

# مقایسه مقادیر نفوذ پذیری و نشست پذیری خاکهای رسی متراکم شده با دوروش تراکم استاتیکی و دینامیکی

حسن رحیمی و رسول قبادیان

استاد و دانشجوی سابق کارشناسی ارشد گروه آبیاری و آبادانی دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران.

تاریخ پذیرش ۷۸/۲/۱

## خلاصه

به منظور ارزیابی صحیح پارامترهای مکانیکی خاک برای اهداف طراحی لازم است این متغیرها در آزمایشگاه با استفاده از نمونه‌های بازسازی شده با روش تراکمی که شباهت بیشتری با تراکم صحرائی دارد، تعیین شوند. معمولاً در آزمایشگاه‌ها براساس استانداردهای موجود، نمونه‌های مورد آزمایش توسط روش تراکم دینامیکی (کوبیدن خاک در چند لایه در داخل قالب استاندارد و با کمک ضربات چکش) تهیه می‌شوند، در حالیکه تراکم در صحرا توسط غلتکهای چرخ فلزی صاف و یا غلتکهای پاچه بزی که شباهت بیشتری به تراکم استاتیکی دارند، انجام می‌شود. در این تحقیق به منظور مقایسه اثر هر یک از این دو روش تراکم بر مقادیر نفوذ پذیری و نشست پذیری خاکهای ریزدانه، سه نوع خاک با بافت‌های رسی سیلتی (CL-ML)، رسی با خمیرانی کم (CL) و رسی با خمیرانی زیاد (CH) تهیه گردید و سپس نمونه‌های تراکم‌های نسبی مختلف و رطوبتهای متفاوت با دو روش تراکم استاتیکی و دینامیکی بازسازی و آزمایشهای نفوذ پذیری و تحکیم بر روی کلیه نمونه‌ها انجام گرفت. نتایج آزمایشهای نفوذ پذیری نشان داد که نمونه‌های بازسازی شده به روش تراکم استاتیکی نسبت به نمونه‌های بازسازی شده به روش تراکم دینامیکی نفوذ پذیری بیشتری را نشان می‌دهند. همچنین با افزایش درصد رطوبت و تراکم نسبی نمونه‌های بازسازی شده مقدار نفوذ پذیری کاهش می‌یابد. نتایج آزمایشهای تحکیم نشان داد که با افزایش حد روانی خاک ضریب تحکیم (Cv) کاهش و نمایه فشردگی (Cc) افزایش می‌یابد. علاوه بر این نمونه‌های بازسازی شده به روش تراکم استاتیکی نسبت به نمونه‌های بازسازی شده به روش تراکم دینامیکی، ضریب تحکیم و نمایه فشردگی بیشتری را نشان می‌دهند. همچنین از این سری آزمایشها نتیجه شد که صرف نظر از خصوصیات فیزیکی خاک، با افزایش درصد رطوبت و تراکم نسبی نمونه‌ها، مقادیر Cv و Cc کاهش می‌یابند.

واژه‌های کلیدی: تراکم استاتیکی، تراکم دینامیکی، نشست پذیری، نفوذ پذیری

## مقدمه

ورقه‌ای هر ذره آب بدون تبادل اندازه حرکت با ذره دیگر در طول مسیر معینی حرکت می‌کند. در حالیکه در جریان آشفته مسیر حرکت ذره نامنظم است. در بیشتر مسائل عملی مربوط به مکانیک خاک جریان آب در میان منافذ خاک ورقه‌ای فرض می‌شود (۱۳). مطالعات جریان آب، در محیط متخلخل خاک، در مکانیک خاک و دارای کاربردهای متعددی می‌باشد (۳ و ۱۳).

خاکها مجموعه‌ای از ذرات جامد ناپیوسته می‌باشند که در بین آنها منافذ وجود دارد، بگونه‌ای که آب می‌تواند از نقطه‌ای با انرژی بیشتر به سوی نقطه‌ای با انرژی کمتر حرکت کند، این خاصیت عبور آب از میان خلل و فرج ممتد آنگذاری نامیده می‌شود (۱۳). جریان آب از میان خلل و فرج ممکن است ورقه‌ای یا آشفته باشد. در جریان

مطالعات هادر (Huder, 1964) و هیلف (Hilf, 1975) در مورد تراکم پذیری نمونه‌های رسی متراکم شده، که با استفاده از دستگاه تحکیم معمولی انجام شده، نشان داد که تحکیم پذیری نه تنها به تراکم نسبی نمونه بلکه به رطوبت اولیه نمونه نیز بستگی دارد (۸). مقایسه درجه تحکیم پذیری خاکهای چسبنده متراکم شده با انرژی تراکمی یکسان موارد زیر را نشان داده است (۸):

الف - نمونه‌های متراکم شده با رطوبت کمتر از بهینه از نمونه‌های متراکم شده با رطوبت بیشتر از بهینه اگر اشباع نشوند، نشست کمتری دارند.

ب - اگر نمونه‌های خاک پس از بارگذاری اشباع شوند، نشست اضافی اتفاق می‌افتد. این نشست ناشی از رمبندگی، در نمونه‌های متراکم شده در رطوبت کمتر از بهینه، بیشتر است.

ج - نشست کلی که برابر مجموع نشست ناشی از رمبندگی و تراکم پذیری نمونه است، در حوالی رطوبت بهینه حداقل مقدار را دارد.

