی تراکم ضریب تغییر حجم کاهش یافته است.

ب) به جز دو مورد، در یک تنش اعمالی ثابت با افزایش انرژی ضریب تغییر حجم نیز کاهش یافت

ج) با افزایش تنش در هر انرژی این ضرایب به همگرایی بیشتری می‌رسند.

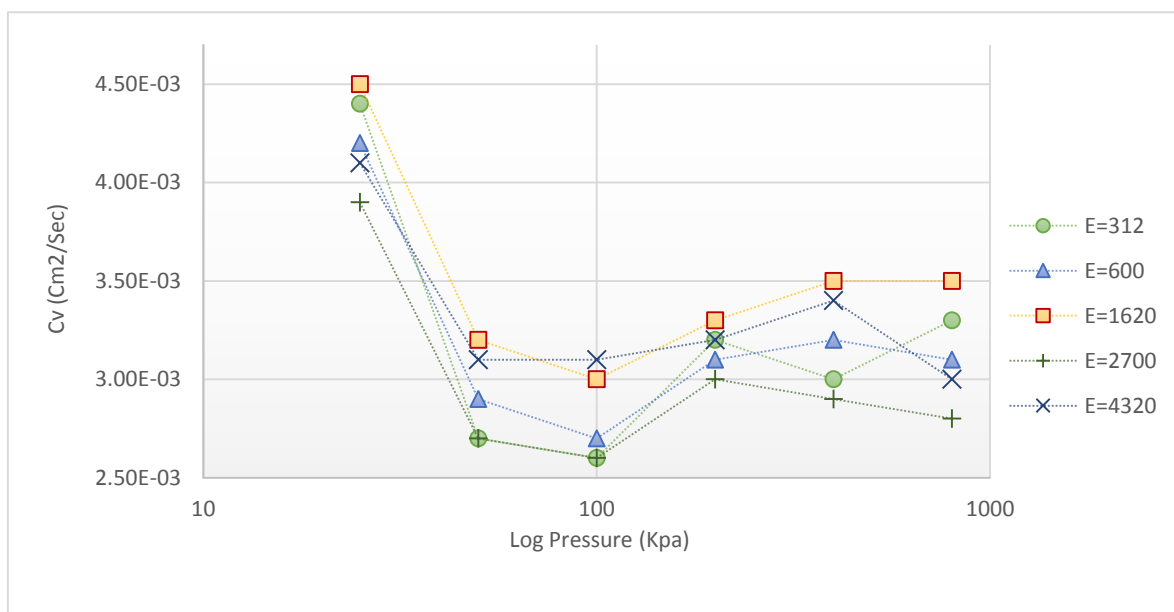
د) میزان کاهش از آزمایش دوم به سوم مقدار بیشتری نسبت به سایر موارد می‌باشد که استنباط می‌شود

پارامترهای دیگر تغییر داده شده برای متفاوت کردن انرژی اعمالی علاوه بر پارامتر تعداد ضربه در رسیدن

به این نتیجه، دلیل این موضوع باشد.

۵-۵ بررسی پارامتر ضریب تحکیم (c_v)

در شکل (۵-۴) می‌توان تغییرات ضریب تحکیم را در پنج آزمایش مختلف مشاهده کرد.

