



## تعیین خصوصیات تحکیم ثانویه خاکهای رسی در مقادیر مختلف فشارهای موثر

مهراب جسمانی<sup>۱</sup>، رامین واعظی<sup>۲</sup>

دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) - گروه مهندسی عمران

mehrabjesmani@yahoo.com

### خلاصه

در این مقاله به بررسی خصوصیات تحکیم ثانویه خاکهای ایران با تکیه بر مفهوم نسبت  $(G_{\alpha}/C_c)$  پرداخته شده است. برای این منظور نمونه‌هایی دست نخورده از نواحی شمالی و مرکزی ایران تهیه شده و آزمایشهای تحکیم تک‌بعدی بر روی آنها صورت گرفته است. در هر مرحله از بارگذاری به نمونه‌ها اجازه داده شده است تا به مدت یک تا سه هفته به تحکیم درازمدت خود ادامه دهند. ضریب تحکیم ثانویه  $(C_{\alpha})$  برای هر کدام از خاکهای مورد بررسی مشخص و با مقادیر تخمین زده شده بر اساس روابط موجود در ادبیات فنی مقایسه شده است. روند تغییرات  $(C_{\alpha})$  در برابر  $(C_c)$  برای تمامی نمونه‌ها بیانگر وجود نسبت  $(G_{\alpha}/C_c)$  منحصربفردی در کلیه تنشهای مورد بررسی می‌باشد به گونه‌ای که می‌توان در تخمین مقادیر ضرایب تحکیم ثانویه خاکها از این مفهوم استفاده نمود.

کلمات کلیدی: خاکهای ریزدانه، تحکیم، تحکیم ثانویه

### مقدمه

به طور کلی بعد از ارائه تئوری تحکیم تک‌بعدی Terzaghi در سال ۱۹۲۵ و توجه به اختلافات موجود میان نتایج حاصل از این تئوری و مشاهدات انجام شده، مفاهیمی مانند تأثیرات ثانویه (Secondary Effects)، خزش خاک (Creep of Soil)، تأثیرات وابسته به زمان (Effects Secular Time)، تحکیم ثانویه (Secondary Consolidation /or/ Secondary Compression) مطرح شدند. در تعاریف مفاهیم فوق، اختلافات ناچیزی موجود می‌باشد ولی به طور کلی تمامی این تعاریف به منظور بررسی تغییر حجم لایه خاک ریزدانه، بعد از صفر شدن اضافه فشار آب حفره‌ای (در تنش موثر ثابت) مطرح شده‌اند.

این تصور که "تحکیم ثانویه بعد از اتمام تحکیم اولیه روی می‌دهد." از نظر منطقی به نظر زیاد دقیق نمی‌آید. یک فرض اندکی دقیق‌تر این است که در هر المان جزئی خاک، وقوع تحکیم ثانویه منوط به اتمام تحکیم اولیه در آن المان می‌باشد. بنابراین تحکیم ثانویه در المان‌های مجاور مرزهای زهکشی، تقریباً بلافاصله بعد از بارگذاری آغاز خواهد شد. این در حالی است که المانهای داخلی تر هنوز در فاز تحکیم اولیه خود به سر می‌برند. در نتیجه در یک نگاه کلی انتظار می‌رود که تأثیرات ثانویه، همزمان با تحکیم اولیه، در کل سیستم روی دهد. مضافاً این تصور که تنها پس از اتمام تحکیم اولیه، تحکیم ثانویه روی می‌دهد، (حتی در یک المان با ابعاد بسیار کوچک) فرضی بسیار ساده سازی شده است. چگونه ممکن است که در روند یک آزمایش تحکیم، در یک مرحله از بارگذاری، تحکیم ثانویه ناشی از بارگذاری قبلی متوقف شده و نمونه به تحکیم اولیه در بار حاضر ادامه دهد و بعد از اتمام مراحل تحکیم اولیه (یعنی پس از از بین رفتن کامل اضافه فشار آب حفره‌ای در اثر بارگذاری جدید)، مجدداً به فاز ثانویه وارد شده و به تحکیم ثانویه خود در بار حاضر ادامه دهد. این امر باعث عدم پیوستگی در روند تحکیم ثانویه و توقف آن در ابتدای بارگذاری جدید خواهد شد. در واقع در طول فرآیند تحکیم اولیه، حداقل حضور تحکیم ثانویه ناشی از بارگذاری‌های پیشین انکار ناپذیر است. بعلاوه با پیشرفت روند تحکیم اولیه (کاهش فشار آب و انتقال تنش موثر به اسکلت خاک)، انتظار کلی بر این است که تحکیم ثانویه متناظر با تنش موثر موجود در هر لحظه از تحکیم اولیه، روی دهد. به طور کلی می‌توان نسبت تداخل یک المان از خاک را در طول مراحل تحکیم، تابعی از تنش موثر قائم و زمان معرفی نمود (معادله ۱) و برای بدست آوردن تراکم کلی در فاصله زمانی  $(t)$ ، از معادله (۱) نسبت به زمان انتگرال می‌گیریم.