مطالعات اینگلز و ویلیامز روی نمونه‌هایی از خاکهای رسی سیلتی و ماسه سیلتی متراکم شده در ناحیه خشک رطوبت بهینه نشان داد که نشست اشباع این نمونه‌ها کمتر از ۱ تا ۳ درصد است و با افزایش درصد رطوبت اولیه نمونه این نشست به سرعت کاهش می‌یابد (۴).

لمب خصوصیات تراکم پذیری و نشست یک بعدی خاکهای رسی که در سمت خشک و تر رطوبت بهینه متراکم شده‌اند، را مورد مطالعه قرار داد. نتایج مطالعات وی نشان داد که در فشار کم، نمونه‌هایی که در سمت تر رطوبت بهینه متراکم شده‌اند، از آنهایی که در سمت خشک متراکم شده‌اند، تراکم پذیرتر هستند. در فشارهای زیاد روند پدیده کاملاً بر عکس است (۶).

### مواد و روشها

به منظور برآورد اثر روش تراکم بر مقدار نفوذپذیری و نشست پذیری خاکهای رسی متراکم شده، سه نوع خاک با بافتهای رسی - سیلتی (CL-ML)، رسی با خمیرائی کم (CL) و رسی با خمیرائی زیاد (CH) به ترتیب از منطقه مهر ویلای کرج، کمال آباد کرج و مزرعه مرکز تحقیقات دشت مغان تهیه شد. سپس بر روی هر یک از نمونه‌ها آزمایشهای شناسایی به منظور تعیین جرم مخصوص

نفوذپذیری خاکهای رسی متراکم شده از چندین عامل تاثیر می‌پذیرد که عبارتند از: محتوی رطوبتی نمونه (۶ و ۱۵)، درجه اشباع (۱۵، ۱۲، ۱۰)، روش تراکم (۱۰)، انرژی تراکمی (۱۰)، در شیب هیدرولیکی (۱۱)، اندازه کلوخه‌های رسی (۲)، توزیع اندازه خلل و فرج (۱۲)، خصوصیات شیمیایی سیال عبوری (۹)، سن نمونه‌های مورد آزمایش (۱۰)، نسبت تخلخل (۹)، نوع دستگاه نفوذ سنج، جهت جریان و اندازه نمونه‌های مورد آزمایش (۲).

مطالعات لمب در مورد نفوذپذیری خاک رس ماسه‌ای جایکا نشان داد که در یک انرژی تراکمی ثابت با افزایش درصد رطوبت نمونه مقدار نفوذپذیری کاهش یافته و در نزدیکی رطوبت بهینه به کمترین مقدار خود می‌رسد. علاوه بر این یک درصد رطوبت ثابت با افزایش تراکم نسبی نمونه‌های بازسازی شده بخاطر کاهش نسبت تخلخل، مقدار نفوذپذیری کاهش می‌یابد (۷).

مطالعات بویتن و دانیل در مورد نفوذپذیری خاک رس متراکم شده نشان داد که صرف نظر از جهت جریان عبوری از نمونه با افزایش درصد رطوبت، مقدار نفوذپذیری کاهش می‌یابد (۲).

تحقیقات انجام شده توسط میشل و همکاران نشان داد که مقدار نفوذپذیری نمونه‌های بازسازی شده به روش تراکم استاتیکی نسبت به نمونه‌های تهیه شده با روش تراکم ارتعاشی و نمونه‌های اخیر نیز نسبت به نمونه‌های بازسازی شده با روش تراکم از نوع خمیر کردن بیشتر بوده و این افزایش در ناحیه تر رطوبت بهینه بیشتر قابل ملاحظه است (۱۰).

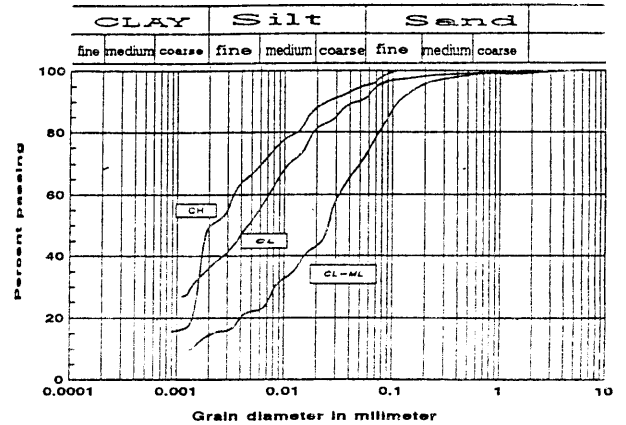
وقتیکه توده خاک اشباع یا تقریباً اشباع تحت تاثیر باری قرار می‌گیرد، تغییر شکل خمیری ناشی از کاهش نسبت تخلخل در این توده اتفاق می‌افتد که این تغییر شکل وابسته به زمان است (۱). نظریه تحکیم یک بعدی در شرایط اشباع اولین بار در سال ۱۹۲۵ توسط ترزاقی ارائه شد. علاوه بر مدل ترزاقی، مدل‌های دیگری نیز توسط تورستسون (Torstenson, 1977)، چان (Chan, 1986) و هالنسی و تن (Houlsby and Ten, 1986) ارائه شده است که رابطه بین فاکتور زمان و درصد تحکیم را برای آزمایشهای در محل نشان داده‌اند (۵). پس از ارائه مدل تحکیم یک بعدی توسط ترزاقی، مدل تحکیم سه بعدی در شرایط اشباع توسط بایوت (Biot, 1941) ارائه شد (۱۴).

