

بررسی قانون جریان حاکم بر حرکت آب منفذی در آزمایش تحکیم با سرعت کرنش ثابت

حجت احمدی*، حسن رحیمی، عبدالحسین هورفر، عباس سروش و پیتر فرمیر**

* نگارنده مسئول، نشانی: کرج، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، ص. پ. ۴۱۱۱، تلفن: ۲۲۴۱۱۱۹ (۰۲۶۱)،

پایان‌نگار: hojjat.a@gmail.com

** به‌ترتیب دانشجوی دکتری؛ استادا؛ و استادیار گروه آموزشی مهندسی آبیاری و آبادانی دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی دانشگاه

تهران؛ دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ و استاد انستیتو ژئوتکنیک دانشگاه اشنوتگارت

تاریخ دریافت: ۸۷/۱۲/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۸۸/۹/۲۸

چکیده

آزمایش تحکیم ارائه شده توسط ترزاقی در سال ۱۹۲۵، هنوز در اکثر آزمایشگاه‌های دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد. با اینکه این روش محدودیت و نقص‌های بسیاری دارد، هنوز اصلاحات خاصی در این روش عملی نشده است. در ۴۰ سال اخیر، روش‌های مختلفی مانند سرعت بارگذاری ثابت، سرعت گرادیان هیدرولیکی ثابت، و سرعت کرنش ثابت به عنوان جایگزین روش تحکیم معمولی پیشنهاد شده است. از روش‌های مذکور، سرعت کرنش‌های ثابت نسبت به روش‌های دیگر مزایای بیشتری دارد و از آن استقبال بیشتری شده است ولی به دلایل مختلف هنوز دستورالعمل مناسبی برای نحوه اجرای آزمایش ارائه نشده و در این زمینه تفاوت فاحشی بین توصیه‌های محققان وجود دارد. در این تحقیق با بررسی شرایط حاکم بر این روش و فرضیات لحاظ شده در آن سعی بر آن شد که دلیل اختلاف نظر محققان در نحوه اجرای آزمایش مشخص شود. نتایج اجرای آزمایش‌ها با تحکیم سنج خاص، تحت سرعت‌های مختلف کرنش در این تحقیق نشان داد که فرضیات اولیه و پایه‌ای شامل جریان داری در همه حالات صحیح نیست لذا معادلات ارائه شده بر اساس قانون داری برای تحلیل نتایج نمی‌تواند همیشه صادق باشند. همچنین آزمایش‌ها نشان داد که با توجه به سرعت اجراء آزمایش سه حالت مختلف شامل جریان‌های غیر خطی فرا و پیش خطی (غیر داری) به همراه جریان داری ممکن است در جریان آب زهکشی نمونه‌های تحت آزمایش مشاهده شود.

واژه‌های کلیدی

آزمایش تحکیم، جریان داری، جریان غیر داری، کرنش ثابت، گرادیان هیدرولیکی

مقدمه

نفوذپذیری خاک (k) و دیگری قانون حاکم بر جریان آب حفره‌ای. در معادلات ارائه شده، نفوذپذیری ثابت و قانون داری، قانون حاکم بر جریان آب حفره‌ای در طول فرایند تحکیم فرض شده است. بررسی نتایج تحلیل‌ها نشان داده است که اساس فرضیات لحاظ شده در آزمایش تحکیم بی‌اشتباه نبوده و به همین دلیل محققان برای ارائه

ارزیابی سرعت نشست سازه‌های ساخته شده یا در دست طراحی، اجرای آزمایش تحکیم را ضروری می‌سازد. آزمایش تحکیم یک بعدی، رایج‌ترین نوع آزمایش تحکیم است که در سال ۱۹۲۵ کارل ترزاقی آن را ارائه داده است. در این آزمایش، دو پارامتر نقش اساسی دارند یکی