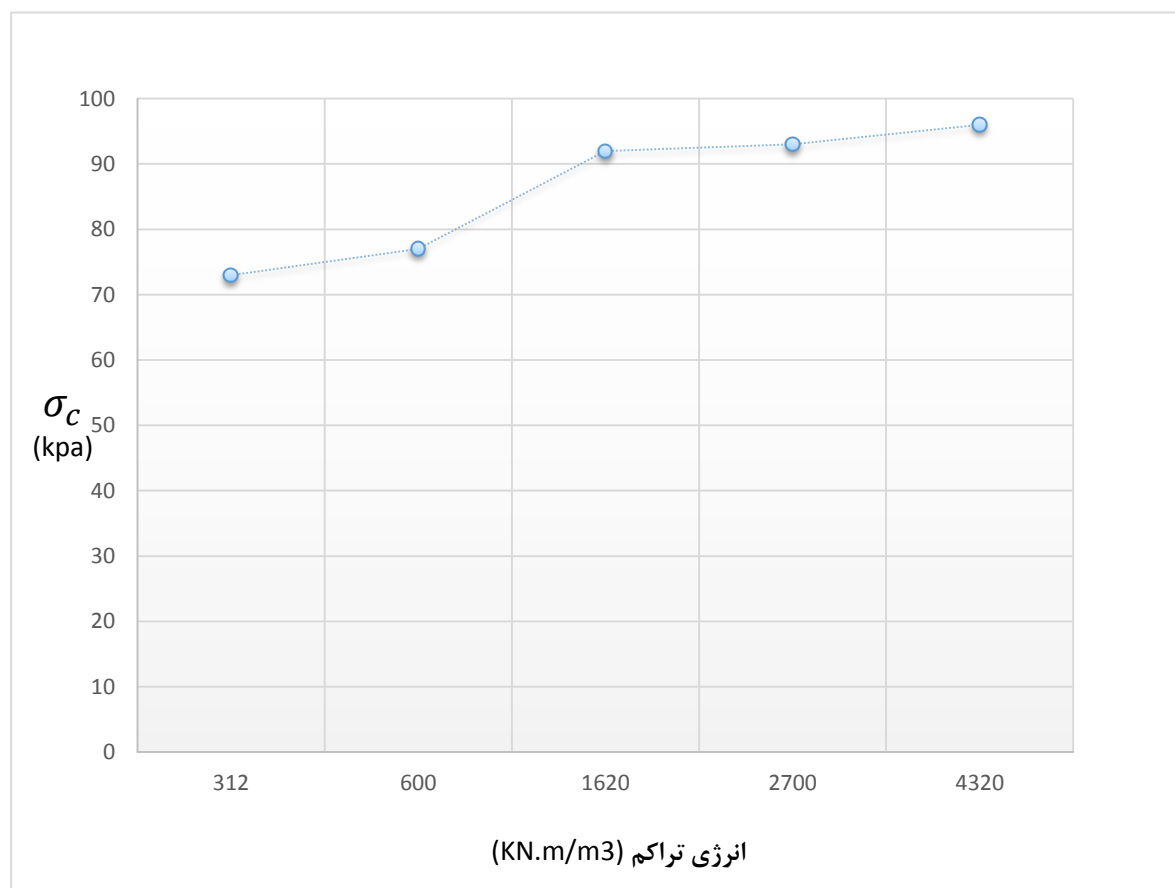


شکل ۵-۴. مقایسه ضریب تحکیم‌های به دست آمده

همانگونه که از نمودار قابل برداشت است هیچگونه رابطه منطقی بین انرژی تراکم و این پارامتر وجود ندارد.

۵-۶ نتایج حاصل از تعیین تنش پیش تحکیمی به روش کاساگرانده

در شکل (۵-۵) می توان تنش پیش تحکیمی به دست آمده از روش کاساگرانده را در پنج آزمایش مختلف مشاهده کرد.