مورد آزمایش و کمی نسبی نفوذپذیری از روش بار ثابت استفاده گردید. بدین منظور با توجه به منحنی های تراکم ترسیم شده برای هر یک از خاکها، نمونه های خاک در استوانه ای فولادی با قطر ۳۳ میلی متر و ارتفاع ۷۱ میلی متر با دوروش تراکم استاتیکی و دینامیکی در رطوبت ثابت بهینه و برای تراکم نسبی ۹۰، ۹۵، ۱۰۰ و ۱۰۵ درصد تهیه گردید. همچنین نمونه ها نیز در تراکم نسبی ثابت ۱۰۰ درصد و رطوبت های مختلف با استفاده از دو روش تراکم مذکور تهیه شدند. تفاوت اصلی روش تهیه نمونه های بازسازی شده این است که در روش تراکم دینامیکی، خاک در داخل قالب با استفاده از ضربات چکش تراکم گردید. در حالیکه در روش تراکم استاتیکی برای تهیه نمونه ها از فشار جک هیدرولیکی استفاده گردید. سپس آزمایش نفوذپذیری با روش بار هیدرولیکی ثابت بر روی کلیه نمونه ها انجام گرفت. به منظور انجام آزمایشهای تحکیم از دستگاه تحکیم معمولی استفاده شد. در این قسمت از آزمایش ها نیز روش تهیه نمونه ها همانند روش توضیح داده شده در بالا بود با این تفاوت که نمونه ها در داخل حلقه تحکیم بقطر ۷ و ارتفاع ۱/۹۸ cm تراکم شدند. پس از تهیه نمونه ها، حلقه های تحکیم در دستگاه قرار داده شده و بر اساس استاندارد ASTM مورد آزمایش تحکیم قرار گرفتند. پس از انجام آزمایشها بر اساس نتایج حاصله ضریب تحکیم (Cv) و نمایه فشردگی (Cc) برای کلیه نمونه ها تعیین گردید. به منظور تعیین ضریب تحکیم از روش کاساگرانده، یعنی رسم منحنی تغییرات نشست در مقیاس نیمه لگاریتمی استفاده شد. سپس ضریب تحکیم بر اساس رابطه (۱) تعیین گردید:

$$C_v = \frac{0.197 d^2}{t_{50}}$$

که در آن:

d = طول مسافت زهکشی شده



شکل ۱ - منحنی های دانه بندی خاکهای مورد مطالعه

ذرات جامد، دانه بندی و حدود آتر برگ بر اساس استانداردهای ASTM انجام گردید. پس از انجام آزمایشهای شناسایی برای هر یک از نمونه ها منحنی تراکم با استفاده از روش تراکم دینامیکی استاندارد پراکتور تهیه شد. شکل ۱ منحنی های دانه بندی سه نوع خاک مورد بررسی و جدول نتایج آزمایشهای شناسایی نمونه های مورد آزمایش را نشان می دهد.

برای سنجش ضریب آبگذری خاک (K) روشهای مختلفی پیشنهاد شده است. گرچه هیچ یک از این روشها مقدار دقیق K را بدست نمی دهد. ولی با انتخاب روشی که مناسب با نوع و شرایط خاک باشد می توان مقدار آن را با دقت قابل قبولی برای کارهای عملی تعیین کرد. در این پژوهش برای اندازه گیری ضریب نفوذپذیری از آزمایش نفوذپذیری بار ثابت استفاده شد. همانطور که ذکر شد به علت اثر شرایط مختلف آزمایش نفوذپذیری بر نتایج حاصله (از جمله متغیر بودن شیب هیدرولیکی)، در این تحقیق با توجه به بافت ریز نمونه های

جدول ۱ - نتایج آزمایشهای شناسایی خاکهای مورد مطالعه

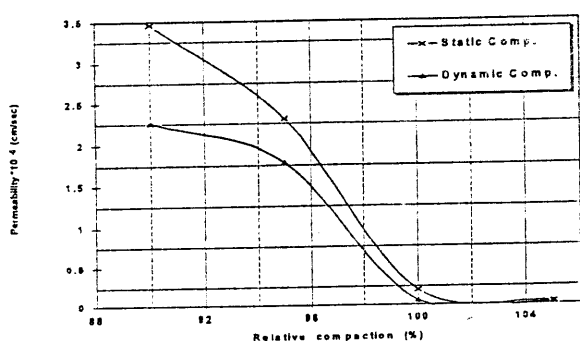
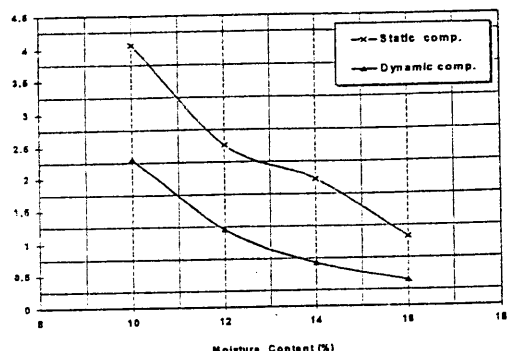
بافت خاک	چگالی ذرات جامد	حد روانی (%)	نمایه خمیری (%)	حد انقباض (%)	وزن واحد حجم خشک حداکثر gr/cm <sup>3</sup>	رطوبت بهینه (%)
CL-ML	۲/۶۹	۲۴	۴/۶۲	۱۶/۱۵	۱/۸۷۵	۱۳/۹
CL	۲/۶۷	۴۳	۱۹/۸۸	۱۷/۱	۱/۶۰۴	۲۲
CH	۲/۶۶	۶۳	۳۵	۱۸/۵	۱/۵۱	۲۵