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

<sup>۱</sup> دکترای مهندسی عمران

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک خاک و پی



$$\int_0^t de = \int_0^{t_p} \left( \frac{\partial e}{\partial \sigma'_v} \right)_t \frac{d\sigma'_v}{dt} + \left( \frac{\partial e}{\partial t} \right)_{\sigma'_v} dt + \int_{t_p}^t \left( \frac{\partial e}{\partial t} \right)_{\sigma'_v} dt \quad (2)$$

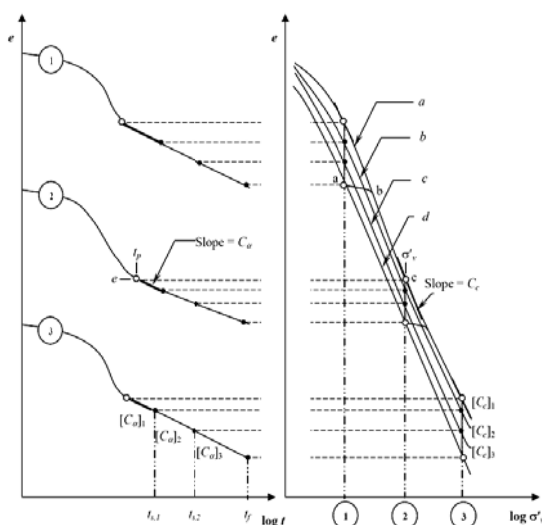
که در روابط فوق  $e$  بیانگر نسبت تخلخل،  $t$  نشان دهنده زمان و  $\sigma'_v$  نشان دهنده تنش موثر قائم می‌باشد.  $(\partial e / \partial \sigma'_v)_t$  بیانگر تراکم پذیری ساختمان خاک در نتیجه افزایش تنش موثر قائم، در زمان مشخص و  $(\partial e / \partial t)_{\sigma'_v}$  بیانگر تراکم پذیری خاک در اثر گذشت زمان در تنش موثر ثابت می‌باشد (تحکیم ثانویه).  $(t_p)$  بیانگر زمانی است که تا پیش از آن، تنش موثر قائم تغییر می‌نماید و بعد از آن ثابت می‌ماند. به بیان دیگر در زمانهای بزرگتر از  $(t_p)$ ،  $d\sigma'_v / dt$  برابر صفر است. دوره زمانی که در آن تنش موثر افزایش می‌یابد را تحکیم اولیه و مراحل نامحدود بعد از آن را تحکیم ثانویه می‌نامند. در طول تحکیم اولیه،  $(\partial e / \partial \sigma'_v)_t$  و  $(\partial e / \partial t)_{\sigma'_v}$  به صورت همزمان تغییر می‌نمایند. 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 بدانیم  $(\partial e / \partial \sigma'_v)_t$  و  $(\partial e / \partial t)_{\sigma'_v}$  از مشخصات ثابت خاک نبوده و در طول مراحل تحکیم اولیه و ثانویه ثابت باقی نمی‌مانند. خصوصاً مقدار  $(\partial e / \partial t)_{\sigma'_v}$  در تحکیم اولیه، لزوماً مشابه مقدار آن در تحکیم ثانویه نمی‌باشد [۱].

### مروری بر مطالعات گذشتگان

در دهه ۶۰ و ۷۰ میلادی، تلاشهای فراوانی به منظور برقراری ارتباط میان ضریب تحکیم ثانویه و دیگر خصوصیات خاک صورت گرفت. [۲] Walker و Raymond در سال ۱۹۶۸ رابطه‌ای خطی میان نرخ تحکیم ثانویه  $(C_\alpha = \Delta e / \Delta \log t)$  و شاخص تراکم  $(C_c = \Delta e / \Delta \log \sigma)$  را پیشنهاد نمودند. [۳] Walker در سال ۱۹۶۹  $(C_\alpha)$  را در برابر  $(C_c)$  برای فشارهای مختلف تحکیم رسم نمود. [۴] Ladd در سال ۱۹۷۳،  $C_\alpha / (1 + e_0)$  را در برابر  $C_c / (1 + e_0)$  رسم کرده و روند تغییرات این دو پارامتر را یکسان گزارش نمودند. در سال ۱۹۷۷، [۵] Mesri و Goldlewski، نسبت  $(C_\alpha / C_c)$  را برای ۲۲ نهشته طبیعی خاک محاسبه نموده و مقدار این نسبت را در محدوده ۰/۰۲۵ تا ۰/۱۰۰ با مقادیر بالاتر برای خاکهای بسیار آلی پیشنهاد نمودند. مشاهدات آنها بیانگر این مطلب بود که  $C_\alpha$  تابعی از نسبت افزایش بار نمی‌باشد ولی به تنش موثر به کار رفته و نسبت آن به تنش موثر بیش تحکیمی  $(\sigma'_0 / \sigma'_c)$  وابسته می‌باشد. در سالهای بعدی Mesri و همکارانش مفهوم نسبت  $(C_\alpha / C_c)$  را دنبال نمودند و در قالب مقالات و بحث‌های فراوانی این نسبت را برای خاکهای مختلف بدست آوردند [۶] Mesri et al. (۱۹۹۷) - [۷] Mesri (۲۰۰۱) - [۸] Mesri (۲۰۰۵)، [۹] Mesri (۲۰۰۶).

