

تعیین خصوصیات تحکیم ثانویه خاکهای شمال ایران براساس مفهوم نسبت (C_{α}/C_c)

مهراب جسمانیⁱ؛ رامین واعظیⁱⁱ

چکیده

در اواخر دهه هفتاد میلادی Mesri و همکارانش با انجام مطالعات گسترده‌ای پیرامون نشست درازمدت خاکهای ریزدانه، نظریه خود را مبنی بر ثابت بودن نسبت ضریب تحکیم ثانویه به شاخص تحکیم (C_{α}/C_c) ارائه نمودند. مطالعات فراوانی به منظور برابری نتایج آزمایشگاهی و یافته‌های ساختگاهی با این نظریه صورت گرفته‌است که تا کنون نیز ادامه دارد. در محدوده بررسی‌های انجام‌شده، تاکنون مطالعاتی بر روی خصوصیات تحکیم ثانویه خاکهای نواحی مختلف ایران بر اساس مفهوم نسبت (C_{α}/C_c) در متون فنی گزارش نشده‌است و هیچگونه اطلاعاتی پیرامون مقادیر این نسبت برای خاک‌های ایران در دست نمی‌باشد. بنابراین در این مقاله به بررسی خصوصیات تحکیم ثانویه خاکهای مختلف با تکیه بر مفهوم (C_{α}/C_c) پرداخته شده‌است. برای این منظور نمونه‌هایی دست نخورده از شش محل مختلف در نواحی شمالی ایران تهیه شده و آزمایشهای تحکیم یکبعدی بر روی آنها صورت گرفته‌است. در هر مرحله از بارگذاری به نمونه‌ها اجازه داده شده است تا به مدت یک تا سه هفته به تحکیم درازمدت خود ادامه دهند. در نهایت نسبت (C_{α}/C_c) برای تمامی نمونه‌ها بدست آمده است. روند تغییرات ضریب تحکیم ثانویه (C_{α}) در برابر شاخص تراکم (C_c) برای تمامی نمونه‌ها بیانگر وجود نسبت (C_{α}/C_c) منحصری برای خاکهای نواحی مختلف مورد بررسی می‌باشد. مقایسه میان نتایج بدست‌آمده و روابط موجود در ادبیات فنی بیانگر ضعف این روابط و توانایی بالای مفهوم نسبت (C_{α}/C_c) در تخمین مشخصات تحکیم ثانویه نمونه‌ها می‌باشد.

کلمات کلیدی

خاکهای ریزدانه، تحکیم ثانویه، نسبت (C_{α}/C_c)

Secondary Compression Characteristics of Northern Parts of Iran Soils Based on (C_{α}/C_c) Concept

Mehrab Jesmani; Ramin Vaezi

ABSTRACT

On the end of 1970s. The concept of (C_{α}/C_c) was developed by Mesri et al. in order to analyze the secondary compression settlements. There is a general acceptance in the (C_{α}/C_c) concept after many investigations made with different soil specimens.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۶/۷/۲۴

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۷/۱۰/۳

ⁱ دکترای مهندسی عمران، استادیار دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) - گروه مهندسی عمران: Email: mehrajjesmani@yahoo.com

ⁱⁱ نویسنده مسئول و دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) - گروه مهندسی عمران

Email: ramin_vaezi@yahoo.com

We have found no studies signifying the properties of secondary compression of the soils in various part of Iran considering constant (C_{α}/C_c) concept, also there were no reports on the value of (C_{α}/C_c) ratio on Iran's soils. So, in this paper the secondary compression behavior of Iran's soils was investigated through the performance of a series of conventional and long-duration one-dimensional consolidation tests conducted on undisturbed samples from six different sites in the central and northern parts of Iran. The characteristics of secondary compression index were examined, and the relationship between the coefficient of secondary compression, (C_{α}), and the compression index (C_c), was established for all of these soils. The results of comparison between secondary compression index equations and (C_{α}/C_c) ratio concept show the ability of this concept to estimating the secondary compression index of samples.

KEYWORDS

Fine-grained soils, Secondary compression, (C_{α}/C_c) concept.

نرخ خود می‌رسد. نتایج مطالعات درازمدتی پیرامون نشست در ساختمانهای (MIT) توسط [۴] Horn و Lambe در سال ۱۹۶۴ بر روی رس شناخته شده Boston Blue گزارش شده است که نشان می‌دهد تحکیم ثانویه زیاد در مکانهایی وجود داشته که تحکیم اولیه قابل توجهی داشته اند. [۵] Keene در سال ۱۹۶۵ نتایج نشست چهار خاکریز از بزرگراههای ارتباطی که بر روی نهشته های آلی و نرم در یایی قرار داشتند را در دوره زمانی ۷ تا ۱۷ سال منتشر نمود. او پیشنهاد کرد که می‌توان ضریب تحکیم ثانویه را به عنوان درصدی از ضریب تحکیم اولیه مشخص نمود.

[۶] Walker و Raymond در سال ۱۹۶۸ با انجام آزمایشهای آزمایشگاهی بر روی رسهای حساس Leda نشان دادند که در تمامی محدوده های تنش، نرخ تحکیم ثانویه ارتباطی خطی با شاخص تراکم (C_c) داشته و مقدار متوسط نسبت C_{α}/C_c را در نزدیک به ۰/۰۲۵ پیشنهاد نمودند. [۷] Walker در سال ۱۹۶۹ نشان داد که C_{α} به مقدار نسبت تنش موثر به تنش بیش تحکیم یافتگی (σ'/σ'_v) وابسته می‌باشد و ماکزیم C_{α} در تنش هایی فراتر از σ'_v روی می‌دهد. همچنین C_{α} را در برابر C_c برای فشار های مختلف تحکیم رسم نمود. [۸] Mesri در سال ۱۹۷۳ بیان کرد که تحکیم ثانویه ادامه روند تغییر حجم در طول تحکیم بوده و نتیجه گرفت که خاکهایی که در مرحله اولیه، تراکم پذیری زیادی از خود نشان می دهند، باید از قابلیت تراکم پذیری بالایی در مرحله ثانویه نیز برخوردار باشند. بعلاوه نموداری برای تخمین ضریب تحکیم اصلاح شده ($C_{\alpha E}$) براساس رطوبت طبیعی خاکهای مختلف (w_b) ارائه نمود.

