

# ارزیابی تحلیلی و آزمایشگاهی تغییرات ضریب تحکیم در خاک‌های رسی نرم

نادر عباسی<sup>i</sup>؛ حسن رحیمی<sup>ii</sup>؛ علی فاخر<sup>ii</sup>؛ عبدالحسین هورفر<sup>ii</sup>

## چکیده

در اکثر تئوری‌های مربوط به پدیده تحکیم به ویژه در تئوری ترزاقی، مقدار ضریب تحکیم در طول فرآیند تحکیم ثابت فرض می‌شود؛ در حالی که این ضریب با پیشرفت تحکیم و متناسب با کاهش نسبت پوکی تغییر می‌کند. به علاوه روشهای متداول تعیین ضریب تحکیم ماهیت تجربی و ترسیمی دارند و از دقت کافی برخوردار نیستند. این پژوهش به منظور مرتفع ساختن بخشی از محدودیت‌های یاد شده انجام گرفته است. بدین منظور ابتدا با لحاظ نمودن تغییرات ضریب تحکیم در طول فرآیند تحکیم، معادله جدیدی که یک معادله دیفرانسیل جزئی غیرخطی است، به عنوان معادله حاکم بر پدیده تحکیم ارائه و با استفاده از روش عددی تفاضل‌های محدود حل شد. سپس به منظور ارزیابی صحت جواب‌های به دست آمده از تئوری غیرخطی ارائه شده، مطالعات آزمایشگاهی بر روی ۶ نمونه خاک با خواص پلاستیسیته متفاوت و با استفاده از دستگاه تحکیم هیدرولیکی انجام گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایش‌های مذکور، مشخص شد که نتایج حاصل از معادله غیرخطی ارائه شده در این تحقیق، تطابق بهتری با نتایج حاصل از آزمایش در مقایسه با تئوری ترزاقی دارد.

## کلمات کلیدی

ضریب تحکیم، تحکیم یک بعدی، تئوری ترزاقی، نشست خاک، رس نرم

## *Analytical and Experimental Assessment of the Coefficient of Consolidation Variations in Soft Soils*

N. Abbasi- H. Rahimi - A. Fakher and A. Hoorfar

### ABSTRACT

The assumption of constant value for coefficients of consolidation during consolidation process is one of the major limitations in Terzaghi's equation. Besides, coefficient of consolidation is determined based on the results of one-dimensional consolidation tests using graphical procedures with empirical nature. In the present research, theoretical and experimental studies have been undertaken in order to overcome the mentioned limitations and improve Terzaghi's method. Based on a theoretical analysis made, a one-dimensional non-linear partial differential equation has been developed as governing equation for consolidation, considering variable value for coefficient of consolidation. A finite difference numerical approach was used for solution of the non-linear equation. In order to verify reliability of the proposed non-linear equation, experimental studies were conducted on 6 types of soils having different plasticity using hydraulic consolidation apparatus. The results of the developed theory have been compared with those obtained using Terzaghi's theory and experimental results. It has been shown that the results of the proposed theory are closer to the experimental results than those obtained using Terzaghi's linear theory.

### KEYWORDS

Consolidation, compressibility, permeability, non-linear equation.

<sup>i</sup> استادیار موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی آدرس: کرج - صندوق پستی ۸۴۵-۲۱۵۸۵ دور نگار ۰۶۲۷۷-۲۷۰۶۱-۰۲۶۱

email: nader\_iaeri@yahoo.com

<sup>ii</sup> به ترتیب استاد، دانشیار و استادیار دانشگاه تهران

همبستگی از سایر موارد کمتر است. بر این اساس رابطه جدیدی به صورت زیر ارائه کردند:

$$C_v = \frac{3}{100I_s^{3.54}} \quad (1)$$

که در آن  $C_v$  ضریب تحکیم بر حسب  $m^2/sec$  و  $I_s$  نمایه انقباض است [۱۶].

در خصوص اصلاح روشهای ترسیمی تعیین ضریب تحکیم با استفاده از نتایج آزمایش تحکیم نیز تحقیقات متعددی انجام شده است. از جمله رابینسون ضمن نقد روشهای ترسیمی متداول (روش لگاریتم زمان کاساگرانده و جذر زمان تیلور) انتهای بخش خطی از قسمت اولیه منحنی لگاریتم زمان را به عنوان نقطه مربوط به ۲۲ درصد تحکیم معرفی و برای تعیین مقدار  $C_v$  استفاده از زمان مربوط به ۲۲ درصد تحکیم و فاکتور زمان مربوطه را پیشنهاد کرد [۱۵]. مصری و همکاران بیان کردند که گرچه در روش پیشنهادی رابینسون مقدار  $C_v$  از تحکیم ثانویه تأثیر خیلی کمی می‌پذیرد ولی فشردگی اولیه خاک می‌تواند در زمان مربوط به ۲۲ درصد تحکیم اثر بگذارد و در نتیجه از دقت روش بکاهد. بر این اساس آنها استفاده از زمان مربوط به ۷۰ درصد تحکیم به دست آمده از منحنی لگاریتم زمان را بدین منظور پیشنهاد کردند [۱۳]. تائو وی فنگ نقطه انتهای بخش خطی منحنی جذر زمان (روش تیلور) را مربوط به ۶۰ درصد تحکیم معرفی و زمان ۶۰ درصد تحکیم و فاکتور زمان مربوطه را برای تعیین ضریب  $C_v$  پیشنهاد کرد [۷]. چن بیان کرد چون که روشهای مرسوم تعیین ضریب تحکیم (روش جذر زمان و لگاریتم زمان) بر اساس معادلاتی که هر کدام در محدوده معین از درجه تحکیم صادق هستند، بسط داده شده‌اند، لذا نتایج به دست آمده از این روش‌ها دارای دقت کافی نیست؛ لذا برای مرتفع ساختن این محدودیت یک روش جدید موسوم به روش مجذور مربعات را مطابق رابطه ۲ برای تعیین ضریب تحکیم ارائه کرد [۵].

$$T_v \equiv \sqrt[3]{\frac{U^6}{2(1-U^6)}} \quad (2)$$

در رابطه اخیر  $U$  درصد تحکیم و  $T_v$  فاکتور زمان است. همان طور که ملاحظه شد، در مجموعه تحقیقات عنوان شده، تنها به اصلاح روش تعیین ضریب تحکیم توجه شده است.