### نحوه تعیین نسبت $C_\alpha / C_c$ با استفاده از نتایج آزمایش ادنومتر

بر اساس پیشنهادات [۱۰] Mesri، برای بدست آوردن نسبت  $(C_\alpha / C_c)$ ، ضریب تحکیم ثانویه  $(C_\alpha)$  برابر شیب نمودار نسبت تخلخل-زمان (در مقیاس نیمه لگاریتمی) بوده و برای تعیین آن لازم است بعد از انتهای تحکیم اولیه، در حدود یک سیکل از لگاریتم زمان به نمونه فرصت داده شود تا در تنش موثر ثابت به تحکیم ثانویه خود ادامه دهد. مقدار ضریب تحکیم  $(C_c)$  نیز بر اساس شیب بدست آمده از منحنی  $(EOP, e - \log \sigma'_v)$  در تنش موثر قائم متناظر بدست آمده و نسبت مذکور محاسبه می‌شود. شکل (۱) نحوه محاسبه و نمونه‌هایی از مقادیر بدست آمده برای این نسبت را مشخص می‌کنند.



Soil Description	$C_\alpha / C_c$
Amorphous and fibrous peat	0.035-0.085
Leda clay (Canada)	0.030-0.060
Post-glacial Swedish Clay	0.050-0.070
Organic clays and silts	0.040-0.060
Sensitive clay, Portland, ME	0.025-0.055
San Francisco Bay Mud	0.040-0.060
New Liskeard (Canada)	0.040-0.030
Mexico City clay	0.030-0.035
Hudson River silt	0.030-0.060
New Haven organic clay silt	0.040-0.075
St. Alban, Quebec, Canada	0.024
Neihou Taipei, R.O.C.	0.032
Soft blue clay (Victoria, B.C.)	0.026
Cucarache Panama canal, Denver, Colorado	0.022
Patapsco, Washington D.C	0.017
Batiscan Quebec, Canada	0.30

شکل ۱- نحوه محاسبه نسبت  $(C_\alpha / C_c)$  بر اساس پیشنهاد Mesri و Godlewski و نمونه‌هایی از مقادیر  $(C_\alpha / C_c)$  از منابع [۵]، [۷]، [۱۵] و [۱۶]



## معرفی نمونه‌ها و روند آزمایشات

به منظور بررسی خصوصیات تحکیم زمانبر خاک‌های ریزدانه، نمونه‌های دست نخورده از نواحی شمالی (اطراف پل سفید، جاده فیروزکوه) و نواحی مرکزی تر (شامل نواحی اطراف قزوین) تهیه شده و بعد از انجام آزمایشات مقدماتی، تحت تحکیم یک‌بعدی قائم در دستگاه ادنومتر قرار گرفته‌اند. نتایج آزمایشات شناسایی در جدول (۱) لیست شده است. لازم به توضیح است که مقادیر گزارش شده برابر میانگین مقادیر بدست آمده برای مشخصات خاکهای موجود در هر گروه از خاکهای مورد مطالعه می‌باشد.

جدول ۱- نتایج آزمایشات شناسایی نمونه‌های مورد مطالعه

Site Name	Group	Soil's Description (USCS)	Etterburg Limits (average value)			Natural Water Content, $\omega_0$ (%)	Fine grain Percentage (%)	Initial Void Ratio,	Activity
			Liquid Limit (%)	Plasticity Limit (%)	Plasticity Index (%)				
Polsefid	Group 2	CH	55	23	32	55	96	0.57	1.34
Ghazvin	Group 1	CL	30	19	11	67	79	0.96	0.73

با توجه به نتایج جدول (۱)، نمونه‌های بدست آمده از نواحی اطراف پل سفید، دارای خاکهایی با خاصیت خمیری بالا بوده که بر اساس تقسیم‌بندی متحد، تحت عنوان CH نامگذاری می‌شوند. درصد ریزدانه عبوری از الک شماره ۲۰۰ به طور متوسط برای این خاکها برابر ۹۶٪ می‌باشد. خاکهای نواحی اطراف قزوین شامل خاکهایی با خاصیت خمیری کم تا متوسط (CL) بوده و درصد ریزدانه این خاکها برابر ۷۹٪ می‌باشد. برای هر دو گروه مورد بررسی، رطوبت طبیعی متوسط بدست آمده از نمونه‌ها بیشتر یا برابر حد خمیری متناظر می‌باشد. این امر را می‌توان به تهیه نمونه‌ها در فصول بارندگی نسبت داد. بعد از انجام آزمایشات مقدماتی، نمونه‌هایی با قطر ۱/۹۴۰ تا ۱/۹۳۳ و ارتفاع ۶/۱۲۵ تا ۶/۱۴۵ در دستگاه ادنومتر و تحت تنشهای افزایشی قرار گرفته‌اند.

از آنجایی که در نسبتهای پایین نمو بار و بدون محاسبه اضافه فشار آب حفره‌ای امکان تخمین انتهای تحکیم اولیه به کمک روشهای Casagrande یا Taylor مقدور نیست [۱۰]، لذا استفاده از نسبتهای پایین رشد بار در این شرایط امکان پذیر نمی‌باشد و در نتیجه نرخ رشد بار برای کلیه سطوح تنش برابر واحد در نظر گرفته شده است ( $LIR = 1$ ). در این پژوهش به منظور بررسی دقیق‌تر روند تغییرات نسبت ( $G_\alpha$ ) در برابر ( $C_c$ ) در شش تنش متفاوت (شامل سطوحی از تنش در هر دو ناحیه فشردگی و بازفشرده‌گی<sup>۱</sup>) به نمونه اجازه داده شده است تا به مدت یک هفته به تحکیم درازمدت خود ادامه دهند. 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 در نتیجه هر کدام از نمونه‌های مورد بررسی به مدت ۸ هفته در دستگاه تحکیم قرار داشته‌اند.