[۹] Ladd در سال ۱۹۷۳، $C_{\alpha}/(1+e_0)$ را در برابر $C_c/(1+e_0)$ رسم نمود. او اشاره کرد که در محدوده عادی تحکیم یافتگی، برای خاکهایی با $C_c/(1+e_0)$ ثابت، $C_{\alpha}/(1+e_0)$ تقریباً ثابت می‌ماند و یا اندکی افزایش می‌یابد و

۱- مقدمه

اولین کوششها برای بازنگری تئوری [۱] Terzaghi توسط [2] W. Merchand و D. Taylor (۱۹۴۰) در (MIT) صورت گرفت. ایشان بر اساس مطالعات شش ساله، نسبت تخلخل یک المان از خاک را در طول مراحل تحکیم، تابعی از تنش موثر قائم و زمان معرفی نمودند. بنابراین نرخ تغییر نسبت تخلخل برابر می‌شود با:

$$e = f(\sigma'_v, t) \rightarrow \frac{de}{dt} = \left(\frac{\partial e}{\partial \sigma'_v} \right)_t \frac{d\sigma'_v}{dt} + \left(\frac{\partial e}{\partial t} \right)_{\sigma'_v} \quad (1)$$

که در رابطه فوق e بیانگر نسبت تخلخل، t نشان دهنده زمان و σ'_v نشان دهنده تنش موثر قائم می‌باشد. $(\partial e / \partial \sigma'_v)_t$ بیانگر تراکم پذیری ساختمان خاک در نتیجه افزایش تنش موثر قائم، در زمان مشخص و $(\partial e / \partial t)_{\sigma'_v}$ بیانگر تراکم پذیری خاک در اثر گذشت زمان در تنش موثر ثابت می باشد (تحکیم ثانویه). در طول تحکیم اولیه، $(\partial e / \partial t)_{\sigma'_v}$ و $(\partial e / \partial \sigma'_v)_t$ به صورت همزمان تغییر می نمایند. تا زمانی که مقدار $(\partial e / \partial t)_{\sigma'_v}$ برابر صفر نشود، تحکیم ثانویه به صورت نامتناهی ادامه می‌یابد. به هر حال این موضوع بسیار با اهمیت است که معلوم شود $(\partial e / \partial \sigma'_v)_t$ و $(\partial e / \partial t)_{\sigma'_v}$ از مشخصات ثابت خاک نبوده و در طول مراحل تحکیم اولیه و ثانویه ثابت باقی نمی مانند. بویژه مقدار $(\partial e / \partial t)_{\sigma'_v}$ در تحکیم اولیه، لزوماً مشابه مقدار آن در تحکیم ثانویه نمی‌باشد. نتایج این مطالعات منجر به اصلاح تئوری [۱] Terzaghi با تکیه بر نداشتن وابستگی مقاومت وابسته به زمان خاک به خصوصیات هیدروپدینامیکی آن گردید.

دیدگاه کلی Taylor این بود که سهم عمده تحکیم ثانویه بعد از اتمام تحکیم اولیه روی می دهد. [۳] Wahls در سال ۱۹۶۲ با انجام مطالعات جامعی نشان داد که تحکیم ثانویه در فاز اولیه نیز روی می دهد ولی پس از اتمام تحکیم اولیه، به بیشترین

نسبت C_{α}/C_c برای یک خاک ([۱۶] [۱۹۹۲] Fox et al. و [۱۷] Yin (۱۹۹۹)). تمامی ابهامات و بحث‌های مطرح شده توسط Mesri و سایر محققین به نحوی پاسخ داده شده است ([۱۸] Mesri (۲۰۰۶)) به گونه‌ای که رفته‌رفته پذیرشی عمومی در قبول این نظریه به عنوان رابطه‌ای معتبر در محاسبه نشست زمانبر لایه‌های ریزدانه بوجود آمده تا آنجا که گروهی از محققین از آن به عنوان قانون چهارم (قانون تراکم) نام می‌برند. تعیین نسبت C_{α}/C_c برای خاکهای هر منطقه می‌تواند برای تخمین اولیه مقادیر نشست درازمدت لایه‌های خاک، بررسی اهمیت تحکیم ثانویه و لزوم انجام مطالعات دقیقتر، و حتی محاسبات نهایی میزان اینگونه نشست‌ها مفید و کارآمد باشد.

۲- روند مطالعات آزمایشگاهی

به منظور تعیین نسبت C_{α}/C_c نمونه‌های بدست آمده از شش محل مختلف در نوار ساحلی شمال ایران برای انجام آزمایشات تحکیم انتخاب شده و بعد از انجام آزمایشات شناسایی و طبقه‌بندی، نمونه‌هایی از آنها در داخل حلقه‌های تحکیم با قطر $63/55 \sim 61/25$ و ارتفاع $19/33 \sim 22/50$ میلی‌متر جای گرفته و با نرخ نمو بار واحد ($LIR = I$) تحت تنشهایی معادل ($0/5 - 1 - 2 - 4 - 8$ و 16 کیلوپاسکال) تحکیم یافته‌اند. بر اساس پیشنهادات [۱۹] Mesri، برای تخمین نسبت C_{α}/C_c کافی است در دو یا سه تنش متفاوت به نمونه اجازه داده شود تا وارد فاز تحکیم ثانویه شود ولی در این پژوهش به منظور بررسی دقیق‌تر در روند تغییرات نسبت C_{α} در برابر C_c در شش تنش متفاوت (شامل سطوحی از تنش در هر دو ناحیه فشردگی و بازفشرده‌گی) به نمونه اجازه داده شده است به مدت یک هفته به تحکیم درازمدت خود ادامه دهد. به منظور بررسی روند تغییرات شیب منحنی نشست - زمان در اثر گذشت زمانهای طولانی‌تر، این زمان در مرحله آخر بارگذاری تا سه هفته به طول انجامیده است.

۳- نتایج مطالعات آزمایشگاهی

بر اساس نتایج مربوط به آزمایشات مقدماتی و شناسایی، نمونه‌های انتخاب شده شامل خاکهای غیرآلی با درصد ریزدانه بیش از ۹۰٪ بوده و اکثر آنها دارای خاصیت خمیری بالا (CH) می‌باشند. شاخص خمیری نمونه‌های مورد بررسی نزدیک به $16 \sim 32$ متغیر بوده و حد روانی آنها در محدوده $45 \sim 55$ می‌باشد. بجز نمونه‌های گرفته‌شده از خاکهای سیسنگان و ولشت (شماره‌های ۳ و ۶)، درصد رطوبت طبیعی موجود در سایر نمونه‌ها از حد روانی آنها بیشتر بوده که با

برای خاکهایی که با افزایش تنش در آنها $C_c/(1+e_0)$ کاهش می‌یابد، $C_{\alpha}/(1+e_0)$ نیز کم می‌شود.