- مدت زمان اجرای آزمایش بسیار کوتاه‌تر از روش تحکیم معمولی است. (Dubin & Mulin, 1986)
- ابزارهای به کار رفته برای اجرای این آزمایش ساده‌تر هستند. آزمایش تحکیم ادمتری ترزاقی علاوه بر ضعف‌های مربوط به تئوری آن، در اجرا نیز محدودیت‌هایی دارد که می‌توان به صورت زیر بیان کرد (Wissa *et al.*, 1971; Dubin & Mulin, 1986; Sheahan & Watters, 1997; Dobak, 2003).
- مدت زمان آزمایش بسیار طولانی است (در خاک‌های با خمیرایی بالا بیش از ۱۵ روز زمان لازم است).
- بار به صورت آبی وارد می‌شود و از این رو اثر سرعت بارگذاری لحاظ نشده است.
- به دلیل محدود بودن تعداد داده‌ها، پارامترهای مورد نیاز با دقت کمی تعیین می‌شود.
- به دلیل طولانی بودن زمان آزمایش، کنترل شرایط ثابت آزمایشگاهی مشکل است.
- تئوری تحکیم با سرعت کرنش ثابت (CRS) را نخستین بار همیلتون و کراوفورد (Hamilton & Crawford, 1959) ارائه و در فاصله‌ای کوتاه، ویسا و همکاران (Wissa *et al.*, 1971) و اسمیت و والس (Smith & Walhs, 1969) آن را به شکل چشمگیری توسعه دادند. همزمان با ارائه این روش، روش‌های دیگر مانند تحکیم با گرادیان کنترل شده (CG) و تحکیم با سرعت بارگذاری ثابت (CRL) را محققان ارائه دادند (Head, 1986). در میان روش‌های ارائه شده که همگی روش‌های سریعی در اجرای آزمایش تحکیم به حساب می‌آیند، آزمایش تحکیم با سرعت کرنش ثابت (CRS) به دلایل زیر جایگاه خاصی پیدا کرده است (Armour & Drenevich, 1986):
- روش آزمایش و تحلیل داده‌ها نسبت به روش‌های دیگر ساده‌تر است.
- تعداد داده‌های آزمایشی زیاد است و به همین دلیل پارامترهای مورد نیاز را با دقت بیشتری می‌توان تعیین کرد.
- مدت زمان اجرای آزمایش بسیار کوتاه‌تر از روش تحکیم معمولی است.
- ابزارهای به کار رفته برای اجرای این آزمایش ساده‌تر هستند.
- در روش تحکیم با سرعت کرنش ثابت (CRS) فشار آب منفذی ایجاد شده وابسته به سرعت کرنش اعمالی است و به همین دلیل باید سرعت کرنش مناسبی برای اجرای صحیح این آزمایش انتخاب شود (Sheahan & Watters, 1997; Dobak, 2003; Tolga, 2005). با این حال تحقیقات گسترده‌ای برای ارائه روش‌هایی مناسب در انتخاب سرعت کرنش صحیح اجرا شده است. روش‌های ارائه شده برای انتخاب کرنش مناسب به سه روش کلی قابل تقسیم است (Dobak, 2003):
- ۱- روش‌های مبتنی بر خصوصیات خمیری خاک
- ۲- روش‌های مبتنی بر فشار آب منفذی ایجاد شده در نمونه
- ۳- روش کرنش‌های بزرگ
- آزمایش تحکیم با سرعت کرنش ثابت (CRS) از سال ۱۹۸۲ در لیست آزمایش‌های مکانیک خاک مؤسسه استاندارد و مواد امریکا (ASTM)^۱ قرار گرفت و اساس انتخاب سرعت مناسب بر پایه تحقیقات گرومن (Gromen, 1981) حدود خمیرایی خاک عنوان شد. در نسخه‌های بعدی دستورالعمل آزمایش مذکور، معیار مبتنی بر حدود خمیرایی به کلی حذف و به جای آن سرعت مناسب، نسبت خاصی از فشار آب منفذی ایجاد شده در نمونه به تنش مؤثر متوسط انتخاب شد، به طوری که حداقل و حداکثر مجاز این نسبت در طول آزمایش باید به ترتیب ۳ و ۲۰ درصد باشد (Anon, 2002). در اغلب روش‌های پیشنهاد شده، مبنای انتخاب سرعت اجرای آزمایش نسبت فشار آب منفذی در انتهای نمونه به متوسط تنش مؤثر ایجاد شده در نمونه است. جدول ۱ نتایج چند تحقیق را نشان می‌دهد.
- روش دیگری را لی (Lee, 1981) بر اساس تئوری

1- American Society for Testing and Materials (ASTM)

بررسی قانون جریان حاکم بر حرکت آب منفذی در...

که در آن، γ = سرعت کرنش اعمالی (درصد بر دقیقه)؛
 H = ارتفاع اولیه نمونه (میلی متر)؛ و C_v = ضریب تحکیم
 (میلی متر مربع بر دقیقه) است. وی با توجه به نتایج
 آزمایش‌ها حداکثر ضریب β را ۰/۱ توصیه کرد.

کرنش‌های بزرگ پیشنهاد داد. در این روش، ضریب
 بی‌بعدی به صورت زیر تعریف شد:

$$\beta = \frac{\gamma H^2}{C_v} \quad (1)$$

جدول ۱- معیارهای انتخاب سرعت کرنش مناسب

مرجع	نوع خاک	حداکثر مقدار u_H/σ توصیه شده
(Smith & Whals, 1969)	کاتولینیت، رس مونتموریلونیت کلسیمی، رس ماسونا	۰/۵
(Wissa et al., 1971)	رس آبی بوستون	۰/۰۵
(Salfors, 1975)	رس بلکبوی	۰/۱۵-۰/۱
(Gromen et al., 1978)	رس و سیلت بستر رودخانه می‌سی‌سی‌پی	۰/۳-۰/۵

باید تخمین مناسبی از ضریب تحکیم داشت زیرا
 مقدار γ طبق رابطه ۱ وابسته به مقدار ضریب تحکیم
 است و از این رو این روش نمی‌تواند مناسب باشد. دوباک
 با جمع‌آوری آزمایش‌های محققان دیگر و مقایسه آنها
 با روش‌های مختلف انتخاب سرعت کرنش مناسب
 نشان داد که بسیاری از نتایج صحیح حاصل از
 آزمایش تحکیم با سرعت کرنش ثابت (CRS) در هیچ یک
 از مجموعه توصیه‌های ارائه شده نمی‌گنجد
 (Dobak, 2003).

قانون حاکم بر جریان آب در خاک

طبق تعریف، هرگاه در محیط متخلخل اشباع از آب
 رابطه بین سرعت جریان آب و گرادیان هیدرولیکی خطی
 باشد جریان از نوع دارسی و اگر غیر خطی باشد از نوع غیر
 دارسی خواهد بود. بررسی منابع در ارتباط با اعتبار قانون
 دارسی در خاک‌های رسی نشان می‌دهد که در
 گرادیان‌های کوچک رابطه بین گرادیان هیدرولیکی و
 سرعت جریان عبوری غیر خطی است. با این حال، مرز
 کاملاً معینی برای تفکیک جریان خطی (دارسی) و غیر

با این همه، روش‌های فوق نیز نقایصی به شرح زیر
 دارند:

روش‌های مبتنی بر خصوصیات خمیرایی خاک به
 سبب نتایج اشتباه منسوخ شدند (Anon, 2002). در
 جدول ۱ اختلاف محسوس بین توصیه‌های محققان
 مختلف را می‌توان دید. به طور مثال، ویسا و همکاران
 (Wissa et al., 1971) حداکثر مقدار قابل قبول پارامتر
 u_H/σ را ۰/۰۵ ذکر کرده است. در حالی که شیهان و
 واترز (Sheahan & Watters, 1997) با روابط ارائه شده
 توسط ویسا و همکاران (Wissa et al., 1971) در
 نسبت‌های u_H/σ بالای ۰/۷ نیز نتایج کاملاً صحیح و مشابه
 با نتایج تحکیم معمولی به دست آوردند. آلمیدا و
 همکاران (Almeida et al., 1995) روی رس‌های
 ریودوژانیرو آزمایش‌های تحکیم با سرعت کرنش ثابت
 (CRS) را بر اساس معیار لی (Lee, 1981) و لی و
 همکاران (Lee et al., 1993) انجام داد و تنها آن دسته از
 آزمایش‌هایی که β در محدوده ۰/۱۳ و ۰/۲۸ قرار گرفته
 بود، نتایج قابل قبولی داشت. در ضمن، روش لی (Lee,
 1981) ایجاب می‌کند که قبل از انتخاب سرعت مناسب،

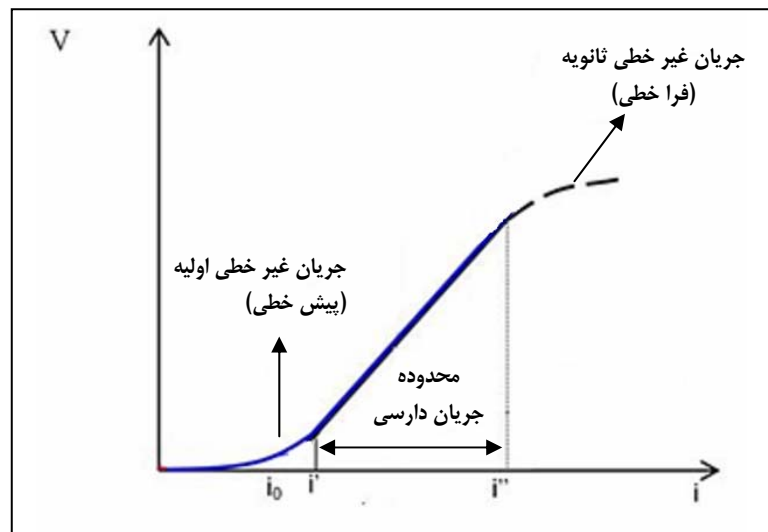
است اما در دو انتهای این محدوده، جریان غیر خطی و از نوع غیر داری است. روابط حاکم بر این محدوده‌ها به صورت زیر است (Hansbo, 2001):

$$V = k \cdot i \quad (۲)$$

$$V = k \cdot i^n \quad (۳)$$

در روابط فوق، i = گرادیان هیدرولیکی (بدون بعد)؛ k = ضریب نفوذپذیری خاک (متر بر ثانیه)؛ و V = سرعت آب در خاک (متر بر ثانیه) است. رابطه ۲ در بخش داری و رابطه ۳ در محدوده غیر داری معتبر است. در رابطه ۳، n مقداری ثابت است که در جریان غیر داری مربوط به گرادیان‌های کوچک تقریباً برابر با ۱/۵۵ و در جریان فرا خطی مقدار آن یک عدد ثابت منفی است که از نتایج آزمایش نفوذپذیری قابل استخراج است (Hansbo, 2001). فرضیات به کار رفته در آزمایش تحکیم با سرعت کرنش ثابت (CRS) مشابه فرضیات تحکیم معمول است. در سال‌های اخیر، محققان نشان دادند که فرضیات لحاظ شده در تحکیم ترزاقی فرضیاتی کاملاً صحیح نیستند به طوری که قانون حاکم بر جریان زهکشی در فرایند تحکیم معمولاً قانون جریان غیر داری است (Hansbo, 1960, 2001, 2003; Sathanathan & Indraratna, 2006). در این تحقیق، فرضیه اصلی آزمایش تحکیم با سرعت کرنش ثابت (CRS) یعنی نوع جریان حاکم بر آب حفره‌ای زهکشی نمونه مشخص شود.

خطی (غیرداری) ارائه نشده است (Mitchell & Soga, 2005). هانسبو (Hansbo, 2003) مرز جریان داری و غیر داری را حدوداً گرادیان ۱۳ اعلام کرده است. دوبین و مولین (Dubin & Mulin, 1986) ۳۵ اعلام کرده‌اند. مالینوسکا و همکاران (Malinowska *et al.*, 2007) در آزمایش‌هایی روی خاک‌های لهستان مرز جریان داری و غیر داری را گرادیان‌های نزدیک ۱۰۰ و بالاتر اعلام کردند. این محققان همچنین نشان دادند که با کاهش تخلخل خاک گرادیان مرز جریان داری و غیر داری افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شده است که در گرادیان‌های بزرگ جریان مجدداً از حالت داری به جریان غیر داری تغییر پیدا می‌کند و از آن به عنوان جریان غیر خطی ثانویه یا جریان فرا خطی^۱ نام برده می‌شود. تحقیقات در مورد مرز فوقانی جریان داری به گستردگی مرز پایینی نیست با این حال گرادیان‌های نزدیک ۹۰۰ به عنوان مرز شروع جریان غیر خطی ثانویه گزارش شده است (Mitchell & Soga, 2005). به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که در خاک‌های رسی، معمولاً در گرادیان‌های کوچک و خیلی بزرگ جریان از نوع غیر داری و در گرادیان‌های متوسط جریان داری است. شکل ۱ قانون جریان آب را در خاک‌های رسی نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل بیان شده است در محدوده گرادیان‌های i'' و i' رابطه بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان خطی و جریان از نوع داری