شکل ۵-۵. تنش های پیش تحکیمی به دست آمده به روش کاساگرانده

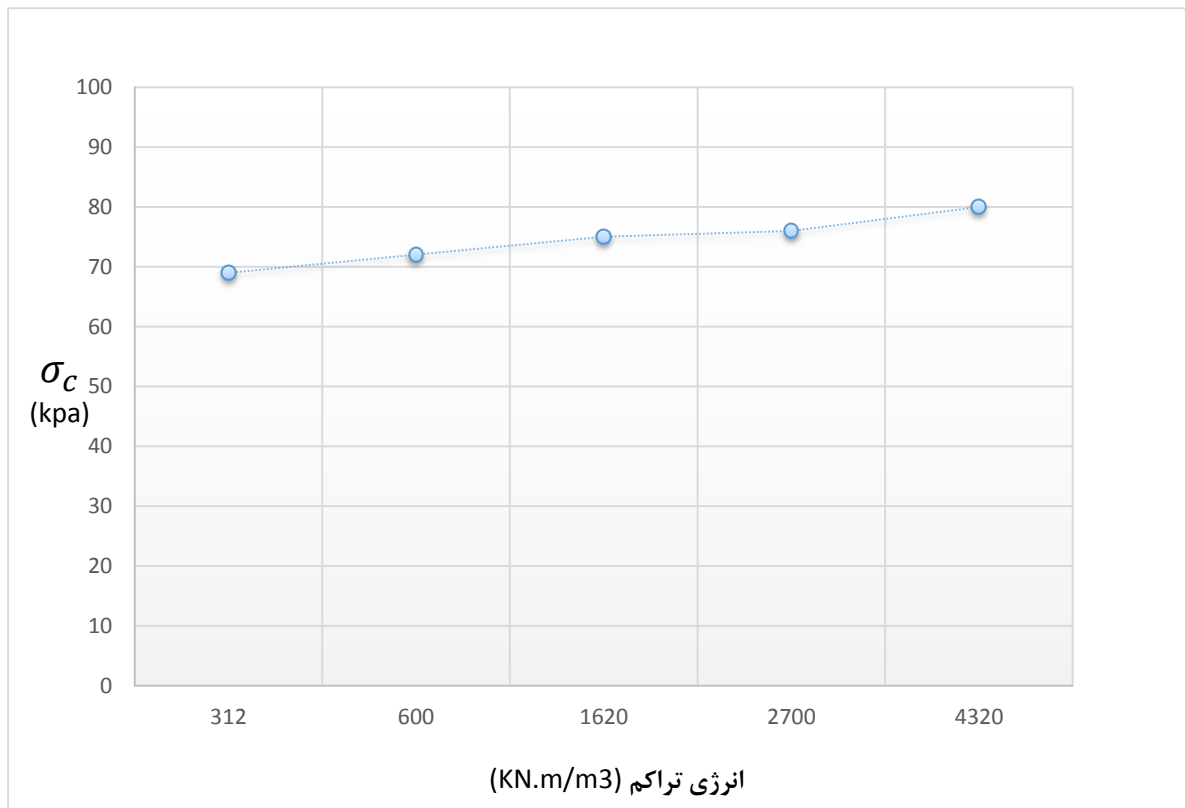
نتایج حاصل از نمودار فوق به شرح زیر است:

الف) با افزایش انرژی تراکم مقادیر تنش پیش‌تحکیمی روند افزایشی داشته است

ب) بیشترین شیب نمودار بین آزمایش دوم و سوم می‌باشد

۵-۷ نتایج حاصل از تعیین تنش پیش‌تحکیمی به روش سیلوا

در شکل (۵-۶) می‌توان تنش پیش‌تحکیمی به دست آمده از روش سیلوا را در پنج آزمایش مختلف مشاهده کرد.



شکل ۵-۶. تنش‌های پیش‌تحکیمی به دست آمده به روش سیلوا

همانطور که از نمودار پیداست با افزایش انرژی تراکم مقدار تنش پیش‌تحکیمی افزایش یافته است.

۸-۵ مقایسه مقادیر تنش پیش‌تحکیمی به دست آمده از روش سیلوا و کاساگرانده

روش سیلوا در قیاس با کاساگرانده جدید تر بوده و به دلیل عدم وابستگی به کاربر نتایج قابل اعتماد تری را عرضه می‌کند. اما با این حال تفاوت‌ها و تشابهات زیر در دو روش قابل بیان است:

الف- مقدار تنش پیش‌تحکیمی حاصل از روش کاساگرانده در تک تک مراحل بیش از مقدار حاصل از روش سیلوا است.

ب) روش سیلوا مقدار تنش پیش‌تحکیمی را با ضریب اطمینان بهتری می‌دهد

ج) در هر دو روش اختلاف مقادیر بین مراحل ۳ و ۴ ناچیز است.