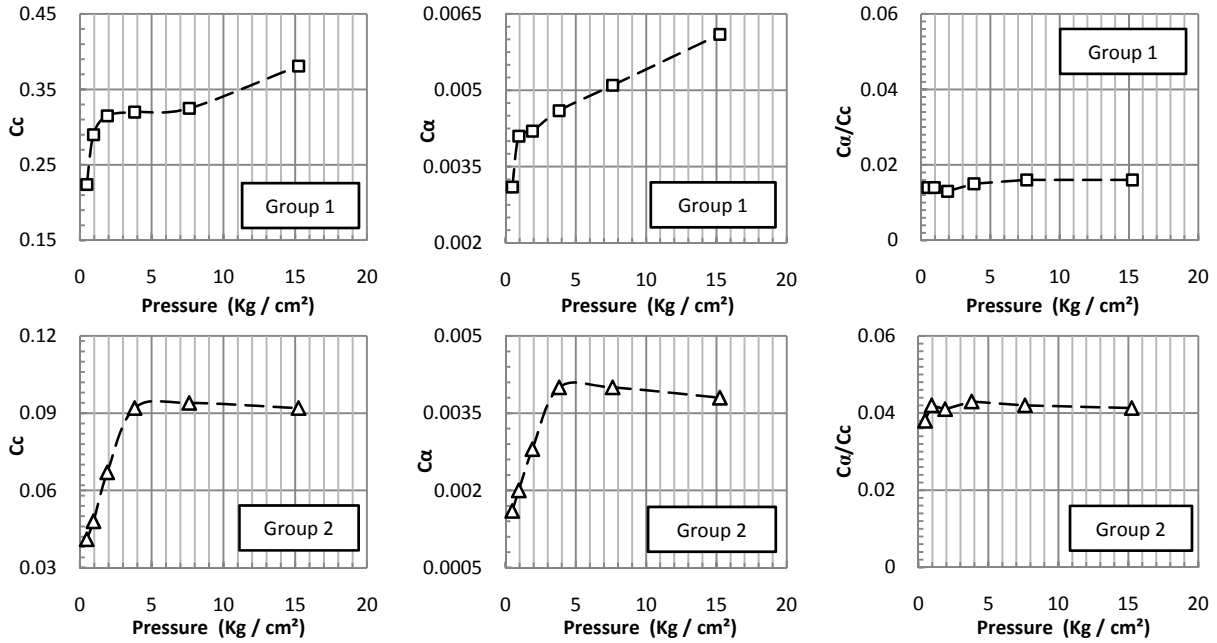
## نتایج آزمایشات تحکیم زمانبر و بررسی روند تغییرات ضرایب تحکیم در برابر تنش موثر

نتایج آزمایشات تحکیم زمانبر در جدول (۲) لیست شده است. براساس نتایج موجود، ضریب تحکیم ثانویه ( $C_\alpha$ ) منحصر بفرد نبوده و در مراحل مختلف تحکیم تغییر می‌کند. برای بررسی تغییرات ضرایب تحکیم، مقادیر ضریب تحکیم ( $C_c$ ) و ضریب تحکیم ثانویه ( $C_\alpha$ ) برای هر دو گروه از نمونه‌ها در برابر تنش موثر تحکیمی، در شکل (۲) رسم شده است.

جدول ۲- نتایج حاصل از آزمایشات تحکیم زمانبر بر روی نمونه‌های مورد بررسی

Pressure Kg/cm <sup>2</sup>	$ep$		$C_\alpha$ $\Delta e / \Delta \log t$		$C_c$ $\Delta e / \Delta \log \sigma'$		$C_{\alpha e}$ $C_\alpha / (1+ep)$	
	Group 1	Group 2	Group 1	Group 2	Group 1	Group 2	Group 1	Group 2
0.48	0.90	0.54	0.0031	0.0016	0.224	0.041	0.0016	0.0010
0.95	0.82	0.52	0.0041	0.0020	0.290	0.048	0.0023	0.0013
1.91	0.72	0.51	0.0042	0.0028	0.315	0.067	0.0024	0.0019
3.81	0.63	0.48	0.0046	0.0040	0.32	0.092	0.0028	0.0027
7.62	0.53	0.46	0.0051	0.0040	0.325	0.094	0.0033	0.0027
15.24	0.42	0.42	0.0061	0.0038	0.381	0.092	0.0043	0.0027

<sup>1</sup> - Recompression



شکل ۲- روند تغییرات ضریب تحکیم و ضریب تحکیم ثانویه و نسبت  $(C_{\alpha} / C_c)$  در برابر تنش موثر قائم