شکل ۱- منحنی تغییرات گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان در محیط‌های متخلخل (Lechowicz & Szymański, 1984)

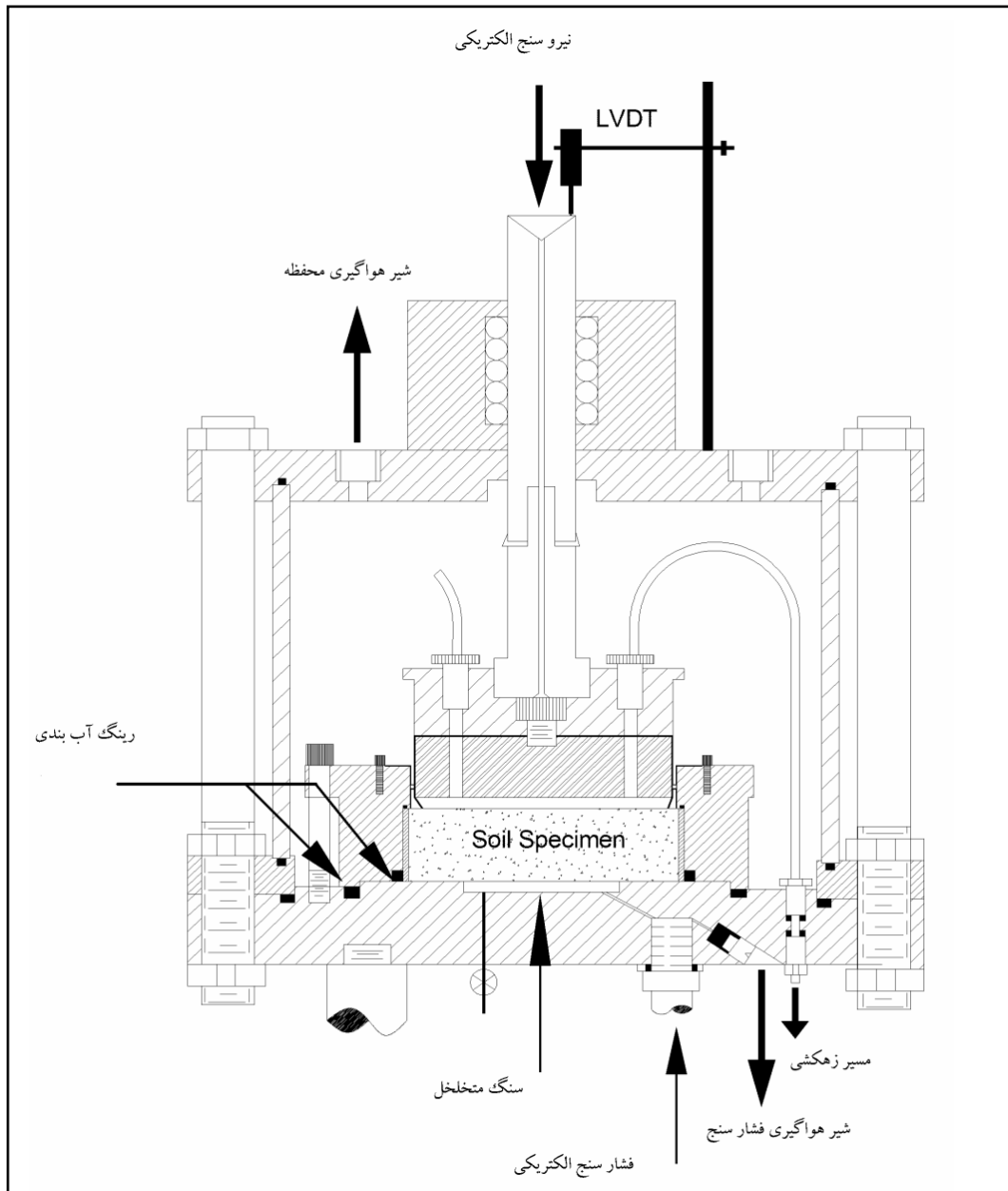
مواد و روش‌ها

عبور داده و به آن آب اضافه شد. با به هم زدن سعی شد که مخلوط یکنواختی حاصل شود. پس از حصول از یکنواخت بودن مخلوط آب و خاک، مخلوط مورد نظر در ظرف تحکیم اولیه با مقطع مدور به قطر و ارتفاع به ترتیب ۷۰ و ۲۵ سانتی‌متر ریخته شد. نمونه اولیه خاک تحت وزن خود تحکیم پیدا کرد. در این مدت نمونه از هر دو سمت زهکشی می‌شد. پس از گذشت یک ماه از آماده‌سازی نمونه، با استفاده از رینگ نمونه‌گیر مخصوص دستگاه، نمونه اصلی آزمایش تهیه شد. ضخامت نمونه اولیه در این شرایط ۶۰ میلی‌متر بود که نمونه اصلی به ارتفاع ۲۰ میلی‌متر از بخش میانی تهیه و بلافاصله پس از آماده‌سازی در دستگاه تحکیم قرار داده شد. از آنجا که نمونه در طول تحکیم اولیه به مدت طولانی به صورت غرقاب قرار داشت و لذا در حالت اشباع بوده است و در اجرای آزمایش‌ها از پس فشار (Back Pressure) استفاده نشد. مشخصات خاک مورد استفاده در تحقیق حاضر در جدول ۲ ارائه شده است. جدول ۳ آزمایش‌های اجراء شده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