در تحقیقات دیگری نیز سعی شده است تئوری مناسب تری برای تحکیم با لحاظ نمودن تغییرات آن در طول فرآیند تحکیم ارائه شود. گیبسون و همکاران مسئله تحکیم را با فرض کرنش بزرگ و با در نظر گرفتن تغییرات فشردگی و نفوذپذیری مورد

یکی از مسائل مهم و اجتناب ناپذیر در طراحی و احداث سازه‌های مختلف عمرانی، تعیین مقدار و زمان نشست پی سازه بر اثر فشردگی لایه‌های رسی تحت الارضی است. فشردگی ایجاد شده در لایه خاکهای رسی و به عبارت دیگر، نشست تحکیمی، در اغلب موارد بسیار قابل ملاحظه است و به دلیل ماهیت تدریجی و طولانی مدت آن یک خطر بالقوه برای اکثر سازه‌های بنا شده بر روی خاک های تحکیم پذیر محسوب می‌شود. در پروژه‌های بهسازی زمین نظیر پیش بارگذاری، تعیین دقیق زمان تحکیم و به عبارت دیگر، زمان انتظار، اهمیت فراوانی در برنامه ریزی و مدیریت این پروژه‌ها دارد.

سرعت وقوع نشست تحکیمی، تابع عوامل متعددی از جمله شرایط بارگذاری و مشخصات خاک است. تاثیر مشخصات خاک بر زمان تحکیم، با کمیتی به نام ضریب تحکیم که در واقع بیانگر قابلیت خاک در استهلاک فشار آب منفذی است، بیان می‌شود. در اغلب تئوری‌ها و روشهای مورد استفاده برای ارزیابی زمان تحکیم، نظیر تئوری ترزاقی، مقدار ضریب تحکیم در طول فرآیند تحکیم ثابت در نظر گرفته می‌شود. درحالی که اولاً این ضریب با افزایش تنش مؤثر اعمال شده و کاهش نسبت پوکی متغیر است و ثانیاً روشهای مرسوم تعیین آن کاملاً ماهیت تجربی دارد و از دقت کافی برخوردار نیست. این موضوع در خاک های رسی نرم که دارای پتانسیل فشردگی زیادی هستند مصداق بیشتری دارد. در طول سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای در خصوص بهبود روشهای ترسیمی و تجربی موجود برای تعیین ضریب تحکیم و همچنین ارائه تئوری های کارآمدتر صورت گرفته است که در این قسمت به موارد برجسته آنها اشاره می‌شود.

کاریر و همکاران با بیان محدودیت های مربوط به روشهای ترسیمی تعیین ضریب تحکیم، یک روش محاسباتی بر مبنای مشخصات فیزیکی خاکهای رسی، نظیر عدد فعالیت، نمایه روانی و خمیری برای تعیین ضریب تحکیم ارائه کردند [۳]. راجو رابطه دیگری را بر اساس مشخصات فیزیکی و مقدار فشار سربار برای خاک‌های رسی عادی تحکیم یافته ارائه کرد [۱۴]. شریدهاران و همکاران نشان دادند که ضریب تحکیم نمونه‌های رسی علاوه بر مشخصات پلاستیسیته خاک به مقدار تنش مؤثر اعمال شده نیز وابسته است. هم چنین از میان مشخصات مختلف پلاستیسیته خاک، همبستگی بین ضریب تحکیم و نمایه انقباض (تفاضل حدود روانی و انقباض) بیشتر و تاثیر تنش مؤثر اعمال شده در این

مطالعه قرار داده، یک معادله غیرخطی به شرح زیر به عنوان معادله حاکم بر تحکیم ارائه کردند [۹].

$$-\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w}-1\right)\frac{d}{de}\left(\frac{k(e)}{1+e}\right)\frac{\partial e}{\partial z}+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{k(e)}{\gamma_w(1+e)}\frac{d\sigma'}{de}\frac{\partial e}{\partial z}\right)+\frac{\partial e}{\partial t}=0 \quad (3)$$

که در آن:  $\gamma_w$ ، وزن مخصوص آب،  $\gamma_s$ ، وزن مخصوص ذرات جامد،  $e$ ، نسبت پوکی،  $k$  ضریب نفوذپذیری و  $\sigma'$  تنش موثر قائم است. مصری و رخسار با در نظر گرفتن تغییرات ضرائب فشردگی و نفوذپذیری در تئوری تحکیم ترزاقی، یک برنامه رایانه ای تهیه کردند و مسئله را به صورت عددی حل نمودند [۱۲]. لذا همکاران با در نظر گرفتن تغییرات ضریب نفوذپذیری و ضریب فشردگی حجمی در طول فرآیند تحکیم، یک معادله غیر خطی به عنوان تئوری حاکم بر تحکیم خاکهای رسی ارائه کردند. سپس با طرح فرضیاتی، معادله غیرخطی را به خطی تبدیل کردند و با استفاده از روش موجود برای حل تحلیلی معادله خطی مشابه، رابطه بین درصد تحکیم ( $U$ ) و فاکتور زمان ( $T$ ) را به صورت زیر ارائه نمودند [۱۱].

$$U=1-\sum_{n=0}^{\infty}\frac{2}{N^2}\exp^{-N^2\left\{\left[1/2\right]\left[1+\Delta\sigma/\sigma_i\right]^{(1-C_r/M)}\right\}T} \quad (4)$$

همان طور که ملاحظه می شود در رابطه مذکور ارتباط بین درجه تحکیم ( $U$ ) و فاکتور زمان ( $T$ )، متأثر از ضرائب  $C_c$ ،  $M$  (شیب خط  $e - \log k$ ) و نسبت اختلاف تنش به تنش اولیه ( $\Delta\sigma/\sigma_i$ ) است. گرچه در این مطالعه، تغییرات ضریب نفوذپذیری و ضریب فشردگی حجمی در طول فرآیند تحکیم لحاظ شده است، ولی به خاطر اینکه معادله مذکور تابعی از فاکتور زمان ( $T$ ) و فاکتور زمان نیز توسط ضریب تحکیم ( $C_v$ ) با زمان واقعی ( $t$ ) در ارتباط است، نیاز به محاسبه ضریب تحکیم بر اساس روشهای تجربی موجود هنوز وجود دارد. در پژوهش حاضر با در نظر گرفتن تغییرات ضریب تحکیم، رابطه بین درصد تحکیم ( $U$ ) و زمان ( $t$ ) به طور مستقیم و بدون نیاز به استفاده از فاکتور زمان ارائه شده است. به عبارت دیگر، در روش ارائه شده در این تحقیق، هم تغییرات ضریب تحکیم در طول فرآیند تحکیم لحاظ شده و هم نیازی به تعیین ضریب تحکیم بر اساس روشهای تجربی و یا ترسیمی نیست.

## ۲- مواد و روش ها

مراحل این تحقیق مشتمل است بر انجام مطالعات نظری در خصوص معادله حاکم بر تحکیم با در نظر گرفتن تغییرات ضریب

تحکیم، حل تحلیلی و عددی معادله به دست آمده و مطالعات آزمایشگاهی به منظور ارزیابی صحت روابط و معادلات ارائه شده. در این قسمت ابتدا چگونگی بسط معادله حاکم بر تحکیم با لحاظ نمودن تغییرات ضریب نفوذپذیری و ضریب فشردگی حجمی و نهایتاً ضریب تحکیم در طول فرآیند تحکیم ارائه و سپس مطالعات آزمایشگاهی انجام شده به منظور ارزیابی صحت نتایج حاصل از معادله غیرخطی بسط داده شده مورد بحث قرار می گیرد.