$t=50$  زمان رسیدن به ۵۰ درصد تحکیم

برای تعیین ضریب  $C_c$  نیز روش پیشنهادی ترازقی مورد استفاده قرار گرفت که در آن تغییرات نسبت تخلخل (e) در مقابل تغییرات لگاریتم فشار ترسیم و ضریب  $C_c$  از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$C_c = \frac{\Delta e}{\log(P_2/P_1)}$$

که در این رابطه  $\Delta e$  تفاضل نسبت تخلخل های  $e_1$  و  $e_2$  در فشارهای متناظر  $P_1$  و  $P_2$  می باشد.



## نتایج و بحث :

### الف - نفوذپذیری

نتایج آزمایشهای نفوذپذیری انجام شده برای نمونه‌های بازسازی شده خاک CL-ML در شکل (۲) نشان داده شده است. بدلیل نفوذپذیری بسیار کم نمونه‌های بازسازی شده خاکهای CL و CH در تراکم‌های نسبی بالاتر از ۹۵٪ و تحت شرایط مورد استفاده در این تحقیق، در تعیین نفوذپذیری خاکهای مذکور موفقیتی حاصل نشد. نمونه‌های بازسازی شده خاک CL در تراکم نسبی ۹۵٪ تحت فشار ۶۰ psi به مدت ۱۵ روز اشباع نگردیدند.

همانطور که شکل (۲) نشان می‌دهد، برای یک رطوبت ثابت با افزایش درصد تراکم نسبی مقدار نفوذپذیری خاک کاهش یافته و این کاهش در حوالی تراکم ۱۰۰ درصد خیلی بیشتر است. با افزایش تراکم نسبی، آرایش ذرات خاک موازی تر شده و در نتیجه تعداد مجاری بزرگ انتقال آب در آن کاهش یافته و منافذی با سطح مقطع بسیار کوچک بوجود می‌آیند (۲). از آنجا که نفوذپذیری ارتباط مستقیم با سطح مقطع مجاری داخل خاک دارد، بنابراین مقدار آن کاهش می‌یابد. علاوه بر این چون با افزایش تراکم نسبی در یک رطوبت ثابت نسبت تخلخل نیز کاهش می‌یابد و نفوذپذیری با نسبت  $\frac{e^n}{1+e}$  ارتباط دارد بنابراین مقدار آن بشدت کاهش می‌یابد (۳).

شکل ۲ نشان می‌دهد که در یک تراکم نسبی ثابت با افزایش درصد رطوبت مقدار نفوذپذیری نمونه کاهش یافته و این کاهش در حوالی رطوبت بهینه خیلی شدیدتر است. بر اساس نظریه Clod model کلوخه‌های رسی، وقتی که نمونه‌ها در ناحیه خشک رطوبت بهینه متراکم می‌شوند سخت بوده و زمانیکه نمونه‌ها در ناحیه تر رطوبت بهینه متراکم می‌گردند، نرم هستند. همچنین در ناحیه تر رطوبت بهینه فضای بین کلوخه‌ای به حداقل مقدار خود می‌رسد.

شکل ۲ - تغییرات نفوذپذیری خاک (CL-ML) الف - در مقابل درصد رطوبت  
ب - در مقابل تراکم نسبی نمونه‌های بازسازی شده با دو روش تراکم استاتیکی و دینامیکی

بنابراین عبور آب از فضای بین کلوخه‌ها مشکل بوده و نهایتاً میزان نفوذپذیری خاک کاهش می‌یابد (۱۰). همچنین شکل (۲) نشان می‌دهد که نمونه‌های بازسازی شده به روش تراکم استاتیکی نسبت به نمونه‌های بازسازی شده به روش تراکم دینامیکی از نفوذپذیری بیشتری برخوردار است. علت این امر آنست که روش تراکم استاتیکی ساختمان فلوکوله‌تری را در نمونه‌های بازسازی شده ایجاد میکند در حالیکه روش تراکم دینامیکی به ذرات خاک آرایش موازی می‌بخشد (۶). در ساختمان فلوکوله بدلیل اینکه ذرات خاک تقریباً لبه به لبه بایکدیگر تماس دارند، نسبت به ساختمان موازی که ذرات خاک وجه به وجه در تماس با هم می‌باشند، مقدار خلل و فرج بزرگ‌تر بیشتر بوده و بنابراین در ساختمان فلوکوله نفوذپذیری بیشتری مورد انتظار است.