در آزمایش‌های تحکیم با سرعت کرنش ثابت (CRS) از دستگاه تحکیم کنترل کرنش ساخت شرکت وایکهام فرانس موجود در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشکده آب و خاک دانشگاه تهران استفاده شد (شکل ۲). در این آزمایش بار وارد بر نمونه به کمک دستگاه فشاری به صورت مکانیکی اعمال و مقدار نیروی وارد شده به نمونه توسط لودسل (Load Cell) ثبت شد. طی آزمایش، نمونه از قسمت فوقانی زهکشی شده و در انتهای پایینی نمونه فشار آب منفذی به کمک سنگ متخلخل تعبیه شده در پایه دستگاه تحکیم توسط فشارسنج الکتریکی پایش می‌شد. سرعت کرنش ثابت توسط دستگاه فشاری اتوماتیک به نمونه اعمال و تغییرات ارتفاع نمونه با خط‌کش الکتریکی (LVDT) کنترل شد. داده‌های مربوط به هر یک از سنجنده‌ها، همزمان به کمک دستگاه دیتالاگر با فاصله زمانی دو دقیقه ثبت و جهت آنالیز ذخیره شد. قطر و ارتفاع نمونه به ترتیب ۱۰۰ و ۲۰ میلی‌متر بود؛ نمونه به روش دوغاب تهیه شد. به این ترتیب که ابتدا به مقدار لازم نمونه خاک از الک نمرة ۴۰

جدول ۲- مشخصات خاک استفاده شده در تحقیق حاضر

منطقه تهیه شده	LL (درصد)	PL (درصد)	PI (درصد)	G_s	ماسه (درصد)	سیلت (درصد)	رس (درصد)	نوع خاک
مغان	۳۵/۵	۱۶/۵	۱۹	۲/۶۷	۶	۶۴	۳۰	رس با خمیرایی کم



شکل ۲- شمای دستگاه آزمایش تحکیم با سرعت کرنش ثابت (CRS) مورد استفاده در تحقیق حاضر

جدول ۳- خلاصه آزمایش‌های تحکیم با سرعت کرنش ثابت (CRS) اجراء شده در تحقیق حاضر

شماره نمونه	کرنش (درصد در دقیقه)	ارتفاع (میلی‌متر)		رطوبت (درصد)		تخلخل		حداکثر فشار آب منفذی (کیلوپاسکال)
		اولیه	نهایی	اولیه	نهایی	اولیه	نهایی	
1b1	۰/۰۲۵	۱۹/۹۳	۱۲/۴۱	۷۴/۲	۲۸/۴	۱/۷۸	۰/۷۳	۴/۹
1b2		۱۹/۹۵	۱۲/۳۲	۷۲/۳	۲۶/۶	۱/۷۶	۰/۷۰	۸/۵
1b3		۱۹/۹۱	۱۳/۷۶	۷۳/۳	۳۵/۲	۱/۷۸	۰/۹۲	۷/۱
2b1	۰/۰۵	۱۹/۸۲	۱۱/۷۷	۷۰/۲	۲۵/۱	۱/۸۰	۰/۶۶	۹۰
2b2		۱۹/۸۵	۱۲/۴۵	۶۵/۴	۲۸/۱	۱/۷۹	۰/۷۵	۱۰۵
2b3		۱۹/۸۷	۱۲/۶۹	۶۷/۴	۲۹/۳	۱/۷۷	۰/۷۷	۱۰۱
3b1	۰/۲۵	۱۹/۵۷	۹/۷۸	۶۸/۱	۱۶/۲	۱/۷۶	۰/۳۸	۲۴۵
3b2		۱۹/۹۵	۱۲/۴۲	۶۲/۵	۲۹/۳	۱/۷۳	۰/۷۰	۲۳۷
3b3		۱۹/۶۸	۱۰/۰۱	۶۴/۱	۱۴/۷	۱/۷۵	۰/۴۰	۳۸۲
4b1	۰/۳۷۵	۱۹/۸	۹/۷۳	۶۸/۱	۱۴/۲	۱/۷۷	۰/۳۶	۶۲۳
4b2		۱۹/۳۸	۱۰/۰۱	۷۱/۴	۱۵/۶	۱/۶۹	۰/۳۹	۵۷۱
4b3		۱۹/۶۷	۹/۹۷	۶۹/۳	۱۵/۸	۱/۷۳	۰/۳۸	۵۹۲

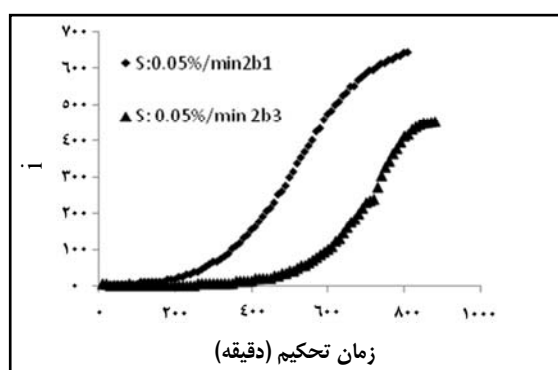
نتایج و بحث

هیدرولیکی از تقسیم اختلاف فشار آب در دو انتهای نمونه بر طول نمونه حاصل شده است (در بخش بالایی نمونه، فشار نسبی صفر بوده در کف نمونه فشار توسط ترانسدیوسر (Transducer) ثبت شده است). همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، قانون دارسی در محدوده (i') و (i'') معتبر است. با بررسی گرادیان‌های هیدرولیکی به وجود آمده در آزمایش‌ها و مقایسه آنها با نتایج تحقیقات محققان دیگر در زمینه جریان آب در رس‌ها و مرزهای ارائه شده برای ابتدا و انتهای جریان دارسی به وضوح می‌توان مشاهده کرد که در بخش عمده‌ای از آزمایش‌ها جریان حاکم غیر دارسی است. این موضوع برای دو حالت سرعت کرنش آهسته و سرعت کرنش تند محدوده بسیار وسیع‌تری را شامل می‌شود به طوری که اگر گرادیان ۵۰ برای مرز پایین (i') (Hansbo, 1960, 2001, 2003) و گرادیان ۹۰۰ برای مرز بالا (i'') (Mitchell & Soga, 2005) فرض شود برای سرعت بارگذاری ۰/۰۲۵ درصد در دقیقه تقریباً تمام