[۱۰] Simon در یک مرور جامع بر روی آزمایش‌های تحکیم و تفسیر نتایج آن، مقادیر ضریب تحکیم ثانویه (C_{α}) را در محدوده ای بزرگتر از $0/2$ پیشنهاد کرد و رابطه‌ای نیز برای ارتباط میان ضریب تحکیم ثانویه و درصد رطوبت طبیعی ارائه نمود. بعلاوه اشاره کرد که بعد از سالها تحقیق بر روی تحکیم ثانویه، تاکنون روش قابل اطمینانی برای تخمین مقدار و نرخ اینگونه نشست‌ها در دست نمی‌باشد.

در ادامه مطالعات، Mesri مفهوم نسبت میان C_c و C_{α} را دنبال نمود و در سال ۱۹۷۷، [۱۱] Goldlewski و Mesri نتیجه گرفتند که مکانیزم تغییر حجم - ویسکوز و غیر ویسکوز- عکس‌العملی زنجیره ای و در نتیجه زمانبر می‌باشد. آنها نسبت C_{α}/C_c را برای ۲۲ نهشته طبیعی خاک محاسبه نموده و مقدار این نسبت را در محدوده $0/25$ تا $0/100$ با مقادیر بالاتر برای خاکهای بسیار آلی پیشنهاد نمودند. مشاهدات آنها بیانگر این مطلب بود که C_{α}/C_c تابعی از نسبت افزایش بار نمی‌باشد ولی به تنش موثر به کار رفته و نسبت آن به تنش موثر بیش تحکیمی (σ'/σ'_v) وابسته می‌باشد.

[۱۲] Crawford در سال ۱۹۸۶ با انجام آزمایشات اذئومتری برای نمونه‌های دست نخورده از سه نوع خاک (رس Mexico City، رس Leda و سیلت آلی New Hampshire) مشاهده کرد که هر دو ضریب C_c و C_{α} تا زمانی که تنش موثر به مقدار بحرانی σ'_c نرسیده است، افزایش پیدا کرده و در تنشهایی نزدیک به σ'_c و فراتر از آن به ماکزیمم خود رسیده و سپس کاهش می‌یابد. این در حالی است که نسبت C_{α}/C_c به صورت معنا داری ثابت باقی می‌ماند. در این میان [۱۳] Nakase et al. در سال ۱۹۸۸ رابطه‌ای برای تخمین ضریب تحکیم ثانویه (C_{α}) بر اساس شاخص خمیری (PI) ارائه نمود.

Mesri در سالهای بعدی، تئوری خود را مبتنی بر ثابت بودن نسبت C_{α}/C_c دنبال نمود و با انجام آزمایشات و ارائه مقالات متعددی این نظریه را ارتقاء بخشید. [۱۴] Mesri (۲۰۰۱) و [۱۵] Mesri (۲۰۰۵)

پس از ارائه نظریه منحصربفرد بودن نسبت C_{α}/C_c ، نکات و مشکلاتی توسط سایر محققین پیرامون این نظریه مطرح شده است که مهمترین آنها عبارتند از: ثابت نبودن ضریب تحکیم ثانویه در یک فشار معین در برخی از مشاهدات و در نتیجه تغییر نسبت یاد شده در اثر گذشت زمان در یک فشار ثابت، بینهایت شدن نشست ثانویه در صورتی که زمان به بینهایت میل کند، برابر نبودن روند تغییرات ضرایب تحکیم با مفهوم

توجه به تهیه نمونه‌ها در فصول بارندگی، این امر قابل توجیه می‌باشد. خلاصه نتایج حاصل از آزمایشات مقدماتی و شناسایی خاک‌های مورد بررسی و نتایج حاصل از انجام آزمایشات تحکیم، در جدول (۱) مشخص شده‌است. در این جدول e_0 و w_0 به ترتیب نسبت تخلخل اولیه و درصد رطوبت طبیعی بوده و σ'_c بیانگر تنش موثر بیش‌تحکیمی بدست آمده از نمودار تحکیم به روش Casagrande می‌باشد.

گفتنی است که ضرایب تحکیم (C_c)، ضرایب تحکیم ثانویه (C_{α}) و ضریب تحکیم ثانویه اصلاح‌شده ($C_{\alpha E}$) گزارش شده مربوط به قسمت بکر نمودار تحکیم (در تنشهایی بعد از تنش بیش‌تحکیم‌یافتگی) می‌باشند.

۴- پردازش و مقایسه نتایج

نمودارهای نشست- زمان : محققین مختلف تأثیر عوامل متعددی از جمله دست‌خوردگی، نحوه نگهداری نمونه‌ها، زمان، نسبت نمو بار، محدوده تنشهای اعمالی، میزان تحکیم ثانویه انجام شده در مراحل قبلی، درجه حرارت، ابعاد نمونه، اصطکاک، میزان مواد آلی، حالت تنش، تنش برشی و ... را بر روی شکل منحنی نشست - زمان و به طور کلی ضریب تحکیم ثانویه (شیب این نمودار بعد از تکمیل تحکیم اولیه) بررسی نموده‌اند. از میان موارد مذکور شاید بتوان نقش محدوده تنش تحکیمی اعمال‌شده را نسبت به سایر موارد پررنگ‌تر برشمرد. بر اساس مطالعات و گزارشات فراوان، شیب قسمت ثانویه نمودار نشست- زمان در تنشهای کم و تنشهایی نزدیک به تنش بیش‌تحکیم‌یافتگی و بیشتر از آن، با گذشت زمان زیاد خواهد شد [۲۰]. Nash et al. (۱۹۹۲). نمونه مشابه این گزارشات را می‌توان در شکل (۲) مشاهده نمود.

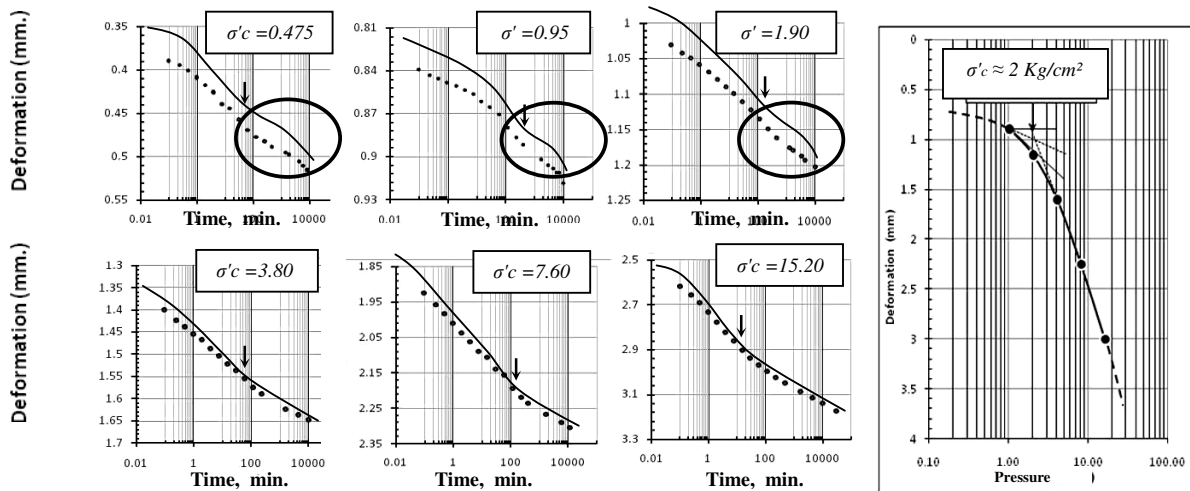
فشار بیش‌تحکیمی نمونه مورد بررسی نزدیک به ۲/۰ Kg/cm^2 تخمین زده شده‌است. همانطور که در شکل نیز مشخص شده‌است، نمودار نشست - زمان در مقادیر کمتر از تنش بیش‌تحکیمی، دارای شیب افزایشی در قسمت ثانویه خود می‌باشد و این درحالی است که با افزایش سطح تنش و فاصله گرفتن از محدوده بیش‌تحکیم‌یافتگی، این شیب عملاً ثابت می‌ماند.