نتایج نشان دهنده وابستگی ضریب تحکیم ثانویه به مقادیر تنش تحکیمی می‌باشد. روند این تغییرات برای هر دو گروه از خاکهای مورد بررسی به گونه‌ای است که در تنشهای کم شاهد مقادیر کوچکی برای  $(C_{\alpha})$  خواهیم بود و با افزایش تنش موثر، مقادیر  $(C_{\alpha})$  نیز افزایش می‌یابد. با دقت در شکل (۲)، با وجود عدم ثابت ماندن ضریب تحکیم ثانویه در تنشهای متفاوت، تغییرات ضریب تحکیم  $(C_c)$  و ضریب تحکیم ثانویه  $(C_{\alpha})$  از روند تقریباً یکسانی تبعیت می‌کنند. به طوری که نسبت حاصل از تقسیم  $(C_{\alpha})$  به  $(C_c)$  در تنشهای تحکیمی متفاوت، تقریباً ثابت خواهد ماند. برای بررسی کمی این روند، از نسبت  $(C_{\alpha})$  به روی  $(C_c)$  استفاده خواهد شد. جدول (۳)، مقادیر نسبت مذکور در برابر تنشهای تحکیمی متفاوت، به همراه انحراف معیار استاندارد و خطای استاندارد میان  $(C_{\alpha})$  و  $(C_c)$  را مشخص می‌کند. با توجه به متفاوت بودن محدوده اعداد مورد بررسی، مقایسه میان مقادیر انحراف معیار استاندارد به تنهایی امکانپذیر نمی‌باشد. در نتیجه در بررسی انجام شده، از حاصل تقسیم مقادیر انحراف معیار استاندارد بر مقادیر میانگین استفاده شده است.

$$CI = \frac{\text{انحراف معیار استاندارد}}{\text{میانگین}} \quad (3)$$

بدیهی است هر چه مقدار  $CI$  بیشتر باشد، نشان دهنده پراکندگی بیشتر نتایج نسبت به مقدار میانگین خواهد بود.

جدول ۳- نتایج تحلیل‌های آماری بر روی مقادیر ضرایب تحکیم و نسبت  $(C_{\alpha} / C_c)$

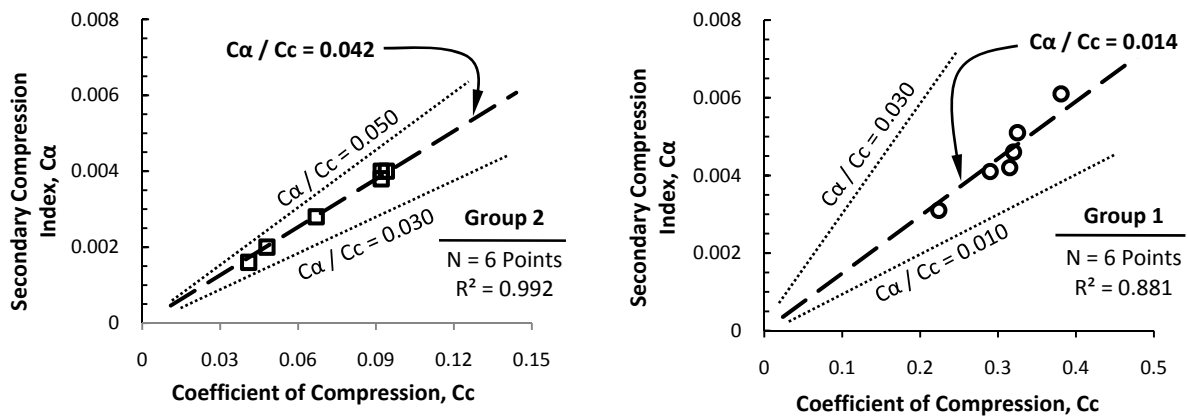
Pressure Kg/cm <sup>2</sup>	Group 1			Group 2		
	$C_{\alpha}$	$C_c$	$C_{\alpha} / C_c$	$C_{\alpha}$	$C_c$	$C_{\alpha} / C_c$
0.48	0.0031	0.224	0.0138	0.0016	0.041	0.0390
0.95	0.0041	0.290	0.0141	0.0020	0.048	0.0417
1.91	0.0042	0.315	0.0133	0.0028	0.067	0.0418
3.81	0.0046	0.32	0.0144	0.0040	0.092	0.0435
7.62	0.0051	0.325	0.0157	0.0040	0.094	0.0426
15.24	0.0061	0.381	0.0160	0.0038	0.092	0.0413
Average	0.0045	0.3092	0.0146	0.0030	0.0723	0.0416
Standard Deviation	0.0010	0.0513	0.0011	0.0011	0.0239	0.0015
$CI = (St.Dev./Ave.) \times 100$	22.35	16.61	7.28	34.99	32.98	3.59
Standard Error between $C_{\alpha}$ and $C_c$	0.000303			0.000078		



با توجه به نتایج جدول (۳)، نسبت‌های  $CI$  بدست آمده برای ضریب تحکیم و ضریب ثانویه از مقادیر بالایی برخوردار می‌باشند. در حالی که این نسبت برای مقادیر  $(C_\alpha / C_c)$  در مقایسه با سایر نتایج کمتر بوده که نشان دهنده روند یکنواخت و عدم پراکندگی مقادیر  $(C_\alpha / C_c)$  در فشارهای مختلف تحکیمی می‌باشد. به بیان دیگر نتایج نشان دهنده عدم وابستگی (وابستگی کم) میان نسبت  $(C_\alpha / C_c)$  و سطوح تنش در محدوده بررسی شده می‌باشد. بر اساس نتایج جدول (۳)، مقادیر میانگین نسبت  $(C_\alpha / C_c)$  برای خاکهای مورد بررسی برابر  $0.146$  و  $0.416$  بدست آمده‌اند.