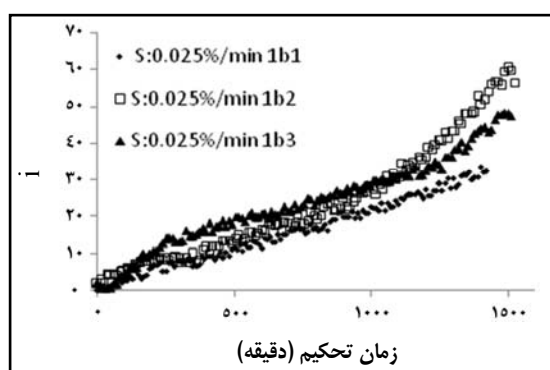
به سبب نحوه اجرای آزمایش تحکیم با سرعت کرنش ثابت (CRS)، امکان مقایسه گرادیان‌های هیدرولیکی به وجود آمده و سرعت جریان در نسبت تخلخل ثابت مقدور نیست. زیرا در هر لحظه نمونه فشرده شدن و به تبع آن تخلخل خاک و فشار آب منفذی تغییر می‌کند. درحالی‌که در نمودار گرادیان هیدرولیکی باید تخلخل ثابت باشد یا به عبارتی نفوذپذیری خاک تغییر نکند. برای رسیدن به این هدف باید آزمایش تحکیم متوقف شود و آزمایش نفوذپذیری اجرا شود که با توجه به تعریف آزمایش تحکیم با سرعت کرنش ثابت (CRS) این موضوع امکان‌پذیر نیست از این رو نمی‌توان با روش معمولی قانون حاکم بر جریان آب حفره‌ای را مشخص کرد. با این حال با بررسی روند تغییرات گرادیان هیدرولیکی در طول آزمایش می‌توان به نتایجی با ارزش دست یافت. شکل‌های ۳ تا ۶، تغییرات گرادیان هیدرولیکی با زمان را در نمونه‌های تحت بررسی نشان می‌دهند. در این نمودارها، گرادیان

متفاوت با تحکیم معمولی به دست می‌آوردند و به همین دلیل محدوده‌ای خاص را برای نسبت فشار آب منفذی به تنش مؤثر متوسط تعریف می‌کردند (Wissa et al., 1971; Salfors, 1975; Anon, 2002). با این حال، حداکثر یا حداقل مقدار این نسبت با توجه به نوع خاک و تخلخل اولیه و سرعت بارگذاری در زمان‌های مختلف از بارگذاری ممکن است رخ دهد.

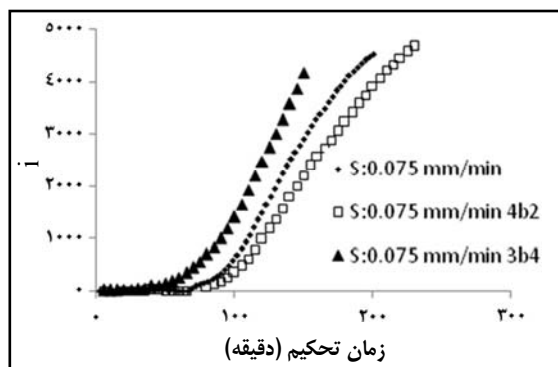
محدوده آزمایش در شرایط غیر داری اتفاق افتاده است. برای دو سرعت بارگذاری ۰/۰۵ درصد در دقیقه و ۰/۳۷۵ درصد در دقیقه به ترتیب تقریباً در ۶۱ و ۷۶ درصد از زمان آزمایش جریان حاکم بر آزمایش غیر داری است. در واقع در بخش‌های میانی آزمایش، جریان داری اتفاق می‌افتد و بر این اساس محققان همیشه در فشارهای بالای ثبت شده و همچنین در فشارهای پایین، نتایج



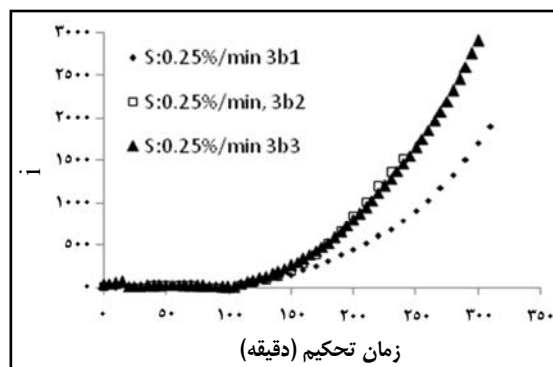
شکل ۴- تغییرات گرادیان هیدرولیکی و زمان تحکیم برای سرعت کرنش ۰/۰۵ درصد در دقیقه



شکل ۳- تغییرات گرادیان هیدرولیکی و زمان تحکیم برای سرعت کرنش ۰/۰۲۵ درصد در دقیقه



شکل ۶- تغییرات گرادیان هیدرولیکی و زمان تحکیم برای سرعت کرنش ۰/۳۷۵ درصد در دقیقه



شکل ۵- تغییرات گرادیان هیدرولیکی و زمان تحکیم برای سرعت کرنش ۰/۲۵ درصد در دقیقه

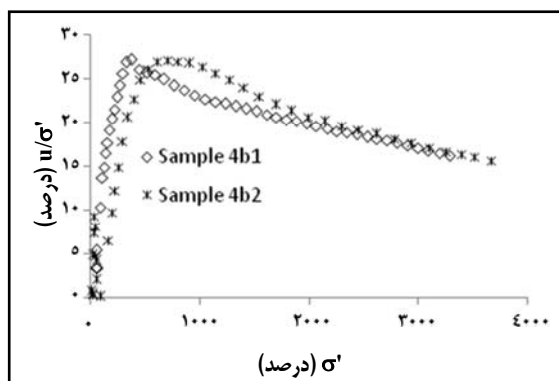
$$\sigma'_{ave} = P - \frac{2}{3}u \quad (4)$$