۹-۵ نتیجه‌گیری

به صورت خلاصه می‌توان از این آزمایش دریافت که در رسی‌ها با افزایش انرژی تراکم مقدار تنش پیش‌تحکیمی نیز افزایش می‌یابد. مقادیر تنش پیش‌تحکیمی بسته به نوع روش تعیین آن متفاوت است و روش کاساگرانده مقادیر بیشتری را نسبت به سیلوا می‌دهد. همچنین ضریب تغییر حجم و شاخص فشردگی خاک رسی با افزایش انرژی تراکم کاهش می‌یابد.

۱۰-۵ مطالعات آینده

از آنجا که موضوع تنش پیش‌تحکیمی هنوز هم جای بررسی داشته و دانستن مقدار دقیق آن تاثیر زیادی بر روی هزینه‌ها خصوصاً در پروژه‌های عظیم دارد، می‌توان بررسی بیشتر این پارامتر را مهم تلقی کرده و دانشجویان و محققین به بررسی بیشتر آن مبادرت بنمایند. بدین لحاظ می‌توان به بررسی موارد زیر پرداخت.

الف- اثر انرژی تراکم بر تنش پیش‌تحکیمی در خاک‌هایی غیر از رس

ب) ارتباط بین تنش‌پیش‌تحکیمی و انرژی تراکم در رس‌های با OCR بالا

ج) بررسی ارتباط بین افزایش پیش‌تحکیمی و کاهش نشست در خاک‌های دارای رطوبت زیاد

د) بررسی ارتباط بین انرژی تراکم و رطوبت در رس‌های مختلف با دانسیته و دانه‌بندی مختلف

منابع

[1] S. Narra , 2009. Influence of Compaction Curve Modeling on Void Ratio and Pre-Consolidation Stress. International Journal of Soil Science, 4: 57-66

[2] A. ALEXANDROU A, R. EARL, T. A. GEMTOS. 'in situ assessment of soil compatibility' Published by the American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, Michigan. 2002

[3] Canillas &Salokhe, 'Soil compaction has been identified as one of the major problems causing soil degradation' 2002

[۴] ناهید عقیلی ناطق و همکاران " بررسی تاثیر برخی عوامل مؤثر بر مقاومت به تراکم (تنش پیش-تراکمی) یک خاک لوم رسی سیلتی؛ پنجمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون؛ دانشگاه فردوسی ۱۳۹۳.

[۵] علی تابع بردبار " تاثیر افزودن فیبرهای طبیعی و مصنوعی روی پارامترهای تحکیم و تغییر شکل خاک " دومین سمینار ملی مسائل ژئوتکنیکی شبکه های آبیاری و زهکشی اردیبهشت ۱۳۸۹.

[۶] الهه مهنی روش، علی حیدری پناه " مطالعه و بررسی تغییرات ماتریس مکش ناشی از انرژی تراکم بر مقاومت برشی خاک های غیر اشباع " نهمین لی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان 91-19 اردیبهشت ماه ۱۳۹۱.

[۷] عبدالکریم خسروی و همکاران " مطالعه و بررسی اثر انرژی تراکم بر نفوذپذیری خاک های غیر اشباع " نهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان 1391 ماه اردیبهشت ۱۹.

[۸] خانجانی و حسین زاده " آزمایش تنش پیش تحکیم در خاک "

[۹] محمدرضا باغبان گلپسند و همکاران " بررسی نسبت پیش تحکیمی رسوبات دریاچه ارومیه به وسیله

آزمایشهای CPTu و تحکیم " چهارمین کنفرانس زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران،

[۱۰] منا طهماسبی، عباس همت، محمود وفاپیان، محمد رضا مصدقی " کاربرد نشست صفحه‌ای در

تعیین تنش پیش تحکیمی یک خاک لوم شنی و رابطه آن با مقاومت برشی "

[۱۱] کیوان کریمی عسگرانی و همکاران " بررسی تاثیر آهک و سیمان بر مقاومت برشی زه کشی شده

خاک های رسی پیش تحکیم یافته " اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران، دانشکده فنی و

مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی، ۱۳۹۲

[۱۲] اوحدی و همکاران " بهسازی خاکهای واگرا با آهک با نگرش ویژه به کاهش شدت قله‌های اصلی

کانیهای رسی در پراش پرتو ایکس " جله علمی- پژوهشی «عمران مدرس» دوره چهاردهم، شماره

۲، تابستان ۱

[13] Donatella Sterpi 'Effect of freeze-thaw cycles on the hydraulic conductivity of a compacted clayey silt and influence of the compaction energy'. 2015, Department of Civil and Environmental Engineering, Politecnico di Milano. .