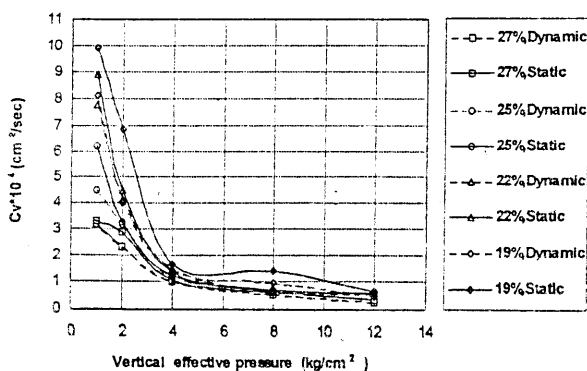
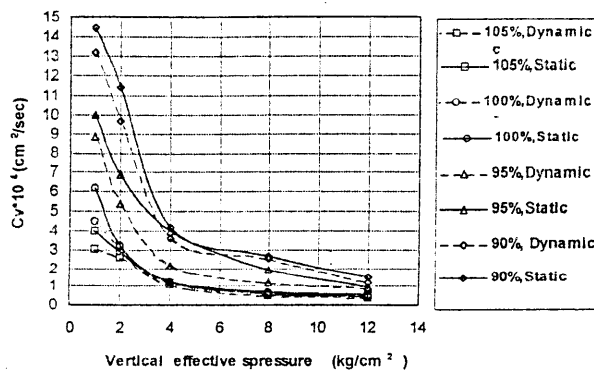
به منظور انجام مقایسه منطقی بین اثر روش تراکم استاتیکی و دینامیکی بر مقدار نفوذپذیری از آزمون  $t$  مستقل دو طرفه استفاده شد. این آزمون نشان داد که بین دو روش مذکور در سطح ۵ درصد

کاهش می یابد.

علیرغم آنکه تراکم استاتیکی به ساختمان خاک آرایش فلوکوله می بخشد و نفوذ پذیری آنرا زیادتر می نماید و در این سری از آزمایش ها نمونه های بازسازی شده به روش تراکم استاتیکی نسبت به نمونه های بازسازی شده به روش تراکم دینامیکی مقدار ضریب تحکیم بزرگتری را نشان می دهند ولی اختلاف آنها از نقطه نظر آماری حتی در سطح ۵ درصد نیز معنی دار نمی باشد.

شکل شماره ۳ تغییرات ضریب تحکیم در مقابل تراکم نسبی و درصد رطوبت در فشارهای تحکیم ۱ تا ۱۲ کیلوگرم بر سانتی متر مربع را برای نمونه های بازسازی شده به دو روش تراکم استاتیکی و دینامیکی برای یکی از خاکهای مورد مطالعه نشان می دهد. ارتباط نمایه فشردگی با تراکم نسبی، درصد رطوبت و روش تراکم

مقادیر نمایه فشردگی (CC) حاصل از آزمایشهای تحکیم بر روی نمونه های بازسازی شده به دو روش تراکم استاتیکی و دینامیکی در رطوبتهای و تراکم های نسبی مختلف و برای سه نوع خاک مورد آزمایش در جدول ۸ درج گردیده است.



شکل ۳ - تغییرات ضریب تحکیم نمونه (CH)، الف - در مقابل تراکم نسبی، ب - در مقابل رطوبت

اختلاف معنی دار وجود داشته و نتایج بدست آمده در این تحقیق با نتایج ارائه شده در تحقیقات قبلی مطابقت دارد.

ب- نشست پذیری

با انجام آزمایشهای تحکیم بر روی نمونه هایی که با روشهای تراکم استاتیکی و دینامیکی در رطوبتهای و تراکم های نسبی مختلفی بازسازی شده اند تغییرات ضریب تحکیم (CC) و نمایه فشردگی (CC) در مقابل تغییرات تراکم نسبی، درصد رطوبت و نیز روش تراکم مورد بررسی قرار گرفت که نتایج حاصله ذیلا تشریح می گردد.

ارتباط ضریب تحکیم (Cv) با تراکم نسبی، درصد رطوبت و روش تراکم جدولهای ۲ تا ۷ مقادیر ضریب تحکیم نمونه های بازسازی شده را در تراکم های نسبی مختلف و رطوبتهای متفاوت با دو روش تراکم استاتیکی و دینامیکی نشان می دهند.

ارقام مندرج در این جدولها بیانگر آنست که با افزایش تراکم نسبی، مقدار ضریب تحکیم کاهش می یابد و این کاهش با افزایش حد روانی خاک بیشتر می شود. علاوه بر این، برای یک تراکم نسبی ثابت نیز با افزایش حد روانی خاک مقدار ضریب تحکیم کاهش می یابد. دلیل این امر آن است که با افزایش تراکم نسبی خاک و همچنین حد روانی آن، مقدار نفوذ پذیری کاهش می یابد و چون ضریب تحکیم ارتباط مستقیم با مقدار نفوذ پذیری خاک دارد، بنابراین تغییرات آن همانند نفوذ پذیری است. برای یک تراکم نسبی ثابت و روش تراکم خاص، با افزایش فشار تحکیم مقدار ضریب تحکیم کاهش می یابد و این کاهش با افزایش حد روانی خاک قابل ملاحظه تر است. علت این پدیده آنست که با افزایش فشار تحکیم، نسبت تخلخل خاک و در نتیجه نفوذ پذیری آن کاهش یافته و بنابراین ضریب تحکیم کاهش می یابد. نتیجه دیگری که می توان از تحلیل ارقام مندرج در این جدولها به دست آورد این است که با افزایش درصد رطوبت نمونه های بازسازی شده، مقدار ضریب تحکیم کاهش می یابد. ولی این تغییرات خیلی کمتر از تغییرات در قبال مقدار تراکم نسبی می باشد. علت کاهش ضریب تحکیم در حالت اخیر این است که با افزایش درصد رطوبت نمونه در یک تراکم نسبی ثابت ذرات خاک آرایش موازی تری را کسب می کنند. بنابراین نه تنها سرعت تحلیل فشار آب منفذی کاهش یافته و زمان رسیدن به صد درصد تحکیم افزایش می یابد بلکه مقدار نفوذ پذیری خاک نیز کاهش پیدا می کند و لذا مقدار ضریب تحکیم که ارتباط مستقیم با نفوذ پذیری دارد