### تعیین نسبت $(C_\alpha / C_c)$ و مقایسه با نتایج موجود در ادبیات فنی

بر اساس پیشنهاد [۵] *Mesri* و *Godlewski*، مقدار نسبت  $(C_\alpha / C_c)$  برابر شیب بهترین خط عبوری از میان نقاط حاصل از رسم مقادیر  $(C_\alpha)$  در برابر  $(C_c)$  می‌باشد نه مقدار میانگین این نسبتها در تنشهای متفاوت. شکل (۳) نحوه تعیین مقادیر نسبت  $(C_\alpha / C_c)$  را به همراه مقادیر ضریب همبستگی ( $R^2$ ) مربوط به خاکهای مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۳- روند تغییرات  $(C_\alpha)$  در برابر  $(C_c)$  در تنشهای تحکیمی گوناگون و نحوه تخمین مقادیر نسبت  $(C_\alpha / C_c)$  برای نمونه‌های گروه اول و دوم

با توجه به شکل (۳)، مقادیر  $(C_\alpha / C_c)$  برای نمونه‌های بدست آمده برای خاکهای گروه ۱ و ۲ به ترتیب برابر  $0.14$  و  $0.42$  بدست آمده‌است. ضریب همبستگی بالا، نشان دهنده وجود رابطه خطی میان  $(C_\alpha)$  و  $(C_c)$  بوده به گونه‌ای که می‌توان نسبت  $(C_\alpha / C_c)$  را در تمام محدوده های تنش مورد بررسی (شامل فشردگی و بازفشرده‌گی) و برای هر گروه از خاکهای مورد مطالعه تقریباً ثابت دانست. مقادیر بدست آمده برای خاکهای گروه اول، تقریباً با مرز پایینی محدوده پیشنهاد شده توسط [۱۱] *Mesri et al.* در سال ۱۹۹۰ مبنی بر وجود  $0.15 \leq (C_\alpha / C_c) \leq 0.30$  برای رسهای ماسه‌دار برابر بوده و همچنین با محدوده پیشنهاد شده توسط [۱۰] *Mesri* مبنی بر وجود  $0.10 \leq (C_\alpha / C_c) \leq 0.30$  برای خاکهایی با ماهیت دانه‌ای تطابق خوبی دارد. بعلاوه نسبت  $(C_\alpha / C_c)$  برای خاکهای گروه دوم در محدوده پیشنهاد شده توسط [۱۰] *Mesri* مبنی بر وجود  $0.30 \leq (C_\alpha / C_c) \leq 0.50$  برای رسها و سیلت‌های غیر آلی می‌باشد. در شکل (۳) نقطه‌چینهایی به منظور مقایسه نتایج و محدوده‌های پیشنهاد شده رسم شده‌اند.

### تخمین خصوصیات تحکیم ثانویه

[۱۲] *Mesri* در سال ۱۹۷۳ نموداری برای تخمین ضریب تحکیم ثانویه اصلاح شده  $(C_{\alpha\epsilon} = C_\alpha / (1 + e_0))$  بر اساس  $(\omega_0)$  ارائه نمود. در سال ۱۹۷۴، [۱۳] *Simon* رابطه‌ای برای تخمین ضریب تحکیم ثانویه در ارتباط با درصد رطوبت طبیعی پیشنهاد نمود و در سال ۱۹۸۸ [۱۴] *Nakase et al.* رابطه‌ای را برای تعیین ضریب تحکیم ثانویه  $(C_\alpha)$  بر حسب  $(PI)$  ارائه نمودند. روابط پیشنهاد شده و مقادیر بدست آمده از هر یک از این روابط برای هر گروه از خاکهای مورد بررسی در جدول (۴) مشخص شده‌است. با توجه به نتایج موجود در جدول (۴)، رابطه ارائه شده توسط [۱۴] *Nakase et al.* تخمین نسبتاً مناسبی از ضریب تحکیم ثانویه خاکهای گروه اول بدست می‌دهد در حالی که برای خاکهای گروه دوم تخمینی در حدود ۳ برابر مقادیر بدست آمده ارائه می‌نماید. به طور کلی اکثر روابط مقادیر بالاتری را برای ضریب تحکیم ثانویه و یا ضریب تحکیم ثانویه اصلاح شده ارائه می‌نمایند. بعلاوه چنین روابطی شاخص تحکیم ثانویه منحصر بفردی را برای هر خاک ارائه می‌کنند در حالی که بر اساس مطالب موجود در جدول (۳) و شکل (۱)، ضریب تحکیم ثانویه به عواملی از جمله محدوده تنش اعمالی وابسته بوده و مقدار ثابتی نمی‌باشد. تخمین نامناسب مشخصات تحکیم ثانویه خاکها بر اساس روابطی بر پایه پارامترهای شاخص (مانند  $\omega_0$  و  $PI$ ) از یک سو و عدم توانایی این روابط در تعیین مشخصات تحکیم ثانویه در سطوح مختلف تنش از دیگر سو باعث کاهش قابلیت اطمینان به چنین روابطی گردیده‌است.



جدول ۴- روابط موجود در ادبیات فنی جهت تخمین مشخصات تحکیم ثانویه و مقادیر بدست آمده برای هر گروه از خاکهای مورد بررسی

	Measured		Estimated		
	$C_\alpha$	$C_{\alpha\varepsilon}$	Mesri (1973) $C_{\alpha\varepsilon} = 0.0001 (\omega_0 \%)$	Simons (1974) $C_\alpha = 0.00018 (\omega_0 \%)$	Nakase et al. (1988) $C_\alpha = 0.00168 + 0.00033 PI$
Group 1	0.0061	0.430	$(C_{\alpha\varepsilon}) = 0.67$	$(C_\alpha) = 0.0121$	$(C_\alpha) = 0.0053$
Group 2	0.0040	0.273	$(C_{\alpha\varepsilon}) = 0.55$	$(C_\alpha) = 0.0099$	$(C_\alpha) = 0.0122$

امروزه یکی از معتبرترین روشها برای تعیین مشخصات تحکیم ثانویه خاکها، استفاده از نسبت  $(C_\alpha / C_c)$  می باشد. [۷] Mesri در سال ۲۰۰۱ جدول (۵) را به منظور تخمین مقادیر نسبت  $(C_\alpha / C_c)$  برای خاکهای گوناگون توصیه نمود.