ضریب تحکیم ثانویه : نتایج بدست آمده از آزمایش‌های تحکیم درازمدت بر روی نمونه‌های موجود، بیانگر ارتباط شدید میان ضریب تحکیم ثانویه و فشار تحکیمی می‌باشد. نمونه‌هایی از وابستگی ضریب تحکیم ثانویه به تنش موثر قائم متناظر در شکل (۲) مشخص شده‌است. به طور کلی در سطوح پایین تنش (فشارهایی کمتر از فشار بیش‌تحکیم‌یافتگی)، ضرایب تحکیم ثانویه با افزایش تنش، افزایش خواهند یافت. این روند صعودی تا تنشهایی نزدیک به دو تا پنج برابر فشار بیش‌تحکیم‌یافتگی (تنش بحرانی) ادامه پیدا کرده و سپس ثابت مانده و یا کاهش می‌یابد. نتایج مشابهی توسط [۸] Mesri (۱۹۷۳)، [۲۰] Nash et al. (۱۹۹۲)، [۲۱] Gao et al. (۲۰۰۷) گزارش شده‌است.

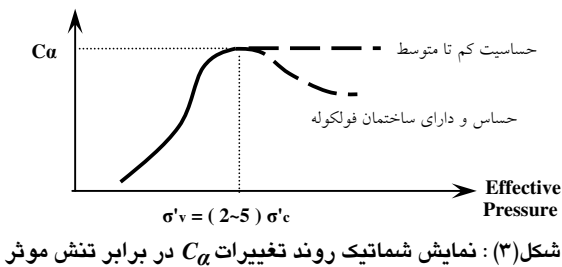
بر اساس گزارشات متعدد، در نمودار تحکیم رسهایی با حساسیت بالا، در تنشهایی فراتر از تنش بیش‌تحکیمی، معمولاً تقعر به سمت بالا وجود دارد به طوری که با افزایش میزان تنش، شیب این نمودار یا ضریب (C_c) اندکی کاهش می‌یابد. با پذیرش نسبت (C_{α}/C_c) ثابت در تمامی سطوح تنش برای هر خاک، انتظار می‌رود در خاکهایی با حساسیت بالا و ساختار فولکوله، با افزایش در سطوح تنش و کاهش C_c ، مقدار ضریب تحکیم ثانویه (C_{α}) نیز کاهش یابد.

جدول (۱): نتایج آزمایشات مقدماتی و تحکیم درازمدت نمونه‌های مورد بررسی

موقعیت	شماره سایت	LL (%)	PL (%)	PI (%)	w_0 (%)	e_0	درصد ریزدانه	فعالیت A	نوع خاک	$C_c : \Delta e / \Delta \log(\sigma)$	$C_{\alpha} : \Delta e / \Delta \log(t)$	$C_{\alpha E} : Ca / (1+ep)$	σ'_c Kg/cm^2
پل سفید I	۱	۵۵	۲۲	۳۲	۵۵	۰/۵۸	۹۶	۱/۳۴	CH	۰/۰۹۴	۰/۰۰۳۹۷	۰/۰۰۲۷۳	۰/۸
پل سفید II	۲	۵۱	۲۷	۲۴	۷۲	۰/۶۹	۹۹	۰/۷۴	CH	۰/۲۳۶	۰/۰۰۶۹۹	۰/۰۰۴۸۶	۴
سیسنگان	۳	۵۰	۲۹	۲۱	۴۸	۱/۳۲	۹۹	۰/۶۵	CH	۰/۳۵۲	۰/۰۰۹۳۸	۰/۰۰۴۸۱	۲
نوشهر	۴	۴۵	۲۵	۲۰	۶۹	۰/۸۶	۹۱	۰/۴۲	CL	۰/۲۳۴	۰/۰۰۵۶۱	۰/۰۰۳۷۸	۲
چالوس	۵	۴۶	۳۰	۱۶	۵۴	۰/۶۳	۱۰۰	۰/۴۵	ML	۰/۱۱۲	۰/۰۰۳۲۵	۰/۰۰۲۲۳	۴/۳
ولشت	۶	۵۱	۲۸	۲۳	۳۶	۰/۹۵	۹۰	۱/۲۱	CH	۰/۱۰۹	۰/۰۰۳۴۷	۰/۰۰۱۹۶	۰/۶



شکل (۱): نمودار تحکیم و نمودارهای نشست- زمان برای مکان شماره ۴ (نوشهر)



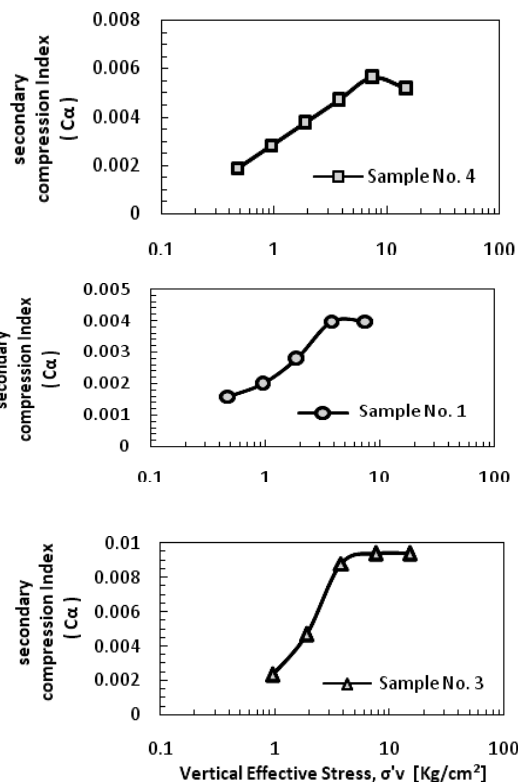
شکل (۳): نمایش شماتیک روند تغییرات C_{α} در برابر تنش موثر

۵- بررسی روند تغییرات C_c و C_{α}

C_c و C_{α} بدست آمده در تنش‌های تحکیمی متفاوت برای تمامی نمونه‌های بدست‌آمده از خاک‌های ایران در شکل (۴) رسم شده‌است. بر اساس پیشنهادات Mesri و همکارانش، مقدار نسبت C_c و C_{α} برابر با شیب بهترین خط عبوری از میان نقاط مذکور (گذرنده از مرکز مختصات) می‌باشد (نه مقدار میانگین این نسبتها در تنش‌های مختلف).