### ۲-۱- بسط معادله حاکم

بر اساس روابط مقدماتی مکانیک خاک و همچنین با توجه به مساوی بودن قدر مطلق تغییرات ایجاد شده در فشار آب منفذی ( $u$ ) با تغییرات ایجاد شده در تنش موثر ( $\sigma'$ )، برای یک المان کوچک خاک رابطه پیوستگی جریان در شرایط تحکیم یک بعدی به صورت زیر قابل ارائه است [۴].

$$\left(\frac{1}{1+e}\right)\frac{\partial e}{\partial t}=-\frac{k}{\gamma_w}\frac{\partial^2\sigma'}{\partial z^2} \quad (5)$$

رابطه اخیر چگونگی تغییرات نسبت پوکی نسبت به ضریب نفوذپذیری و تنش موثر را در فرآیند تحکیم نشان می دهد. از طرف دیگر، بر اساس نتایج تحقیقات انجام شده تغییرات نسبت پوکی به ازای تنش موثر و همچنین به ازای ضریب نفوذپذیری به طور مجزا در مقیاس نیمه لگاریتمی برای خاکهای رسی تحکیم نیافته و یا عادی تحکیم یافته، خطی است [۲]، [۸]. در این تحقیق نیز برای بسط معادله حاکم بر تحکیم خاک های رسی نرم از فرض وجود رابطه خطی بین کمیت های یاد شده به شکل کلی زیر استفاده شد:

$$e=a-C_c \text{Log} \sigma' \quad (6)$$

$$e=b+M \text{log} k \quad (7)$$

در روابط اخیر، از نظر فیزیکی ضریب  $a$  برابر مقدار نسبت پوکی به ازای تنش موثر واحد ( $a=e_{\sigma=1}$ ) و ضریب  $b$  برابر مقدار نسبت پوکی خاک به ازای ضریب نفوذپذیری واحد ( $k=1$ ) بوده و به ترتیب به بعد مورد استفاده برای تنش موثر و ضریب نفوذپذیری بستگی دارند.  $C_c$  شیب رابطه خطی  $e - \text{Log} \sigma'$  بوده و به نام ضریب فشردگی معروف است و  $M$  شیب رابطه خطی  $e - \text{Log} k$  است که در این تحقیق با نام نمایه نفوذپذیری معرفی شده است. شایان ذکر است که شیب خطوط مذکور مستقل از بعد تنش موثر و ضریب نفوذپذیری است. با ترکیب

روابط (۶) و (۷) رابطه بین ضریب نفوذپذیری و تنش موثر نیز به شرح زیر به دست می‌آید:

$$k = 10^{\frac{a-b}{M}} \cdot \sigma'^{-\frac{C_c}{M}} \quad (۸)$$

با مشتق‌گیری از طرفین رابطه شماره ۶ نسبت به زمان می‌توان نوشت:

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -\frac{C_c}{\sigma'} \frac{\partial \sigma'}{\partial t} \quad (۹)$$

با قرار دادن روابط شماره ۸ و ۹ در رابطه شماره (۵) می‌توان نتیجه گرفت:

$$\frac{\partial \sigma'}{\partial t} = \frac{1+e_0}{C_c \cdot \gamma_w} 10^{(a-b)/M} (\sigma')^{(1-C_c/M)} \frac{\partial^2 \sigma'}{\partial z^2} \quad (۱۰)$$

سپس با فرض

$$\alpha = 1 - \frac{C_c}{M} \quad \text{و} \quad C_n = \frac{1+e_0}{C_c \cdot \gamma_w} 10^{\frac{a-b}{M}} \quad (۱۱)$$

و با در نظر گرفتن اینکه  $\sigma' = \sigma'_i - u$  است، معادله شماره (۱۰) به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_n (\sigma'_i - u)^\alpha \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (۱۲)$$

که در آن  $\sigma'_i$  تنش کل و  $u$  فشار آب منفذی اضافی است. رابطه شماره ۱۲ تئوری غیرخطی ویا معادله عمومی حاکم بر پدیده تحکیم است که با لحاظ نمودن تغییرات ضریب نفوذپذیری و همچنین ضریب فشردگی حجمی، در طول فرآیند تحکیم استخراج شده است. معادله مذکور از نظر شکل عمومی شبیه معادله یک بعدی معروف ترزاقی است؛ با این تفاوت که ضریب آن علاوه بر مشخصات خاک ( $C_n$  و  $\alpha$ ) تابعی از خود کمیت فشار آب منفذی اضافی ( $u$ ) نیز هست. معادله اخیر در حالت خاصی که مقدار ضریب  $\alpha$  برابر صفر است به معادله تحکیم یک بعدی ترزاقی کاهش می‌یابد. در این پژوهش ضریب  $\alpha$ ، به نام عامل غیرخطی،  $C_n$  به نام ضریب تحکیم پایه و مجموعاً به عنوان ضرائب غیرخطی تحکیم نامیده شدند. حل معادله غیرخطی بسط داده شده معادله شماره (۱۲) به لحاظ اینکه تمام مصادیق غیر خطی بودن را همزمان داراست، یک معادله دیفرانسیل جزئی غیرخطی بوده، روش حل تحلیلی بسته ای نیز برای آن وجود ندارد [۶]. لذا در این تحقیق برای حل معادله مذکور از روش عددی تفاضلهای محدود (F.D)، به لحاظ سادگی و همچنین سازگاری بیشتر آن با مسائل مربوط به جریان سیالات، استفاده شد [۱].

یکی از استراتژی‌های موجود برای حل عددی معادلات دیفرانسیل جزئی غیر خطی، خطی نمودن آنها و استفاده از الگوریتم‌های مختلف موجود برای حل معادلات دیفرانسیل مشابه خطی است. در این پژوهش نیز ابتدا معادله مورد نظر به حالت خطی تبدیل، سپس از الگوریتم برکت-کلارک به خاطر مزیت‌های نسبی آن در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها، برای حل معادله و تحلیل نتایج، استفاده شد. در روش ارائه شده توسط برکت و کلارک که در واقع یک روش صریح با تغییر جهت متناوب (ADE) است، مسأله در یک گام زمانی معین دوبار در دو جهت مختلف حل می‌گردد و سپس مقادیر متوسط آنها به عنوان مقادیر اصلی برای آن گام زمانی در نظر گرفته می‌شود. الگوریتم مورد استفاده در این روش به صورت زیر است [۱]:

$$\frac{P_i^{n+1} - P_i^n}{\Delta t} = C_v \left( \frac{P_{i-1}^{n+1} - P_i^{n+1} - P_i^n + P_{i+1}^n}{(\Delta x)^2} \right) \quad (۱۳)$$

$$\frac{q_i^{n+1} - q_i^n}{\Delta t} = C_v \left( \frac{q_{i-1}^n - q_i^n - q_i^{n+1} + q_{i+1}^{n+1}}{(\Delta x)^2} \right)$$

$$u_i^{n+1} = \frac{1}{2} (p_i^{n+1} + q_i^{n+1})$$

بدین ترتیب ابتدا در معادله شماره ۱۲ با فرض  $C_n (\sigma'_i - u)^\alpha = C_v$  معادله به حالت خطی تبدیل می‌شود و با حل معادله خطی، مقدار  $u$  به صورت تخمین ( $u^P$ ) محاسبه و بر اساس آن مقدار جدیدی برای ضریب  $C_v$  با استفاده از رابطه  $C_v = C_n (\sigma'_i - u^P)^\alpha$  به دست می‌آید. سپس با استفاده از مقدار جدید این ضریب، مجدداً معادله خطی حل و مقدار جدیدی برای  $u$  به عنوان مقدار تصحیح شده ( $u^C$ )، تعیین می‌شود. این عمل تا موقعی که اختلاف دو مقدار متوالی تعیین شده برای  $u$  یعنی ( $u^C - u^P$ ) از یک مقدار روا داری (Tolerance) کمتر شود ادامه می‌یابد. آخرین مقدار به دست آمده برای  $u$  در این مرحله به عنوان مقدار نهایی  $u$  برای نقطه مورد نظر پذیرفته شده و عملیات مشابه برای سایر نقاط شبکه ایجاد شده در میدان حل مسأله تکرار می‌شود. برای حل معادله با الگوریتم یادشده یک کد رایانه ای تهیه شد.

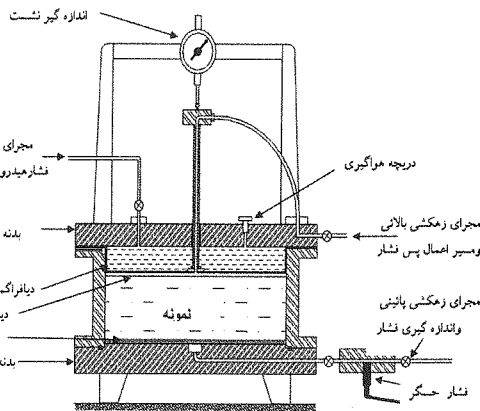
## ۲-۲- مطالعات آزمایشگاهی

مطالعات آزمایشگاهی به منظور ارزیابی صحت نتایج حاصل از معادله غیرخطی بسط داده شده و روش حل آن انجام شد. به منظور انجام این بررسی ۶ نمونه خاک ریزدانه تهیه و آزمایش تحکیم هیدرولیکی بر روی آنها انجام شد. از آنجا که یکی از

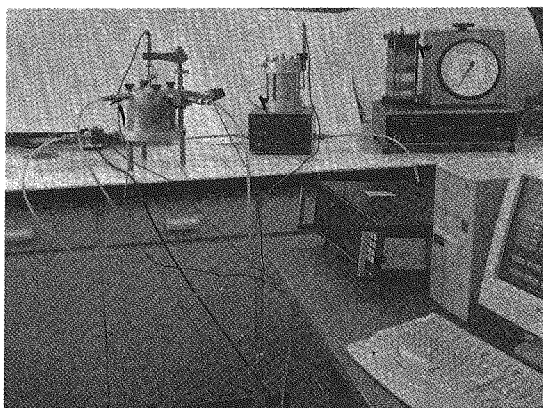
اهداف این پژوهش ارزیابی تاثیر مشخصات فیزیکی نمونه های مورد آزمایش بر رفتار تحکیمی آنها بوده است، لذا در انتخاب آنها سعی شد که نمونه های انتخاب شده دارای خواص پلاستیسیته متفاوتی باشند. بدین منظور از مقدار حد روانی که متاثر از خصوصیات مختلف فیزیکی و شیمیائی خاک از جمله درصد رس و سیلت، انواع و میزان آنیون و کاتیون های موجود در خاک و همچنین نوع کانی های تشکیل دهنده است، به عنوان معیار انتخاب، استفاده شد. به طوری که مقدار حد روانی نمونه ها از ۲۶ الی ۷۱ درصد متغیر بود.

#### معرفی دستگاه مورد استفاده

با توجه به اینکه انجام آزمایش تحکیم بر روی نمونه های رسی نرم و تعیین ضریب نفوذپذیری در حین انجام آزمایش با استفاده از دستگاه تحکیم مرسوم امکان پذیر نبود، لذا از یک دستگاه تحکیم هیدرولیکی استفاده شد. این دستگاه قابلیت انجام آزمایش بر روی نمونه های خاک تا قطر ۱۰۰ میلیمتر را دارا بوده، بارگذاری نمونه به صورت هیدرولیکی و با استفاده از فشار آب از طریق یک دیافراگم لاستیکی انجام می شود. اجزای دستگاه مورد استفاده به صورت شماتیک در شکل شماره ۱ و تصویر آن به همراه سایر اجزای ضمیمه در شکل شماره ۲ نشان داده شده است. جزئیات مربوط به اجزای تشکیل دهنده و روش انجام آزمایش در مرجع شماره [۲] به تفصیل ارائه شده است. در این تحقیق به لحاظ نیاز به دقت زیاد، دستگاه مورد استفاده، مطابق شکل ۲ مجهز به سیستم های اندازه گیری و ثبت الکترونیکی شد؛ به طوری که کمیت های مختلف مورد نظر به طور همزمان و در دوره های زمانی تعریف شده ثبت و در یک فایل مشخص ذخیره می شدند. هم چنین به منظور کنترل و انتخاب کمیت های مورد نیاز و چگونگی ثبت آنها و هم چنین باز خوانی فایل ذخیره شده توسط دیتالاگر و انتقال آنها به رایانه یک بسته نرم افزاری مخصوص تهیه شد.