جدول ۵- مقادیر  $(C_\alpha / C_c)$  پیشنهاد شده توسط Mesri [۷] برای مصالح ژئوتکنیکی

Material	$(C_\alpha / C_c)$
Granular soil including rock fill	$0.02 \pm 0.01$
Shale & Mudston	$0.03 \pm 0.01$
Inorganic clays & silts	$0.04 \pm 0.01$
Organic clays & Silts	$0.05 \pm 0.01$
Fibrous and amorphous peats	$0.06 \pm 0.01$

با تکیه بر جدول فوق، نسبت  $(C_\alpha / C_c)$  برای خاکهای گروه اول برابر  $0.04$  و برای خاکهای گروه دوم برابر  $0.02$  پیشنهاد می شود. با توجه به ضرایب تحکیم بدست آمده و نسبت  $(C_\alpha / C_c)$  پیشنهاد شده، می توان تخمینی از ضریب تحکیم ثانویه معادل هر تنش تحکیمی (شامل فشردگی و بازفشردگی) بدست آورد. مقادیر ضرایب تحکیم ثانویه بدست آمده از نتایج مطالعات آزمایشگاهی و مقادیر تخمین زده شده در تنشهای تحکیمی متفاوت در جدول (۶) لیست شده اند.

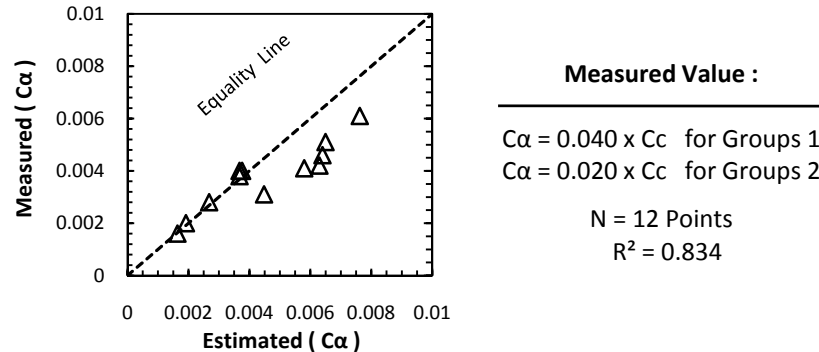
جدول ۶- مقایسه میان مقادیر  $(C_\alpha)$  تخمین زده شده و بدست آمده

	Pressure Kg/cm <sup>2</sup>	$C_c$	$C_\alpha / C_c$ (Table 6)	Estimated $C_\alpha$ $= (C_\alpha / C_c) \times C_c$	Measured $C_\alpha$	$\frac{\text{Estimated}(C_\alpha)}{\text{Measured}(C_\alpha)}$
Group 2	0.48	0.224	0.02	0.00448	0.0031	1.44
	0.95	0.29	0.02	0.0058	0.0041	1.41
	1.91	0.315	0.02	0.0063	0.0042	1.50
	3.81	0.32	0.02	0.0064	0.0046	1.39
	7.62	0.325	0.02	0.0065	0.0051	1.27
	15.24	0.381	0.02	0.00762	0.0061	1.25
Group 1	0.48	0.041	0.04	0.00164	0.0016	1.02
	0.95	0.048	0.04	0.00192	0.002	0.96
	1.91	0.067	0.04	0.00268	0.0028	0.96
	3.81	0.092	0.04	0.00368	0.004	0.92
	7.62	0.094	0.04	0.00376	0.004	0.94
	15.24	0.092	0.04	0.00368	0.0038	0.97
Average :						1.17
Standard Deviation :						0.23

به منظور بررسی قابلیت اطمینان به مقادیر پیشنهاد شده توسط [۷] Mesri، از نسبت مقادیر تخمین زده شده به روی مقادیر بدست آمده برای  $(C_\alpha)$  استفاده شده است. با توجه به نتایج جدول (۶)، مقادیر میانگین این نسبت برابر  $1/17$  می باشد. در نتیجه مقادیر ضریب تحکیم ثانویه تخمین زده شده بر اساس جدول (۵) به صورت میانگین  $17\%$  از مقادیر بدست آمده بالاتر می باشند. وجود انحراف معیار استاندارد کوچکی برابر  $0.23$  در نسبتهای مذکور



نشان دهنده پراکندگی کم از مقدار میانگین بوده و دلیلی برای مناسب بودن مقدار میانگین به عنوان مشخصه‌ای برای مقایسه این نسبتها می‌باشد. در بررسی دقیقتر می‌توان مقادیر میانگین نسبت مقادیر تخمین زده شده بر روی مقادیر بدست آمده را برای نمونه‌های گروه اول برابر ۰/۹۶ و برای گروه دوم برابر ۱/۳۸ معرفی نمود. برای بررسی کیفی، مقادیر تخمین زده شده در برابر مقادیر بدست آمده از مطالعات آزمایشگاهی در شکل (۳) رسم شده است.