وجود ضریب R^2 بالا در محدوده ۰/۸۰۵ تا ۰/۹۹۳ با مقدار میانگین ۰/۹۵۳، نشان‌دهنده وجود رابطه خطی میان ضریب تحکیم ثانویه (C_{α}) و ضریب تحکیم (C_c) در محدوده تنش‌های مورد بررسی برای خاک‌های مذکور می‌باشد.

به طور کلی در تمام نمونه‌های مورد بررسی، روند تغییرات C_{α} در برابر C_c از تطابق خوبی با مفهوم نسبت C_{α}/C_c برخوردار است به گونه‌ای که می‌توان برای هر خاک، این نسبت را در محدوده تنش‌های مورد بررسی ثابت دانست. در شکل (۵)، مقادیر بدست‌آمده برای نسبت C_{α}/C_c برای هرکدام از

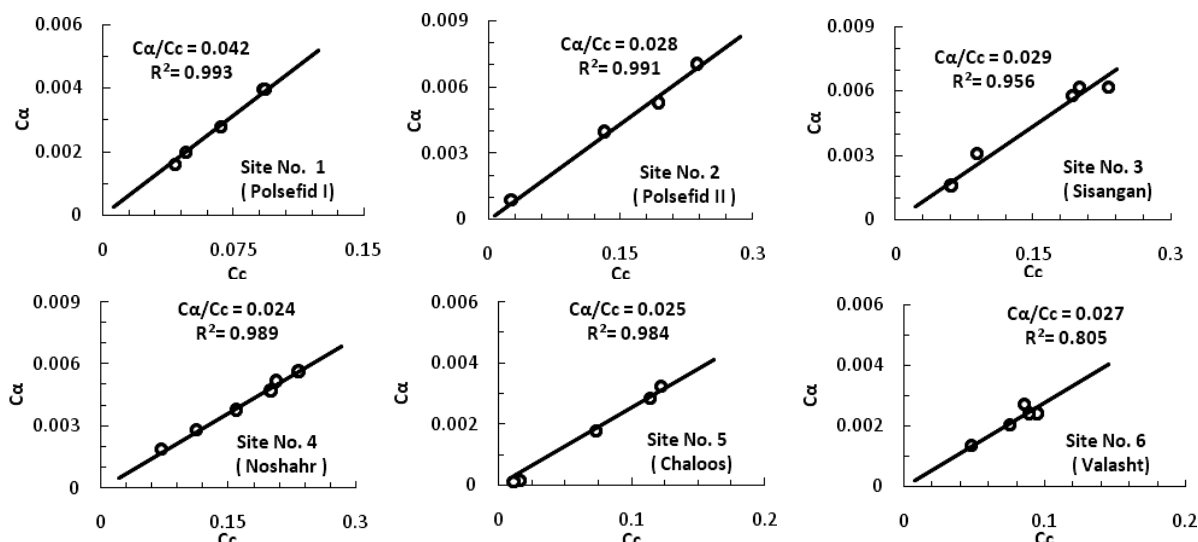


شکل (۲): نمونه‌ای از روند تغییرات ضریب تحکیم ثانویه در برابر تنش موثر قائم برای نمونه‌های بدست‌آمده از مکان‌های ۱ و ۳ و ۴.

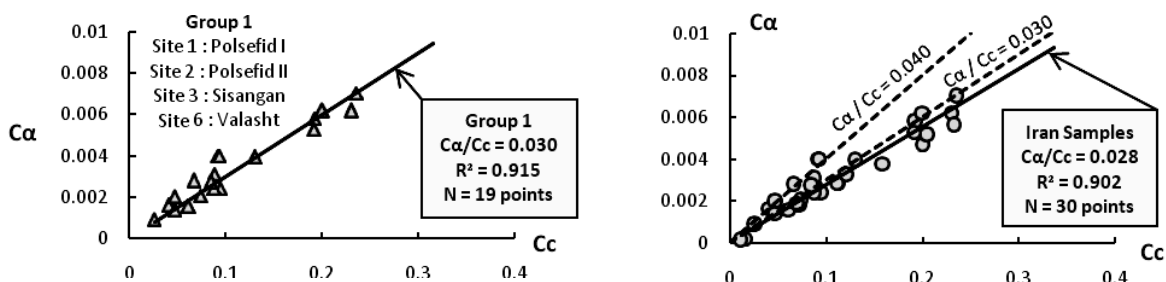
شده، نسبت C_{α}/C_c برای خاکهای این زیرگروه برابر $0.28/0$ بوده که بسیار نزدیک به مرز پایینی پیشنهاد شده توسط [۱۱] Mesri (۲۰۰۶) مبنی بر وجود $0.30/0 \leq C_{\alpha}/C_c \leq 0.50/0$ برای رس ها و سیلت های غیر آلی می باشد.

نمونه های مورد بررسی به همراه ضریب R^2 متناظر مشخص شده است.

C_{α} در برابر C_c مربوط به کلیه نمونه های مورد بررسی در شکل (۶) رسم شده است. همانطور که در شکل نیز مشخص



شکل (۴): رابطه میان میان C_c و C_{α} برای خاکهای ایران

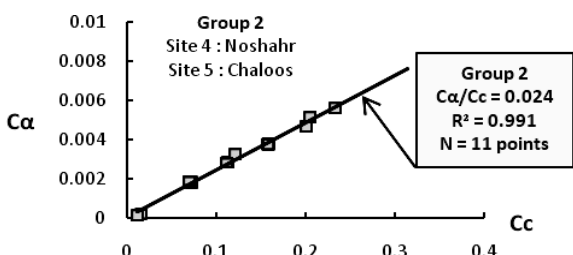


شکل (۵): نمودار C_{α} در برابر C_c برای کلیه نمونه ها

شکل (۶): نمودار C_{α} در برابر C_c برای خاکهای گروه اول

خاکهای گروه دوم شامل نمونه های گرفته شده از شهرهای نوشهر و چالوس بوده که بر اساس طبقه بندی متحد به ترتیب در گروه های (CL) و (ML) قرار می گیرند و دارای کمترین مقادیر شاخص خمیری (PI) و حد روانی (LL) می باشند. نسبت C_{α}/C_c برابر $0.24/0$ و ضریب R^2 متناظر معادل $0.991/0$ بوده که در شکل (۷) مشخص شده است.