[14] S. Narra , 2009. Influence of Compaction Curve Modeling on Void Ratio and Pre-Consolidation Stress. International Journal of Soil Science, 4: 57-66

[15] Assouline, S., 2002. Modeling soil compaction under uniaxial compression. Soil Sci. Soc. Am. J., 66: 1784-1787

[16] Van Genuchten, M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44: 892-898

[17] Casagrande, A., 1936. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. Proceedings of the 1st International Soil Mechanics and Foundation Engineering Conference, June 22-26, 1936, Graduate School of Engineering, Harvard University, Cambridge, Mass., pp: 60-64

[18] Kim, W.H., Daniel, D.E., 1992. Effects of freezing on hydraulic conductivity of compacted clay. J. Geotech. Geoenviron. Eng. ASCE 118, 1083-1097.

[۱۹] پاکباز و همکاران " بررسی تأثیر میزان رس بر روی پارامتر m مخلوط های پیش تحکیم یافته ماسه-رس " همین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان 91-19 اردیبهشت ماه ۹۹.

[20] Georgiannou, V. N., Burland, J.B. and Hight, D. W. (1991a). Undrained Clayey Sands. Soils Found. 31, No.3, 17- Behavior of Natural and Model 29103

[۲۱] برومندزاده بهنام، "بررسی تأثیر ترکیب و OCR بر ضریب m در مقاومت برشی زهکشی شده خاک های پیش تحکیم یافته"، رساله کارشناسی ارشد، دانشگاه شهیدچمران اهواز.

[22] Kootahi, K. and Mayne, P. (2016). "Index Test Method for the Effective Preconsolidation Stress in Clay Deposits." J. Estimating Eng., 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001519, Geotech. Geoenviron.

”04016049

[23] Bordbar, A. T and Raeisi, A. 2009. Effect of Fibers on Shear Strength of Clayey Soil 8th International Congress on Civil Engineering, May 11-13, Shiraz University, Shiraz, Iran.

Abstract

Nowadays studying and analyzing the relationship between different characteristics of various kinds of soil are very important. One of the most important parameter in soil mechanic is pre-consolidation pressure, the largest amount of pressure that the soil underwent previously. And also soil compaction is one of the most important processes in construction industry. The subject of our research is the analysis of the effect of compaction effort on the pre-consolidation pressure of clay soil. Our analyzed soil belonged to Sa'ad A'bad village in Shahroud periphery. At first compaction operation was carried out on the soil with 5 diverse energies. The best moisture (w_{opt}) and maximum dry density (ρ_{dmax}) for each of them had been achieved. Again the soils had been achieved in their optimal moisture and had been compacted with related energies. Two samples were made from each compact operation and they were put in consolidation machine for consolidation test. At last compression index, coefficient of volume change, coefficient of consolidation and pre-consolidation pressure parameters achieved through the tests, were analyzed. To get the stress of pre-consolidation through the test, two methods of Silva and Casagrande were used, of which the results were compared. It has been concluded that increasing the compaction effort will increase the pre-consolidation pressure with both methods, and the amount is in the form of nonlinear equation. And also the amounts of pressure shown by Silva method were less than those reached by Casagrande method.

Key words: Compaction effort, pre-consolidation pressure, consolidation, Silva, Casagrand



University of Shahrood Technology

Faculty of Civil Engineering

Msc Thesis in Civil Engineerin

Effect of compaction effort on preconsolidation pressure

By: Hasan eteraf

Supervisor(s):

Dr. S.M. Hosseini

September 2016