شکل (۱): شماتیک دستگاه تحکیم هیدرولیکی



شکل (۲): دستگاه تحکیم هیدرولیکی و ضوابط آن (۱- دستگاه تحکیم هیدرولیکی ۲- اندازه گیر تغییر حجم ۳- مولد فشار ثابت ۴- دیتالاگر) آماده سازی نمونه و انجام آزمایش

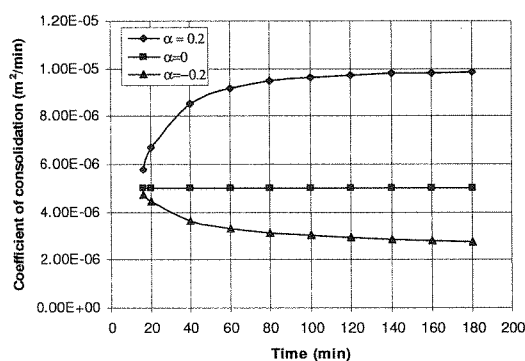
برای تهیه نمونه آزمایشی ابتدا خاک رسی خشک با خرد کردن به صورت پودر ریز در آمده، سپس با درصد مناسب آب مقطر دوغاب رس تهیه شد. سپس به منظور همگن شدن نمونه و خارج شدن هوای محبوس حدود ۲ الی ۳ ساعت با همزن الکتریکی به هم زده شده، به مدت حدود یک هفته در شرایطی که امکان تبخیر وجود نداشته باشد، نگهداری شد. به علت اینکه تغییر حجم رس نرم زیاد است، ضخامت اولیه نمونه حداقل دو برابر ضخامت پیش بینی شده نمونه بعد از تحکیم در نظر گرفته شد. نمونه رسی تهیه شده در داخل حلقه نمونه ریخته شده و تمهیدات لازم در خصوص هواگیری داخل نمونه و مجاری مختلف آب و شیر آلات صورت گرفت. بعد از اطمینان از اشباع کامل نمونه، سطح نمونه صاف و دیسک برنزی اشباع شده روی آن قرار گرفته، قسمت بالایی دستگاه همراه با اورینگ بالای نمونه با دقت به بدنه پایینی پیچ شد [۱۰]. روش انجام آزمایش تحکیم با دستگاه تحکیم هیدرولیکی بسته به شرایط زهکشی، محل تعیین فشار آب

### ۳- نتایج و بحث

پژوهش حاضر در برگرنده ارزیابی‌های نظری و آزمایشگاهی مربوط به تئوری تحکیم خاک‌های ریزدانه نرم است و نتایج به دست آمده از این بررسی‌ها به شرح زیر است:

#### ۳-۱- ارزیابی چگونگی تغییر ضریب تحکیم

چنانچه در بخش‌های قبلی اشاره شد، ضریب معادله بسط داده شده برای تحکیم، یعنی عبارت  $C_n(\sigma_1 - u)^\alpha$  برخلاف تئوری تحکیم ترزاقی، علاوه بر مشخصات خاک ( $C_n, \alpha$ ) تابع مقدار تنش مؤثر  $(\sigma_1 - u)$  نیز هست. چگونگی تغییر این ضریب نسبت به زمان در یک نقطه از محیط به ازای مقادیر مختلف عامل غیرخطی تحکیم ( $\alpha$ ) بر اساس حل عددی معادله مذکور مطابق شکل شماره ۳ تعیین شد. همان طور که از شکل مذکور به وضوح قابل ملاحظه است، تغییرات ضریب تحکیم نسبت به زمان بستگی به مقدار ضریب عامل غیر خطی تحکیم ( $\alpha$ ) دارد. بدین صورت که ضریب تحکیم به ازای مقادیر مثبت عامل غیر خطی تحکیم ( $\alpha > 0$ )، روند افزایشی و به ازای مقادیر منفی آن ( $\alpha < 0$ )، روند کاهشی دارد و در حالتی که مقدار این ضریب صفر است ( $\alpha = 0$ )، مقدار ضریب تحکیم نسبت به زمان ثابت است؛ و به عبارت دیگر تئوری غیر خطی تحکیم، تبدیل به تئوری خطی و مرسوم ترزاقی می‌شود.



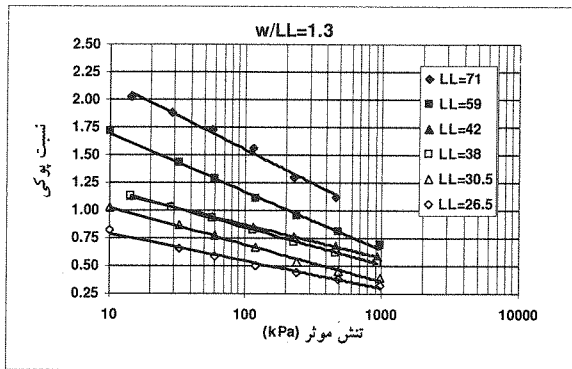
شکل (۳): چگونگی تغییر ضریب تحکیم نسبت به زمان

هم چنین چگونگی تغییر ضریب تحکیم در امتداد عمق لایه برای سه زمان مشخص و به ازای مقادیر معینی از ضرایب غیرخطی تحکیم ( $C_n, \alpha$ ) در شکل ۴ ارائه شده است. با توجه به شکل مذکور، ملاحظه می‌شود که تغییرات ضریب تحکیم در امتداد عمق متناسب با چگونگی توزیع مقدار فشار آب منفذی در عمق بوده، و با آن رابطه عکس دارد.

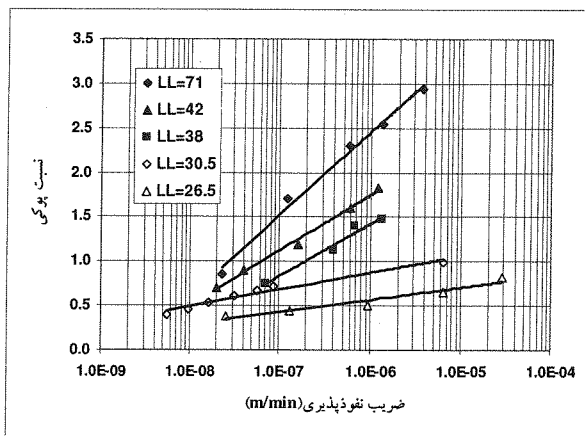
منفذی و ماهیت بارگذاری نمونه، بسیار متنوع است. مرسوم ترین روش انجام آزمایش، زهکشی یکطرفه رو به بالا و تعیین فشار آب منفذی در قسمت پایین نمونه است. در این تحقیق در مراحل اولیه و ارزیابی دقت دستگاه از روش‌های مختلف نظیر زهکشی یکطرفه رو به بالا و پایین و همچنین زهکشی دو طرفه استفاده شد ولی در مرحله انجام آزمایش‌های اصلی به خاطر انجام مقایسه با روش مرسوم، صرفاً از روش زهکشی دو طرفه و انجام آزمایش نفوذ پذیری در انتهای هر بارگذاری استفاده شد. بدین ترتیب پس از نصب کامل دستگاه و اطمینان از اشباع بودن نمونه، بار مورد نظر به صورت هیدرولیکی با استفاده از یک دستگاه مولد فشار ثابت و از طریق دیافراگم به نمونه اعمال و همزمان با باز نمودن شیرهای زهکشی نمونه (شروع تحکیم)، عمل ثبت مقادیر کمیت های مختلف صورت گرفت. تحکیم نمونه با سه متغیر مختلف حجم آب خروجی، نشست و تغییر فشار آب منفذی قابل پیگیری و کنترل است که در این پژوهش از مقدار نشست استفاده شده است. به طوری که مقدار نشست نمونه در دوره‌های زمانی تعریف شده توسط دیتالاگر ثبت و در یک فایل مشخص ذخیره شدند. پس از پایان فرآیند تحکیم به ازای یک بار معین، با استفاده از نرم افزار مخصوص عمل ثبت داده متوقف و داده های ثبت شده باز خوانی و به صورت یک فایل ذخیره می شدند. بعد از ذخیره داده های مربوط به یک مرحله بارگذاری، آزمایش نفوذپذیری بر روی نمونه انجام گرفت. بدین ترتیب که پس از استهلاک کامل فشار آب منفذی اضافی ایجاد شده بر اثر یک بار معین (اتمام فرآیند تحکیم) و قبل از افزایش بار جدید، بین نقاط بالا و پایینی نمونه اختلاف پتانسیل معینی برقرار شده، سپس ضریب نفوذ پذیری با استفاده از اصول روش بار آبی ثابت با کمک رابطه زیر محاسبه شد [۱۰].