برای ارزیابی دقیقتر می توان بر اساس مشخصات شاخص خاکهای گوناگون، خاکهای مورد بررسی را به دو گروه کلی تقسیم بندی نمود. خاکهای گروه اول دارای بالاترین مقادیر شاخص خمیری (PI) و حد روانی (LL) بوده و بر اساس سیستم طبقه بندی متحد در گروه خاکهای CH قرار می گیرند. نمودار C_{α} در برابر C_c برای نمونه های این گروه به همراه ضریب R^2 در شکل (۶) مشخص شده است. همانطور که در این شکل نیز اشاره شده، نسبت C_{α}/C_c برای خاکهای این گروه برابر $0.30/0$ بدست آمده که برابر مرز پایینی پیشنهاد شده توسط [۱۸] Mesri می باشد.



شکل (۷): نمودار C_{α} در برابر C_c برای خاکهای گروه دوم

۶- تخمین شاخص تحکیم ثانویه بر اساس روابط

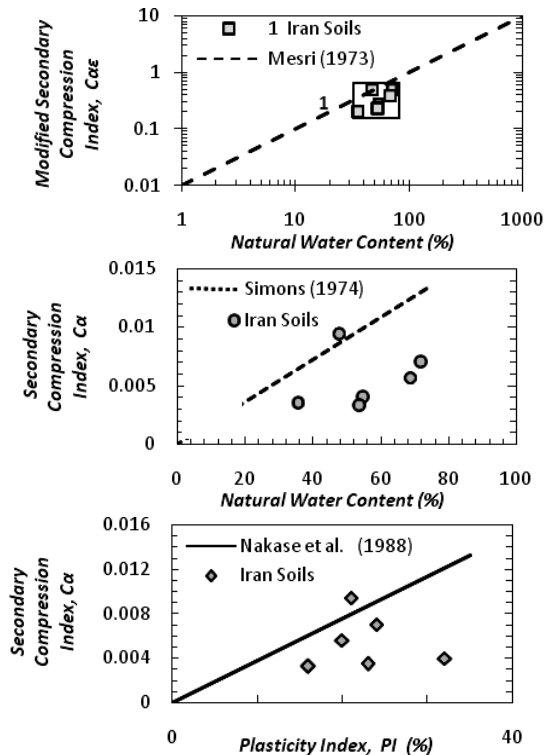
موجود در ادبیات فنی

همانطور که در مقدمه نیز اشاره شد روابط اندکی برای تخمین مشخصات تحکیم ثانویه خاکها موجود می‌باشد. خلاصه‌ای از این روابط در جدول (۲) لیست شده‌است.

جدول (۲): روابط موجود در ادبیات فنی جهت تخمین مشخصات تحکیم ثانویه بر اساس پارامترهای شاخص خاکها

Reference	Correlation
Mesri (1973)	$C_{\alpha\varepsilon} = 0.001 \omega_0$
Simons (1974)	$C_{\alpha} = 0.00018 \omega_0$
Nakase et al. (1988)	$C_{\alpha} = 0.00168 + 0.00033 PI$

در شکل (۸) روابط ارائه شده بوسیله خطوط و مقادیر بدست‌آمده از نمونه‌های مورد بررسی با نقاط مجزا نمایش داده شده‌است. با توجه به شکل یاد شده، روابط ارائه شده از قابلیت بالایی در تخمین مشخصات تحکیم ثانویه نمونه‌های مطالعه شده برخوردار نمی‌باشند. لازم به توضیح است که در نمودار ارائه شده توسط [۸] Mesri در سال ۱۹۷۳ (شکل ۸) هر دو محور مختصات در مقیاس لگاریتمی بوده و در نتیجه وجود تفاوتی اندک بین نتایج بدست‌آمده و خط تخمین زده شده ممکن است منجر به بروز تفاوت قابل توجهی گردد.



شکل (۸): مقایسه روابط ارائه شده و مقادیر بدست‌آمده برای شاخص تحکیم ثانویه

در روابط مورد بررسی، برای تخمین مشخصات تحکیم ثانویه خاکها از خصوصیات مانند رطوبت طبیعی و شاخص خمیری خاکها کمک گرفته شده است. به طور کلی پدیده تحکیم را باید تابعی از مشخصات ذاتی خاک (مانند نوع کانی، اندازه ذرات، خصوصیات سطحی اجزاء و ...) و مشخصات فیزیکی موجود در محل (مانند شرایط زهکشی و ابعاد لایه خاک، تنش بیش‌تحکیم یافتگی، سطح تنش موجود، نسبت تخلخل اولیه و ...) دانست.

به‌طور کلی پارامترهایی مانند شاخص خمیری و رطوبت طبیعی متأثر از مشخصات ذاتی خاک بوده و اطلاعاتی از شرایط فیزیکی موجود در محل بدست نمی‌دهند. درحالی که پارامتری مانند ضریب تحکیم (C_c) به نوعی بیانگر هردو گروه از مشخصات یاد شده می‌باشد. در نتیجه استفاده از مفهوم نسبت C_{α}/C_c قادر به در نظر گرفتن طیف وسیعتری از مشخصات خاک در تخمین خصوصیات تحکیم ثانویه می‌باشد. با دانستن نسبت C_{α}/C_c و شیب نمودار تحکیم در هر فشار دلخواه و با استفاده از رابطه (۲) می‌توان ضریب تحکیم ثانویه متناظر با هر تنش تحکیمی را تخمین زد.