جدول ۲ - تغییرات ضریب تحکیم ( $C_v \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$ ) در مقابل تراکم نسبی (نمونه CL-ML)

		تراکم نسبی (%)				فشار ( $\text{kg/cm}^2$ )	
		۱۰۰	۹۵	۹۰			
دینامیکی	استاتیکی	دینامیکی	استاتیکی	دینامیکی	استاتیکی	دینامیکی	استاتیکی
۱/۱۹	۱/۳۴۸	۱/۲۱۸	۱/۵۴۳	۱/۶۱	۱/۷۶۳	۱/۹۰۲	۱/۹۳۴
۰/۹۶۴	۱/۱۳۳	۱/۱۴۳	۱/۳۶۴	۱/۲۷۴	۱/۴۳۱	۱/۴۸۳	۱/۵۵۹
۰/۳۶۹	۰/۴۷۴	۰/۵۴۳	۰/۸۷۱	۱/۰۴۱	۱/۲۶۱	۱/۲۱۳	۱/۳۰۴
۰/۲۰۷	۰/۲۶۰۲	۰/۲۳۷	۰/۳۹۴	۰/۴۷۵	۰/۵۸۱	۰/۶۴۷	۰/۷۱۵
۰/۱۵۸	۰/۱۹۸	۰/۲۲۳	۰/۲۸۴	۰/۳۹۳	۰/۵۶۱	۰/۴۶۹	۰/۶۸۸

جدول ۳ - تغییرات ضریب تحکیم ( $C_v \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$ ) در مقابل درصد رطوبت (نمونه CL-ML)

		درصد رطوبت				فشار ( $\text{kg/cm}^2$ )	
		۱۳/۹	۱۲	۱۰			
دینامیکی	استاتیکی	دینامیکی	استاتیکی	دینامیکی	استاتیکی	دینامیکی	استاتیکی
۱/۰۳۴	۱/۳۲۴	۱/۲۱۸	۱/۵۴۳	۱/۶۵۳	۱/۸۷۳	۱/۶۲۲	۲/۱۱
۰/۹۷۳	۰/۹۸۴	۱/۱۴۳	۱/۳۶۴	۱/۲۵۴	۱/۴۶۱	۱/۵۳۳	۱/۲۱۷
۰/۴۳۴	۰/۶۵۸	۰/۵۴۳	۰/۸۷۱	۰/۵۱۳	۰/۶۸۲	۰/۶۳۷	۰/۸۵۳
۰/۱۷۳	۰/۲۳۸	۰/۲۳۷	۰/۳۹۴	۰/۴۵	۰/۴۳۴	۰/۵۲۵	۰/۶۰۵
۰/۱۶۴	۰/۱۹۱	۰/۲۲۳	۰/۲۸۴	۰/۲۴۳	۰/۳۲۶	۰/۳۸۲	۰/۴۱۵

جدول ۴ - تغییرات ضریب تحکیم  $(C_v \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s})$  در مقابل تراکم نسبی (نمونه CL)

دینامیکی	تراکم نسبی (%)				دینامیکی	استاتیکی	دینامیکی	استاتیکی	دینامیکی	استاتیکی	دینامیکی	استاتیکی
	۱۰۵	۱۰۰	۹۵	۹۰								
۴/۰۱۲	۷/۰۷۵	۶/۳۷۵	۱۰/۱۴۹	۱۲/۵۴	۱۳/۴۶	۱۵/۵۱	۱۷/۴۳	۱				
۳/۴۷۵	۵/۹۷	۴/۸۶۴	۷/۱۴۵	۶/۹۵۷	۸/۴۲۷	۱۰/۱۲	۱۱/۱۸۱	۲				
۲/۱۳۷	۳/۰۲۲	۲/۷۵۳	۴/۳۴۳	۴/۶۴۹	۵/۳۱۶	۶/۴۵	۷/۰۲۳	۴				
۰/۹۶۳	۱/۱۷۵	۱/۴۹	۲/۳۴۲	۲/۴۳۴	۲/۴۲۷	۳/۵۵	۴/۰۱۶	۸				
۰/۷۲۵	۰/۹۸۱	۰/۸۶۱	۱/۳۲۷	۱/۱۰۶	۱/۷۵۶	۱/۷۳۳	۲/۱۵۳	۱۲				

جدول ۵ - تغییرات ضریب تحکیم  $(C_v \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s})$  در مقابل درصد رطوبت (نمونه CL)