شکل ۳- مقایسه میان مقادیر ضریب تحکیم ثانویه تخمین زده شده و بدست آمده از مطالعات آزمایشگاهی

### نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایشات درازمدت تحکیم بر روی نمونه‌های مورد مطالعه ضرایب تحکیم ثانویه ( $C_{\alpha}$ ) مقادیر ثابتی نبوده و به وضوح به تنش موثر اعمالی وابسته می‌باشد.

بررسی روند تغییرات ضرایب تحکیم ثانویه ( $C_{\alpha}$ ) و ضریب تحکیم ( $C_c$ )، نشان دهنده عدم وابستگی نسبت ( $C_{\alpha}/C_c$ ) به عواملی مانند تنش موثر تحکیمی می‌باشد به گونه‌ای که می‌توان برای هر گروه از نمونه‌های مورد مطالعه، مقدار منحصربفردی را برای ( $C_{\alpha}/C_c$ ) در نظر گرفت. با توجه به مطالب ارائه شده، نسبت ( $C_{\alpha}/C_c$ ) بدست آمده برای هر دو گروه از خاکهای مورد بررسی با مقادیر ارائه شده در ادبیات فنی از تطابق خوبی برخوردار می‌باشد.

روابط تجربی موجود در ادبیات فنی بر اساس مشخصات شاخص خاکها (مانند شاخص خمیری و رطوبت طبیعی)، مقدار منحصربفردی را برای ضریب تحکیم ثانویه هر خاک ارائه کرده وقادر به انعکاس عواملی مانند سطوح تنش در تغییرات ضریب تحکیم ثانویه نمی‌باشند. در حالی که مفهوم نسبت ( $C_{\alpha}/C_c$ ) قادر به تخمین ضرایب تحکیم ثانویه متناظر با سطوح تنش متفاوت می‌باشد.

مقادیر تخمین زده شده برای ضریب تحکیم ثانویه با استفاده از مقادیر جدول (۵)، (ارائه شده توسط [۷] Mesri در سال ۲۰۰۱) و نتایج حاصل از آزمایشات آزمایشگاهی برای نمونه‌های مورد مطالعه و در محدوده تنشهای مورد بررسی از تطابق خوبی برخوردار بوده به گونه‌ای که می‌توان با در اختیار داشتن ضریب تحکیم ( $C_c$ ) در هر تنش تحکیمی، از مقادیر جدول (۵) به منظور تخمین مقادیر ضریب تحکیم ثانویه ( $C_{\alpha}$ ) استفاده نمود.

### مراجع

1. Taylor, D.W. and Merchant, W. (1940), A Theory of Clay Consolidation Accounting for Secondary Compression. *Journal of maths. and physics*, **19**(3), 167-185.
2. Walker, L.K. and Raymond, G.P. (1968), The prediction of Consolidation Rate in a Cemented Clay, *Canadian Geotechnical Journal*, **5**(4), 192-216.
3. Walker, L.K. (1969), Secondary Settlement in Sensitive Clays, *Canadian Geotechnical Journal*, **6**(2), 219-222.
4. Ladd, C.C. (1973), Settlement Analysis for Cohesive Soils, *Res. Rpt. R71-2 No.272, Department of Civil Engineering, Mass. Institute of Technology*, Cambridge, Ma, 115p.
5. Mesri, G. and Godlewski, P.M. (1977). Time-and Stress-Compressibility Interrelationship, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, **103**, GT5, 417-430.
6. Mesri, G. Stark, T.D. Ajlouni, M.A. and Chen, C.S. (1997), Secondary Compression of Peat With or Without Surcharging, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE. **123**(5), 411-421.
7. Mesri, G. (2001), Primary Compression and Secondary Compression, *Soft Ground Construction 2001, Behavior of Soft Soils*. 122-166.
8. Mesri, G. and Vardhanabhuti, B. (2005), Secondary Compression, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE. **131**(3), 398-401.



9. Mesri, G. and Vardhanabhuti, B. (2006), Closure to Secondary Compression, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE. June, 817 – 818.
10. Terzaghi, K. Peck, B. and Mesri, G. (1995), *Soil Mechanics in Engineering Practice, Third Edition*, John Wiley & Sons, Inc. TA 710.T39 1995.
11. Mesri, G. Feng, T.W. and Benak, J.M., (1990)., Postdensification penetration resistance of clean sands, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, **116**(7), 1095 – 1115.
12. Mesri, G. (1973), Coefficient of Secondary Compression, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, **99**, SM1 ,pp. 123-137.
13. Simon, N.E. (1974), Normally Consolidated and Lightly Over-Consolidated Cohesive Materials, Review Paper: Session II, in Proceedings, *Conference on Settlement of Structures*, British Geotechnical Society, pp.500-503.
14. Nakase, A. Kamei, T. and Kusakabe O. (1988), “Constitutive Parameters Estimated by Plasticity Index”, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, **114**, GT 7, July, 844-858.
15. Mesri, G. Feng, T.W. and Shahien, M. (1999), Coefficient of consolidation by the inflection point method, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, **125**(8), 716 – 718
16. KOÇ M. (2003), Evaluation of Secondary Compression Characteristic of Clays in İzmir, M.Sc. Thesis. Dokuz Eylül University.