$$(C_{\alpha})_{\sigma'} = (C_{\alpha}/C_c)(C_c)_{\sigma'} \quad (2)$$

در رابطه فوق $(C_c)_{\sigma'}$ بیانگر ضریب تحکیم در تنش موثر دلخواه σ' و $(C_{\alpha})_{\sigma'}$ معرف ضریب تحکیم ثانویه متناظر با همان تنش موثر می‌باشد. مقایسه میان C_{α} بدست‌آمده برای خاکهای مورد بررسی و مقادیر تخمین زده شده بر اساس روابط ارائه شده، در شکل (۹) نمایش داده شده است. لازم به توضیح است که روابط ارائه شده در متون فنی تنها قادر به تخمین مقادیر ضریب تحکیم ثانویه متناظر با ناحیه فشردگی (تنشهایی در قسمت خطی نمودار تحکیم و فراتر از تنش بیش‌تحکیمی) می‌باشند در نتیجه برای هر خاک با مشخصات ثابت، مقدار منحصربفردی بدست خواهد آمد. در حالی که مفهوم نسبت C_{α}/C_c قادر به تخمین ضریب تحکیم ثانویه در هر تنش دلخواه می‌باشد. در نتیجه در تخمین مقادیر C_{α} بر اساس رابطه (۲)، برای هر نوع خاک از چندین تنش متفاوت و ضریب تحکیم معادل آنها استفاده شده است به همین دلیل تعداد نقاط موجود در این حالت بیشتر است. در شکل (۹) ضریب تحکیم ثانویه متناظر با هر تنش دلخواه $(C_c)_{\sigma'}$ به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

(۳) برای خاکهای خمیری:

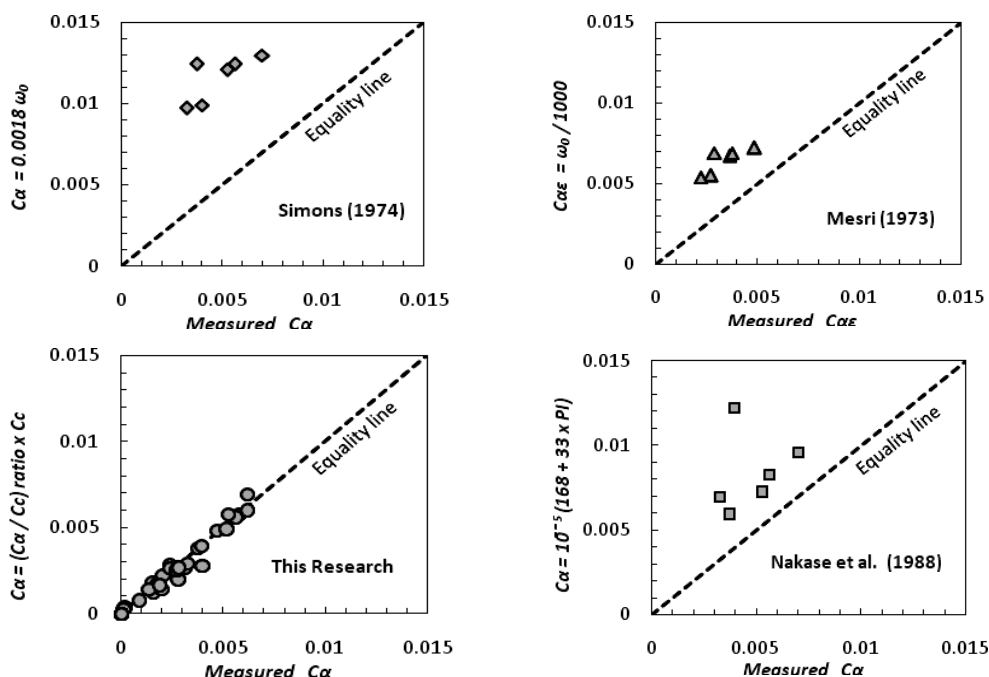
$$(C_{\alpha})_{\sigma'} = (0.030)(C_c)_{\sigma'}$$

(۴) برای خاکهای کم خمیری:

بدست آمده برای شاخص تحکیم ثانویه^۲ بر اساس روابط مذکور و با استفاده از مقادیر پیشنهاد شده در این پژوهش، در جدول (۳) خلاصه شده است.

$$(C_{\alpha})_{\sigma} = (0.024)(C_c)_{\sigma}$$

به منظور بررسی کمی دقیقتر، مقادیر میانگین و انحراف معیار استاندارد برای نسبت "مقادیر تخمین زده شده به مقادیر



شکل ۹: مقایسه میان مقادیر بدست آمده و مقادیر تخمین زده شده از مشخصات تحکیم ثانویه بر اساس روابط موجود در ادبیات فنی و مفهوم نسبت (C_{α} / C_c)

بررسی بدست می دهند. در حالی که نزدیک بودن مقدار میانگین به عدد $1/100$ و انحراف معیار استاندارد برابر 0.41 به خوبی بیانگر چگونگی عملکرد مناسب روابطه (۳ و ۴) و استفاده از نسبت C_{α}/C_c ثابت در تخمین مقادیر C_{α} برای تمامی سطوح تنش مورد مطالعه (شامل فشردگی و بازفشرده‌گی) می باشد.

۷- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله نتایج آزمایشات تحکیم درازمدت بر روی نمونه‌هایی دست نخورده از شش سایت مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. بر اساس نتایج آزمایشگاهی بدست آمده در سطوح پایین تنش و در محدوده اطراف تنش بیش تحکیمی، نمودار نشست - زمان دارای شیب افزایشی در قسمت ثانویه خود می باشد. در حالی که با افزایش سطح تنش و فاصله گرفتن از این محدوده، شیب قسمت ثانویه با گذشت زمان تقریباً ثابت باقی می ماند.

مقدار ضریب تحکیم ثانویه C_{α} برای یک نمونه از خاک منحصربفرد نبوده و به وضوح به تنش تحکیمی اعمالی وابسته

جدول (۳): میانگین و انحراف معیار استاندارد برای نسبت مقادیر تخمین زده شده به مقادیر بدست آمده

	$(C_{\alpha} \text{ or } C_{\alpha \varepsilon})_{Estimated}$		$(C_{\alpha} \text{ or } C_{\alpha \varepsilon})_{Measured}$	
	Mesri (1973)	Simons (1974)	Nakase et al. (1988)	This research
تعداد نقاط	۶	۶	۶	۳۰
میانگین	۱/۷۶	۲/۰۶	۱/۹۴	۱/۰۶
انحراف معیار استاندارد	۰/۴۸	۰/۷۰	۰/۸۳	۰/۴۱

در این جدول هر چه مقدار میانگین به عدد یک نزدیکتر بوده و انحراف معیار استاندارد (که بیان کننده چگونگی پراکندگی مقادیر نسبت به مقدار میانگین می باشد) کمتر باشد، رابطه مورد بررسی نتایج بهتری ارائه خواهد نمود. بر اساس نتایج این جدول، روابط موجود بر پایه مشخصات شاخص خاک مانند PI و ω_p اکثراً مقادیر بالاتری از C_{α} را برای خاکهای مورد



کم در تنشهای پایین شروع شده و در تنشهایی معادل دو تا پنج طبیعی و شاخص خمیری در یک نمونه از خاک، روابط موجود نیز شاخص تحکیم ثانویه منحصربفردی را برای هر خاک ارائه می‌کنند. به‌طور کلی ثابت نبودن شاخص تحکیم ثانویه و وابستگی آن به عوامل متعدد، خصوصاً فشار تحکیمی، کاربرد اینگونه روابط را شبه ساز می‌نماید.