دینامیکی	رطوبت نسبی				دینامیکی	استاتیکی	دینامیکی	استاتیکی	دینامیکی	استاتیکی	دینامیکی	استاتیکی
	۲۴	۲۲	۱۹	۱۶/۵								
۳/۳۵۸	۶/۲۹۶	۶/۳۷۵	۱۰/۱۴۹	۹/۱۱۵	۱۲/۱۷	۱۰/۵۴	۱۵/۰۲	۱				
۱/۸۳۴	۲/۸۸	۴/۸۶۴	۷/۱۴۵	۶/۱۴۹	۵/۶۹۷	۶/۶۴۳	۹/۸۹۸	۲				
۱/۵۲۸	۲/۷۳۹	۲/۷۵۳	۴/۳۴۳	۳/۳۳	۴/۴۲	۴/۶۴۴	۵/۶۴۸	۴				
۱/۴۷۲	۱/۹۳۴	۱/۴۹	۲/۳۴۲	۲/۴۲	۲/۷۱	۲/۵۵۷	۳/۱۲۷	۸				
۰/۸۸۶	۱/۲۷۷	۰/۸۶۱	۱/۳۲۷	۱/۵۲	۱/۷۶۲	۲/۰۱۷	۲/۱۹	۱۲				





جدول ۸- مقادیر نمایه فشردگی در تراکم‌های نسبی و رطوبتهای متفاوت برای دو روش تراکم استاتیکی و دینامیکی

نمایه فشردگی		درصد رطوبت	نمایه فشردگی		تراکم نسبی (%)	نمونه خاک
تراکم دینامیکی	تراکم استاتیکی		تراکم دینامیکی	تراکم استاتیکی		
۰/۰۷۹۶	۰/۰۸۱۷	۱۰	۰/۱۲۰۷	۰/۱۲۹	۹۰	سیلت -رسی
۰/۰۶۷	۰/۰۷۳	۱۲	۰/۰۷۹۶	۰/۰۸۹۹	۹۵	CL-ML
۰/۰۶۶	۰/۰۷۱	۱۳/۹	۰/۰۶۶	۰/۰۷۱	۱۰۰	
۰/۰۶۲	۰/۶۵	۱۶	۰/۰۴۴	۰/۰۶	۱۰۵	
۰/۲۰۱	۰/۲۰۹	۱۶	۰/۲۱۳	۰/۲۲	۹۰	رس با
۰/۱۸	۰/۱۹۵	۱۹	۰/۲۰۱	۰/۲۱۱	۹۵	خمیریایی
۰/۱۶۵	۰/۱۸۸	۲۲	۰/۱۶۵	۰/۱۸۸	۱۰۰	کم CL
۰/۱۵۸	۰/۱۸	۲۴	۰/۱۲۵	۰/۱۷۳	۱۰۵	
۰/۲۹۷	۰/۲۹۹	۱۹	۰/۳۰۵	۰/۳۱۵	۹۰	رس با
۰/۲۷۸	۰/۲۸۷	۲۲	۰/۲۶۴	۰/۲۸	۹۵	خمیریایی
۰/۲۴۷	۰/۲۶۱	۲۵	۰/۲۴۷	۰/۲۶۱	۱۰۰	زیاد CH
۰/۲۳۸	۰/۲۴۵	۲۷	۰/۲۱۱	۰/۲۱۳۷	۱۰۵	

موازی، نشست پذیری و در نتیجه CC افزایش می‌یابد. هر چند که نمونه‌های بازسازی شده به روش تراکم استاتیکی از آنهاییکه به روش تراکم دینامیکی متراکم شده‌اند بدلیل داشتن ساختمان فلوکوله‌تر، نشست پذیری بیشتری از خود نشان دادند ولی این اختلاف از نقطه نظر آماری که با استفاده از آزمون t مستقل دو طرفه کنترل شد حتی در سطح ۵ درصد معنی دار نبوده است.

بطور خلاصه بر اساس مجموع نتایج بدست آمده از این تحقیق، از آنجا که دو روش تراکم استاتیکی و دینامیکی بترتیب در خاک ساختمان فلوکوله و موازی ایجاد نموده و همین امر موجب می‌گردد تا نفوذپذیری و نشست پذیری خاک حاصل از این دو روش تراکم متفاوت باشد. بر اساس این نتایج تراکم استاتیکی خاک موجب افزایش نفوذپذیری نسبت به تراکم دینامیکی گردیده و بعلاوه موجب بیشتر شدن تحکیم پذیری خاک نیز می‌گردد.

### سپاسگزاری

نظر به اینکه امکانات مالی و تجهیزاتی این طرح توسط معاونت پژوهشی دانشگاه تهران و مؤسسه تحقیقات فنی مهندسی کشاورزی فراهم گردیده است، لذا اینجانب مراتب تقدیر و تشکر خود را از دو مؤسسه مذکور اعلام می‌دارم.

همانگونه که از ارقام مندرج در جدول ۸ مشهود است با افزایش تراکم نسبی نمونه‌ها، نمایه فشردگی کاهش می‌یابد. علت این است که با افزایش تراکم نسبی نمونه نه تنها نسبت تخلخل آن کم می‌شود بلکه تغییرات نسبت تخلخل در اثر تغییرات فشار نیز دچار کاهش می‌گردد. با افزایش حد روانی بدلیل آنکه مقدار آب جذب شده در اطراف ذرات بیشتر می‌باشد، بنابراین نمایه فشردگی (CC) و پتانسیل نشست پذیری افزایش می‌یابد.