$$k = \frac{Q}{60.A.i.t} \quad \text{و} \quad i = \frac{102.\Delta p}{H} \quad (14)$$

در این روابط  $i$ : شیب هیدرولیکی،  $\Delta p$ : اختلاف فشار بین نقطه ورودی و خروجی برحسب کیلو پاسکال،  $A$ : سطح مقطع نمونه برحسب میلی متر مربع،  $H$ : ضخامت نمونه برحسب میلی متر،  $t$ : زمان برحسب دقیقه و  $k$ : ضریب نفوذپذیری بر حسب سانتیمتر بر ثانیه است. پس از انجام آزمایش نفوذپذیری بار وارده افزایش و عمل تحکیم و ثبت داده‌ها مجدداً شروع می‌شود. این کار تا رسیدن به فشار و یا نسبت پوکی مورد نظر ادامه می‌یابد.

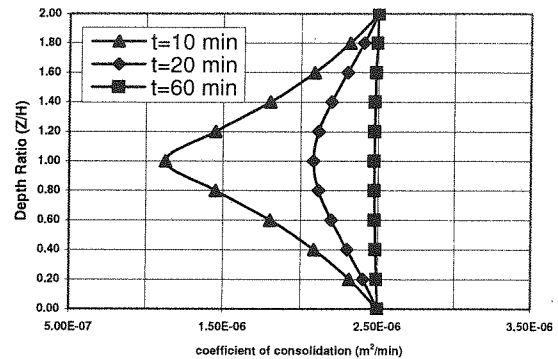


شکل (۵): منحنی  $e - \log \sigma'_v$  برای نمونه های مختلف



شکل (۶) منحنی  $e - \log k$  برای نمونه خاکهای مختلف

با مشخص شدن روابط مذکور برای نمونه های مختلف، معادله خطوط  $e - \log \sigma'_v$  و  $e - \log k$ ، و هم چنین ضرائب آنها یعنی  $C, a, M, b$  برای هر یک از نمونه ها تعیین شدند. سپس با استفاده از ضرائب خطوط مذکور و همچنین نسبت پوکی اولیه نمونه ها ( $e_0$ ) مقادیر ضرائب غیرخطی تحکیم ( $C_n, \alpha$ ) تعیین شدند که نتایج به دست آمده برای دو مورد از نمونه ها در جدول شماره ۲ ارائه شده اند.



شکل (۴): چگونگی توزیع ضریب تحکیم در امتداد عمق

### ۲-۳- نتایج حاصل از بررسی های آزمایشگاهی

به منظور مقایسه نتایج حاصل از تئوری غیرخطی بسط داده شده در این پژوهش با نتایج آزمایشگاهی، باید ضرائب غیرخطی ( $C_n, \alpha$ ) خاک های مورد بررسی تعیین شود. همان طور که قبلاً نیز بیان شد، این ضرائب با استفاده از ضرائب خطوط  $e - \log k$  و  $e - \log \sigma'_v$  مطابق رابطه شماره ۱۴ تعیین می شود. در این پژوهش پس از انجام آزمایش تحکیم بر روی نمونه های آزمایشی مختلف، منحنی های تغییرات نسبت پوکی در مقابل لگاریتم تنش موثر و همچنین لگاریتم ضریب نفوذپذیری برای خاک های مورد بررسی با رطوبت اولیه مختلف (۶ نمونه خاک و هر نمونه با سه مقدار رطوبت اولیه متفاوت) ترسیم شدند. شکل های شماره ۵ و ۶ نمونه ای از این منحنی ها را برای خاک مختلف با نسبت رطوبت اولیه به حدروانی ( $w/LL$ ) یکسان را نشان می دهند. بر اساس مجموعه نتایج به دست از این بررسی ها مشخص شد که تغییرات نسبت پوکی ( $e$ ) به ازای لگاریتم تنش موثر و همچنین لگاریتم ضریب نفوذپذیری، برای تمام نمونه های آزمایشی با خصوصیات پلاستیسیته و شرایط اولیه مختلف، به صورت خطی است و تنها ضرائب این خط تابعی از مشخصات پلاستیسیته و شرایط اولیه نمونه اند. به طوری که ضریب تبیین ( $r^2$ ) این خطوط بیشتر از ۰/۹۷ و معادله عمومی آنها همانند روابط شماره ۶ و ۷ است.

جدول شماره ۲: ضرائب غیرخطی تحکیم برای برخی از نمونه های آزمایشی

$C_n$	$\alpha$	$e_0$	مشخصات نفوذپذیری		مشخصات فشردگی		رطوبت اولیه	حد روانی	شماره نمونه
			$M$	$b$	$C_c$	$a$			
$1/44 \times 10^{-7}$	۰/۳۴	۲/۸۰	۰/۹۲	۸/۱	۰/۶۱	۲/۷۷	۱۰۵	۷۱	۱
$5/2 \times 10^{-5}$	-۰/۷۲	۲/۰۵	۰/۳۰	۳/۴	۰/۵۲	۲/۲۲	۷۷	۵۹	۲

### ۳-۳- مقایسه رابطه درصد تحکیم با زمان

مربوط به تئوری غیرخطی و آزمایشگاهی و برای خاک شماره ۱ که عامل غیرخطی آن مثبت است، در سمت راست قرار گرفته است. این بدان معنی است که در خاک هایی که مقدار عامل غیرخطی آنها منفی است تحکیم کندتر و برای خاک های با مقدار عامل غیرخطی مثبت، تندتر از مقدار پیش بینی شده از طریق تئوری ترزاقی صورت می گیرد. بدیهی است که برای خاک های با مقدار عامل غیرخطی برابر با صفر سرعت وقوع تحکیم برابر با مقدار پیش بینی شده با تئوری ترزاقی خواهد بود.