که در آن، P = تنش کل (کیلوپاسکال)؛ و u = فشار آب منفذی (کیلوپاسکال) ثبت شده است. رابطه فوق بر اساس فرض

شکل‌های ۷ و ۸ تغییرات نسبت فشار آب منفذی به تنش مؤثر متوسط را در دو نمونه نشان می‌دهد که در دو سرعت کرنش مختلف تحت بررسی قرار گرفته‌اند. تنش مؤثر متوسط از رابطه زیر محاسبه شده است:

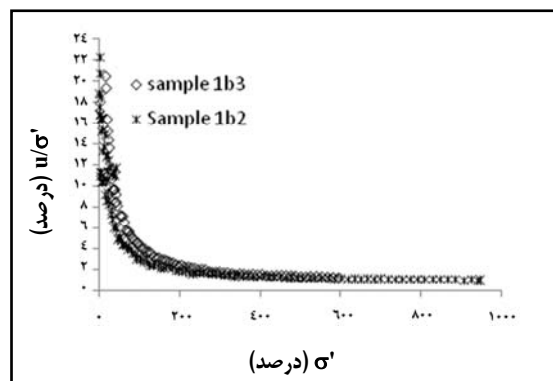
بررسی قانون جریان حاکم بر حرکت آب منفذی در...

ایجاد شده به تنش مؤثر را در سرعت کرنش تند آزمایش نشان می‌دهد. منحنی شکل ۸ حالت معمول منحنی است و در اکثر منابع می‌توان چنین منحنی‌هایی را دید (Smith & Wahls, 1969; Gromen, 1981).



شکل ۸- منحنی تغییرات نسبت u/σ' و σ' در سرعت کرنش 0.375 درصد در دقیقه

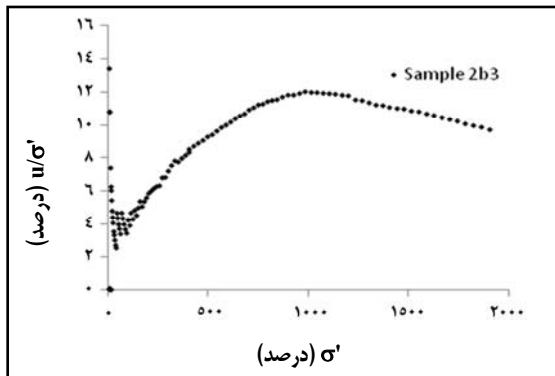
توزیع سهمی فشار آب منفذی در نمونه حاصل شده و توسط شیهان و همکاران تأیید شده است (Sheahan & Watters, 1997). شکل ۷ آزمایش با سرعت کرنش آهسته و شکل ۸ منحنی تغییرات تنش مؤثر متوسط و نسبت فشار آب منفذی



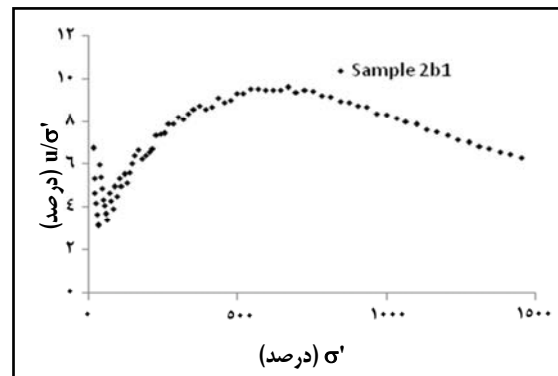
شکل ۷- منحنی تغییرات نسبت u/σ' و σ' در سرعت کرنش 0.25 دقیقه در درصد

بحث در نمونه‌هایی که در شرایط بینا بین قرار داشتند نشان می‌دهد که هر دو روند در شکل‌های ۷ و ۸ در نمونه‌هایی مشاهده شده است که در سرعت‌های متوسط بررسی شده‌اند. شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان می‌دهند که در شروع آزمایش، گرادیان هیدرولیکی پایین است و بخش ابتدایی منحنی حالت نزولی دارد که پس از یک نقطه مینیمم دوباره روند صعودی پیدا کرده است و سرانجام بعد از مدتی بار دیگر شرایط جریان تغییر یافته و بار دیگر شرایط نزولی در نمونه مشاهده می‌شود. نتیجه آن است که شرایط ایجاد شده در ابتدا و انتهای آزمایش در مقایسه با شرایط میانی متفاوت است. و این همان شرایطی است که در منحنی تغییرات سرعت جریان و گرادیان هیدرولیکی می‌توان مشاهده کرد (شکل ۱).