ارقام مندرج در جدول ۸ نشان می‌دهند که در یک تراکم نسبی ثابت با افزایش رطوبت نمونه‌های بازسازی شده مقدار CC کاهش می‌یابد. علت این امر آن است که با افزایش درصد رطوبت نمونه پتانسیل جذب آب آن پس از قرار گرفتن در دستگاه تحکیم و اشباع آن کاهش می‌یابد، بنابراین نمونه کمتر تورم پیدا نموده و در نتیجه آرایش اولیه ساختمان آن تا حدودی ثابت باقی می‌ماند. بنابراین در اثر اعمال سربار، نشست پذیری کمتری از خود نشان می‌دهد. علاوه بر این، همانگونه که قبلاً اشاره شد، با توجه به اینکه با افزایش رطوبت نمونه ذرات خاک آرایش موازی‌تر به خود می‌گیرند، لذا با افزایش فشار تحکیم، نشست پذیری کمتری نشان می‌دهند. از آنجائیکه در رطوبتهای کمتر از بهینه ساختمان خاک فلوکوله‌تر است، لذا با افزایش فشار و حرکت ذرات بر روی یکدیگر و تمایل به سمت آرایش

## REFERENCES

1. Bowles, J. E. 1979. Physical and Geotechnical Properties of Soils. McGraw-Hill, INC, USA, 478. pp.
2. Boynton, S. S., and D. E. Daniel. 1985. Hydraulic Conductivity Test on Compacted Clay. Journal of Geotechnical Eng. ASCE Vol .11, No. 4, PP.465-478.
3. Das, B. M. 1990. Principles of Geotechnical Engineering. McGraw-Hill International Editions.
4. Ingles, O. G. and H. L. Williams. 1956. Engineering Characteristic of Expansive Clays. Trans. ASCE.
5. Kabir, M. G., and A. J. Lutneyger. 1990. In Situ Estimation of the Coefficient of Consolidation in Clays. Canadian Geotechnical Journal. Vol.27, pp.58-67.
6. Lambe, T. W. 1998a. The Engineering Behavior of Compacted Clay. Journal of the Soil Mechanic and Foundation Division, ASCE, Vol.84, No. 2M2. pp.1654-1 to 1654-34.
7. Lambe, T. W. 1958b. The Engineering Behavior of Compacted Clay. Journal of the soil Mechanic and Foundauiou Division, ASCE, Vol.84, No.2M2, pp.1654-1to 1654-35.
8. Manfred, R. H. 1990. Engineering Principles of Ground Modification. McGraw-Hill Book Company, pp.12-80.
9. Michaels, A. S., and C. S. Lin 1954. The Permeability of Kaolinite. Industrial and Engineering Chemistry, Vol.46, pp.1239-1246.
10. Mitchell, J. K., D. R. Hooper., and R. G. Campanella.1965. Permeability of Compacted Clay. Journal of the soil Mechanic and Foundation Division. ASCE, Vol. 91, No. SM4, pp.41-65.
11. Mitchell, J. K., and J. S. Younger. 1976. Abnormalities in Hydraulic Flow Through Fine-Grained Soil. ASTM Special Technical Publication No. 417. Philadelphia, Pa., pp. 106-139.
12. Olson, R. E., and D. E. Daniel.1981. Measurement of the Hydraulic Conductivityof Fine-Grained Soils. ASTM Special Technical Publication, No.746, Philadelphia, pa., pp.18-64.
13. Punmia, B. C. 1992. Soil Mechanic and Foundation. Laxmi Publications, New Delhi.
14. Tekinsoy, M. A., and T. Haktanir, 1990. One-Dimensional Consolidation of Unsaturation Fine-Grained Soils. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 116, No.5, pp.838-850.
15. Zimmie, T. F. 1981. Geotechnical Testing Consideration of Laboratory Permeability for Hazardous Waste Disposal Sitting. ASTM Special Technical Publication No.760. Philadelphia, Pa. pp.293-304.

**Comparison of Permeability and Consolidation  
Properties of Clayey Soils Compacted by  
Dynamic and Static Methods**

**H. RAHIMI AND R. GHOBADIAN**

Professor, and Former Graduate Student, Department of Irrigation Reclamation,  
Faculty of Agriculture University of Tehran Karaj, Iran.

Accepted April 22, 1999

**SUMMARY**

For evaluation of mechanical properties of soils in a proper manner, to be used for design purposes, it is vital that these parameters be determined through laboratory tests performed on compacted soil specimens, possessing similar conditions as the soil in the field. Normally, the remolded soil specimens in laboratory are made by using dynamic compaction method (compaction of the soil in the mold using hammer drops), while, in the field conditions, soil is compacted by sheep's foot rollers which apply static compaction. In the present research, to evaluate and compare the effects of each compaction type on permeability and consolidation properties of fine-grained soils, three soil samples of CL-ML, CL and CH classification were taken. All samples were compacted at different moisture contents and different relative densities using both dynamic as well static compactive efforts. Finally, the remolded specimens were tested for determination of permeability and consolidation properties. The results for the permeability tests indicated that statically compacted specimens are more permeable than the specimens compacted by dynamic method. By increasing moisture content and relative density, coefficient of permeability is reduced. According to the results of consolidation tests, by increasing liquid limit of the soil, coefficient of consolidation ( $C_v$ ) is reduced and compressibility index ( $C_c$ ) increased. Moreover, the specimens compacted by static method, had higher coefficient of consolidation and compression index compared to the dynamically compacted ones. Also, it was concluded that regardless of soil's physical properties, increasing moisture content and relative density, would reduce  $C_v$  and  $C_c$  of the specimens.

**Keywords:** Static compaction, Dynamic compaction, Consolidation, Permeability