با توجه به نتایج بدست‌آمده، استفاده از مفهوم C_{α}/C_c ، نسبت به سایر روشهای موجود از توانایی بالایی در تخمین مشخصات تحکیم ثانویه خاکها برخوردار می‌باشد. نتایج ارائه‌شده در شکل (۱۰) و جدول (۳)، به‌خوبی نحوه عملکرد مناسب روابط (۳ و ۴) و استفاده از نسبت‌های C_{α}/C_c ثابت را در تخمین مقادیر C_{α} برای تمامی سطوح تنش مورد مطالعه (شامل فشردگی و بازفشردگی) آشکار می‌سازد.

۸- سپاسگزاری

از زحمات فراوان آقای مهندس مهرداد کمال زارع سپاسگزاری و قدردانی می‌شود.

می‌باشد. به‌طور کلی بر اساس نتایج بدست‌آمده، C_{α} از مقدار برابر تنش بیش‌تحکیمی به بیشترین مقدار خود رسیده و سپس اندکی کاهش یافته یا ثابت می‌ماند.

نتایج بدست‌آمده از تمامی نمونه‌ها بیانگر وجود رابطه خطی با ضریب همبستگی بالا میان ضریب تحکیم ثانویه (C_{α}) و ضریب تحکیم (C_c) در محدوده تنشهای مورد بررسی می‌باشد (شکل ۴). به‌گونه‌ای که می‌توان نسبت C_{α}/C_c را برای هر نمونه مقدار ثابتی در نظر گرفت.

با توجه به گستردگی و تنوع موجود در خاکهای مورد بررسی، نسبت C_{α}/C_c را بر اساس مشخصات خاکها می‌توان به دو گروه مجزا تقسیم نمود. گروه اول شامل خاکهایی با خاصیت خمیری بالا (CH) با نسبت C_{α}/C_c معادل ۰/۰۳۰ و گروه دوم خاکهایی با خاصیت خمیری کم و متوسط (CL) و ML) با نسبت C_{α}/C_c برابر ۰/۰۲۴.

مقایسه میان شاخص تحکیم ثانویه بدست‌آمده و مقادیر تخمین زده‌شده بوسیله روابط مورد بررسی نشان دهنده عدم توانایی این روابط در تخمین مناسب خصوصیات تحکیم ثانویه می‌باشد. با توجه به ثابت بودن خصوصیات مانند رطوبت

۹- مراجع

- of Structures, British Geotechnical Society, pp.500 - 503, (1974).
- Mesri G.; Godlewski P.M.; "Time-and Stress - Compressibility Interrelationship", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, No.103, GT5, 417 - 430, (1977). [۱۱]
- Crawford C.B. " State of the Art: Evaluate and Interpretation of Soil Consolidation Tests, Consolidation of Soils", Testing And Evaluation, ASTM STP 892, R.N.Yong and F.C. Townsend Eds. ASTM, Philadelphia, pp. 71 - 103, (1986). [۱۲]
- Nakase A. et al. "Constitutive parameters estimated by plasticity index", JGED, ASCE, Vol 114, GT 7, July, pp 844 - 858, (1988). [۱۳]
- Mesri G. "Primary Compression and Secondary Compression", Soft Ground Construction 2001, Behavior of Soft Soils, pp.122 - 166, (2001). [۱۴]
- Mesri G.; Vardhanabhuti B. "Secondary Compression", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE.Vol. 131, No.3, pp.398 - 401, (2005). [۱۵]
- Fox P.J.; Edil B.; Lan L.T.; " Closure on C_{α}/C_c Concept Applied to Compression of Peat", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering", ASCE. August, Vol.118 No. 8. pp 767 - 770, (1992). [۱۶]
- Yin J.H. "Non-linear Creep of Soils in oedometer tests", Geotechnique , Vol. 49, No. 5, pp 699 - 707, (1999). [۱۷]
- Mesri G.; Vardhanabhuti B. " Closure to Secondary Compression", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE. June, pp 817 - 818, (2006). [۱۸]
- Terzaghi K.; Peck B.; Mesri G. "Soil Mechanics in Engineering Practice", Third Edition, John Wiley & Sons, Inc. TA 710.T39 9, (1995). [۱۹]
- Terzaghi K.; "Settlement and Consolidation of Clay", Engineering News-Record, 26 Nov.,pp. 874 - 878, (1925). [۱]
- Taylor D.W.; Merchant,W.; "A Theory of Clay Consolidation Accounting for Secondary Compression" J. maths. And Physics, 19(3), pp. 167 - 185, (1940). [۲]
- Wahls H.E. "Analyzing of Primary and Secondary Consolidation", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.88, SM6 .pp. 207 - 231, (1962). [۳]
- Horn H.M.; Lamb T.W.; " Settlement of the Buildings on the MIT campus" Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division. ASCE, Vol.90, SM5, pp.181 - 195, (1964). [۴]
- Kenne P.; " Discussion to Horn, H.M. and Lamb, T.W. Settlement of the Buildings on the MIT campus", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division. ASCE, Vol.90, SM5, pp.95-107, (1965). [۵]
- Walker L.K.; Raymond G.P.; "prediction of Consolidation Rate in a Cemented Clay", Canadian Geotechnical Journal, Vol.5, No.4, PP.192 - 216, (1968). [۶]
- Walker L.K. "Secondary Settlement in Sensitive Clays, Canadian Geotechnical Journal",Vol.6, NO.2, pp. 219 - 222, (1969). [۷]
- Mesri G. "Coefficient of Secondary Compression", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.99,SM1 .pp. 123 - 137, (1973). [۸]
- Ladd C.C.; "Settlement Analysis for Cohesive Soils", Res. Rpt. R71-2 No.272, Department of Civil Engineering, Mass. Institute of Technology, Cambridge, Ma, 115p, (1973). [۹]
- Simon N.E. " Normally Consolidated and Lightly Over-Consolidated Cohesive Materials, Review Paper: Session II, in Proceedings", Conference on Settlement [۱۰]

Gao Y.; Hehua Z.; yang X. “ Application of Relationship Between C_{α} and OCR^* in 1-D Compression Analysis for Clays”, ASCE. Vol.6, NO.2, pp. 219-222, (2007).

[۲۱]

Nash D. F. T.; Sils G. C.; Davison, L. R. “One-dimensional consolidation testing of soft clay from Bothkennar”. Geotechnique, Vol. 42, No. 2, pp. 241-256, (1999).

[۲۰]

۱- زیر نویس

¹ Massachusetts Institute of Technology

² Load Increment Ratio