### ۳-۴- حل مستقیم معادله غیرخطی تحکیم

گرچه در روش های ارائه شده برای حل معادله غیرخطی تحکیم، تغییرات درصد تحکیم نسبت به زمان و بدون اتکا به فاکتور زمان ( $T$ ) که در تئوری ترزاقی نقش اساسی دارد، تعیین می شود ولی به لحاظ انجام مقایسه و ارائه روش حل ترسیمی و مستقیم برای معادله غیرخطی، برنامه رایانه ای بسط داده شده به ازای مقادیر مختلف ضرائب یادشده اجرا و چگونگی تاثیر این ضرائب بر منحنی  $U - \log T$  تعیین شدند. بر اساس نتایج به دست آمده مشخص شد که تاثیر  $\alpha$ ،  $C_n$  و  $\sigma_t$  در منحنی مذکور بسیار اندک و تقریباً مستقل از آنها و منحصر به فرد است. برای تعیین این منحنی یکتا، ابتدا منحنی های  $U - \log T$  به ازای مقادیر مختلف متغیرهای  $\alpha$ ،  $C_n$  و  $\sigma_t$  ترسیم و سپس متوسط آنها تعیین شد. براساس ارزیابی های انجام شده در خصوص رابطه به دست آمده، مشخص شد که رابطه خطی قابل اعتمادی در مقیاس تمام لگاریتمی برای این منحنی یکتا و به شرح زیر قابل ارائه است:

$$\begin{aligned} \ln(U) &= 0.4466 \ln(T) + 0.1038 \\ R^2 &= 0.9992 \quad U < 80 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \ln(U) &= 0.1660 \ln(T) - 0.0665 \\ R^2 &= 0.9471 \quad U > 80 \end{aligned}$$

که با استفاده از مفاهیم و تعاریف اولیه مربوط به ضریب تحکیم

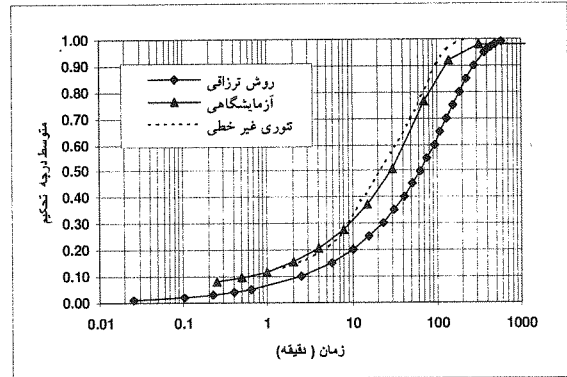
$$\sigma' = \sigma_t U, \quad T = \frac{C_v \cdot t}{H^2}$$

وفاکتور زمان یعنی  $T$  را می توان به صورت زیر

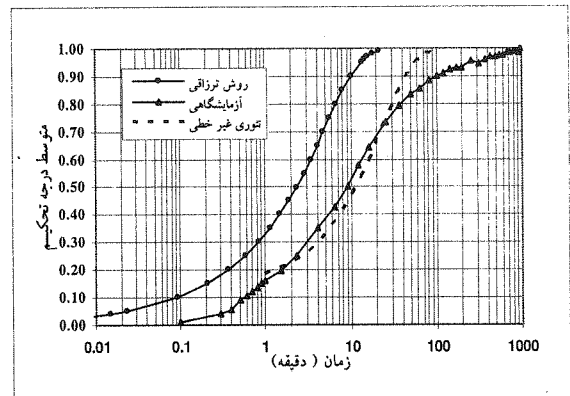
و  $C_v = C_n (\sigma')^\alpha$ ، روابط (۱۵) را می توان به صورت زیر تبدیل نمود:

$$\begin{aligned} t &= 0.8 \frac{H^2}{C_n \sigma_t^\alpha} U^{(2.24-\alpha)} \quad U < 0.80 \\ t &= 1.5 \frac{H^2}{C_n \sigma_t^\alpha} U^{(6.0-\alpha)} \quad U > 0.80 \end{aligned} \quad (16)$$

چنان که قبلاً نیز اشاره شده، هدف اصلی و نهایی از ارائه تئوری تحکیم و روش حل آن، بسط رابطه بین درصد تحکیم و زمان است. لذا به منظور ارزیابی صحت و قابلیت اعتماد تئوری غیر خطی بسط داده شده، رابطه بین درصد تحکیم و زمان ( $U - \log t$ ) برای نمونه های مختلف با استفاده از نتایج حاصل از تئوری غیرخطی، آزمایش تحکیم هیدرولیکی و نتایج حاصل از تئوری خطی ترزاقی ترسیم شدند و مورد مقایسه قرار گرفتند. در تمام موارد منحنی های  $U - \log t$  حاصل از تئوری غیر خطی تحکیم در مقایسه با تئوری خطی ترزاقی مطابقت بهتری با نتایج حاصل از آزمایش تحکیم داشتند. منحنی های به دست آمده بر اساس روش های مختلف، به عنوان نمونه برای دو مورد از خاک ها (شماره ۱ و ۲) در شکل های شماره ۷ و ۸ نشان داده شده است.



شکل (۷): مقایسه منحنی های  $U - \log t$  حاصل از روش های مختلف برای خاک شماره ۱

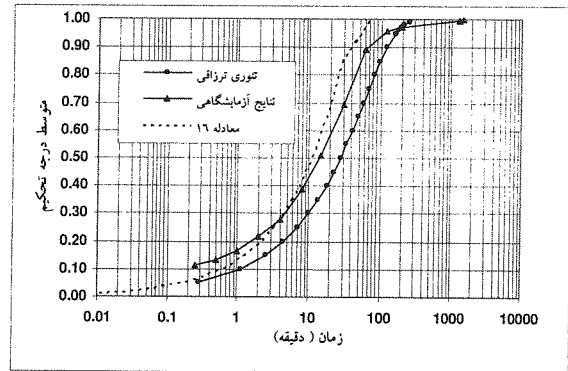


شکل (۸): مقایسه منحنی های  $U - \log t$  حاصل از روش های مختلف برای خاک شماره ۲

هم چنین با توجه به اشکال مذکور ملاحظه می شود که منحنی مربوط به روش ترزاقی برای خاک های شماره ۲ که عامل غیرخطی ( $\alpha$ ) آن منفی می است، در سمت چپ منحنی های



روابط شماره (۱۶) در حقیقت حل ترسیمی و مستقیم رابطه بین درصد تحکیم متوسط و زمان است که هدف نهایی تمام تئوری‌های ارائه شده برای تحکیم ست. برای ارزیابی صحت نتایج حاصل از معادلات اخیر، منحنی  $U - \log t$  برای یک نمونه خاک با مشخصات معین ترسیم و با نتایج به دست آمده از آزمایش و همچنین تئوری ترزاقی مطابق شکل ۹ مقایسه شد.



شکل (۹) - مقایسه نتایج حاصل از آزمایش و تئوری ترزاقی با نتیجه رابطه (۴-۷) برای خاک شماره ۴

با توجه به شکل مذکور ملاحظه می‌شود که رابطه (۱۶) در مقایسه با روش ترزاقی، منحنی  $U - \log t$  را بهتر پیش بینی می‌کند. بدین ترتیب با استفاده از روابط مذکور، زمان مربوط به درصد معینی از تحکیم با معلوم بودن مشخصات خاک یعنی ضرائب غیرخطی تحکیم ( $C_{\alpha}$ ) و مقدار تنش اعمال شده ( $\sigma_1$ )، به طور مستقیم و بدون حل معادله نیز قابل محاسبه است.

## ۸- نتیجه گیری و پیشنهادات

یافته‌های مهم پژوهش حاضر به شرح زیر است:

۱- معادله حاکم بر تحکیم خاک‌های رسی مطابق رابطه شماره ۱۲ با یک معادله دیفرانسیل جزئی غیرخطی بیان شد. غیرخطی بودن معادله به این معنی است که قابلیت لایه خاک در استهلاك فشار آب منفذی و به عبارت دیگر نفوذپذیری آن با پیشرفت تحکیم تغییر می‌کند. در نتیجه استفاده از این معادله در خاکهایی که تغییر ضریب نفوذپذیری آنها در طول تحکیم زیاد است، اهمیت بیشتری دارد.

۲- در این تحقیق دو ضریب به نام‌های ضریب تحکیم پایه ( $C_{\alpha}$ ) و عامل غیرخطی تحکیم ( $\alpha$ ) به عنوان مشخصات خاک برای تعیین سرعت تحکیم معرفی شد. این ضرائب با توجه به روش ارائه شده در این پژوهش با استفاده از ضرائب خطوط  $e - \log \sigma'$  و  $e - \log k$  که از نتایج آزمایش‌های

نفوذپذیری و تحکیم قابل استخراج هستند، قابل محاسبه و تعیین اند.

۳- با استفاده از معادله غیرخطی و روش حل عددی ارائه شده برای آن، رابطه بین درصد تحکیم و زمان ( $U - t$ ) به طور مستقیم و بدون نیاز به استفاده از فاکتور زمان و همچنین ضریب تحکیم پیش بینی می‌شود. در نتیجه این روش فارغ از محدودیتهای روش‌های ترسیمی تعیین ضریب تحکیم است.

۴- رابطه کاملاً خطی بین نسبت پوکی با لگاریتم تنش موثر و لگاریتم ضریب نفوذپذیری، مطابق روابط ۶ و ۷، برای خاک‌های تحکیم نیافته و یا عادی تحکیم یافته وجود دارد. ضرایب این خطوط یعنی  $C_{\alpha}$ ،  $a$ ،  $b$  و  $M$  تابعی از مشخصات خمیرایی و رطوبت اولیه نمونه است. در نتیجه این روابط برای یک خاک منحصر به فردیست و با توجه به مقدار رطوبت و یا نسبت پوکی اولیه نمونه متفاوت است.

۵- مقایسه نتایج حاصل از معادله غیرخطی ارائه شده در این تحقیق با نتایج آزمایشگاهی و همچنین روش ترزاقی نشان داد که معادله غیرخطی رابطه بین درصد تحکیم و زمان را در مقایسه با روش ترزاقی بهتر پیش بینی می‌کند، لذا پیشنهاد می‌شود در سازه‌هایی که روی خاک‌های رسی نرم احداث می‌شوند و نیاز به تعیین دقیق زمان تحکیم هست، مثل پروژه‌های پیش بارگذاری، ساخت مرحله ای خاکریزها و غیره، از رابطه ارائه شده در این تحقیق برای تعیین زمان نشست تحکیمی استفاده شود.

۶- در مطالعه انجام شده، تغییرات ضریب تحکیم در جهت قائم بررسی شد. بررسی چگونگی تغییرات ضریب تحکیم در شرایط زهکشی افقی می‌تواند موضوع تحقیق دیگری باشد.

## ۵- تقدیر و تشکر

از آنجا که تسهیلات مالی و تدارکاتی این تحقیق از طریق مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی و همچنین معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تهران فراهم شده است، نویسندگان مقاله مراتب تقدیر و تشکر صمیمانه خود را اعلام می‌دارند.

- Anderson D., "Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer". Hemisphere Publishing Corporation, 559p, 1984 [۱]
- Burland, J B., "On the compressibility and shear strength of natural soils", Geotechnique 40(3), 329-378.1990 [۲]
- Carrier, W D, "Consolidation parameters derived from index tests" Geotechnique, 35(2), 211-213., 1985 [۳]
- Cernica, J. N., "Geotechnical Engineering: Soil Mechanic" John Wiley, New York.1995 [۴]
- Chan,A.H.C "Determination of coefficient of consolidation using a least squares method.", Geotechnique 53(7), 673-678. 2003 [۵]
- Evance L C., "Partial Differential Equation", American Mathematical Society, Providence, Island,1998. [۶]
- Feng, T. W., and Lee, Y. J, "Coefficient of consolidation from the Linear Segment of the  $t^{1/2}$  Curve", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 38, 901-909. .2001. [۷]
- Fox P., Baxter, C., "Consolidation properties of soil slurries from hydraulic consolidation test", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering; 123(8), 770-776. 1997. [۸]
- Gibson, R. E. "The theory of one-dimensional consolidation of saturated clay", Geotechnique 17(3), 261-273. . 1967. [۹]
- Head, K.H, "Manual of Soil Laboratory Testing", Vol.3., ELE, International Limited, Pentech Press London,1986. [۱۰]
- Lekha, K.R., Krishnaswamy, N.R., and Basak, P., "Consolidation of clays for variable permeability and compressibility.", ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 129 (11), 1001-1009, 2003. [۱۱]
- Mesri, G. and Rokhsar, A., "Theory of consolidation for clays" J. Geotechnical Engineering, Div., ASCE, 100 (8), 889-904,1974. [۱۲]
- Mesri,G. and Shahein, M. "Coefficient of Consolidation by the Inflection Point Method", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 125( 8), 716-718. 1999. [۱۳]
- Raju N., Pandian P. S. R. and Nagaraj T "Analysis and estimation of coefficient of consolidation" Geotechnical Testing Journal, 18(2), 252-258, 1995 [۱۴]
- Robinson, R., Allam, M., "Determination of coefficient of consolidation from early stage of  $\log t$  plot", Geotechnical Testing Journal, 19(3), 316-320, 1996. [۱۵]
- Sridharah, A. and Nagaraj, H. B., "Compressibility behavior of remolded, fine-grained soils and correlation with index properties", Canadian Geotechnical Journal, 37(3), 712-722, 2000. [۱۶]