با این حال، منحنی شکل ۷ حالتی است که کمتر به آن توجه شده یا در منابع اشاره چندانی به چنین رفتاری نشده است. با بررسی‌های یون و چونگ (Youn & Chung, 2005)، در نمونه‌های دست خورده از خاک کره منحنی‌های مشابهی را ثبت کرده‌اند و دلیل متفاوت بودن روند تغییرات تنش مؤثر با نسبت فشار آب منفذی به تنش مؤثر را به زهکشی نمونه و ساختمان خاک نسبت داده‌اند. ولی در این تحقیق آنچه از روی منحنی‌های شکل ۷ و ۸ می‌توان به وضوح فهمید این است که شرایط حاکم در دو سرعت متفاوت اجرا شده روی نمونه‌های یکسان تفاوت زیادی دارد. در نمونه 1b2 و 1b3 گرادیان هیدرولیکی پایین و در نمونه‌های 4b1 و 4b2 گرادیان بالا وجود داشته است که می‌تواند دلیل این موضوع باشد. بررسی روند تغییرات منحنی مورد



شکل ۱۰- منحنی تغییرات نسبت u/σ' و σ' در سرعت کرنش 0.05 درصد در دقیقه نمونه 2b3



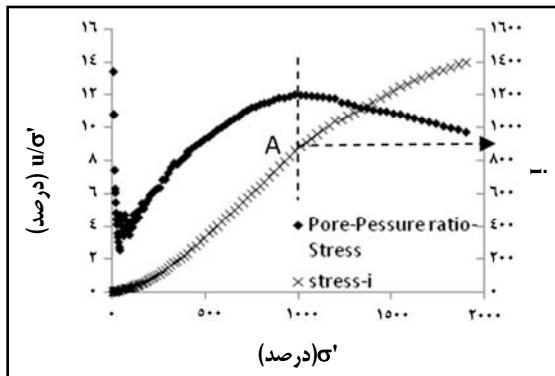
شکل ۹- منحنی تغییرات نسبت u/σ' و σ' در سرعت کرنش 0.05 درصد در دقیقه نمونه 2b1

مشاهده می‌شود، نقطه حد اقل یا حداکثر منحنی مربوط به فشار آب منفذی نسبی- تنش مؤثر، محل تغییر شیب منحنی تغییرات گرادیان هیدرولیکی و تنش مؤثر است، یعنی در واقع شکل این منحنی بسیار مشابه با روند تغییرات منحنی گرادیان- سرعت جریان است.

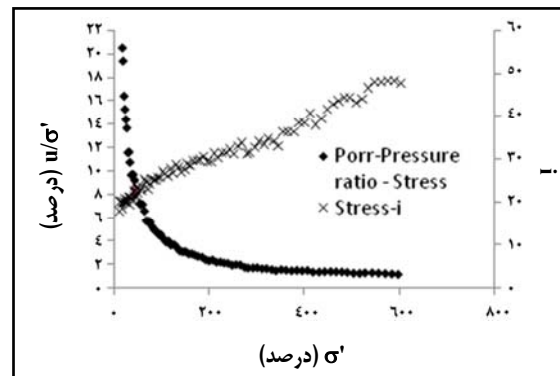
با بررسی شکل‌های ۱۱، ۱۲، ۱۳، و ۱۴ می‌توان گفت که در سرعت‌های متوسط کرنش، شرایط خطی گرادیان هیدرولیکی گسترده‌تری دارد در حالی که در سرعت‌های آهسته شرایط غیر خطی بر مسئله حاکم است. بدین ترتیب به منظور حصول نتایج صحیح از این آزمایش لازم است که شرایط مختلف حاکم بر جریان آب منفذی زهکشی مد نظر قرار گیرد. همچنین، گرادیان هیدرولیکی در محل تغییر شیب منحنی گرادیان هیدرولیکی- تنش مؤثر مربوط به نقاط حداکثر منحنی تنش مؤثر - فشار آب منفذی نسبی (نقطه A) عددی بسیار نزدیک به عدد ۹۰۰ را نشان می‌دهد و در واقع این مقدار به عنوان مرز بالای تغییر جریان از داری به غیر داری (جریان فراخطی) ذکر شده است (Mitchell & Soga, 2005).

با توجه به شکل‌های ۷ تا ۱۰ هرچند به دلیل گذر سریع شرایط غیرداری اولیه و پایین بودن فشار آب منفذی و حساسیت ابزارهای اندازه‌گیری در ابتدای آزمایش‌ها نوسانات زیادی در فشارهای ثبت شده مشاهده شده است با این حال روند تغییرات آن به روشنی تفاوت در رفتار زهکشی خاک را نشان می‌دهد. محققان همیشه در تعیین ضریب تحکیم مربوط به این بخش خط‌هایی بزرگ داشته‌اند و دلیل اشتباهات را به ثبت نشدن صحیح فشار آب منفذی نسبت داده‌اند. حتی ویسا و همکاران (Wissa *et al.*, 1971) از این بخش به عنوان بخش انتقالی نام برده و سعی کرده است. برای تعیین ضریب تحکیم مربوط به این بخش روشی متفاوت ارائه کند. با این حال کمتر مورد توجه محققان دیگر قرار گرفته است. برای بررسی بهتر شرایط حاکم بر نمونه‌های تحت آزمایش، روند تغییرات تنش مؤثر و گرادیان هیدرولیکی به همراه فشار آب منفذی نسبی مورد بررسی قرار گرفته است. شکل‌های ۱۱، ۱۲، ۱۳، و ۱۴ منحنی‌های مربوط به برخی از آزمایش‌ها را نشان می‌دهند. همان‌طوری که

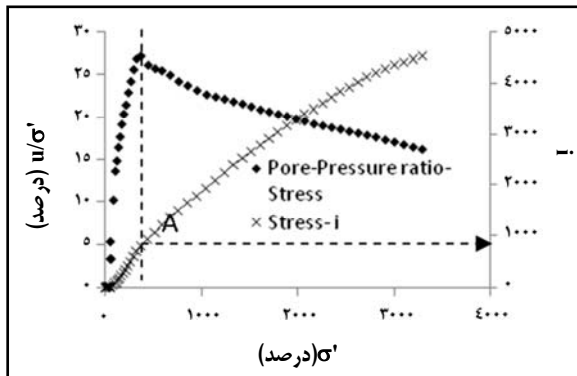
بررسی قانون جریان حاکم بر حرکت آب منفذی در...



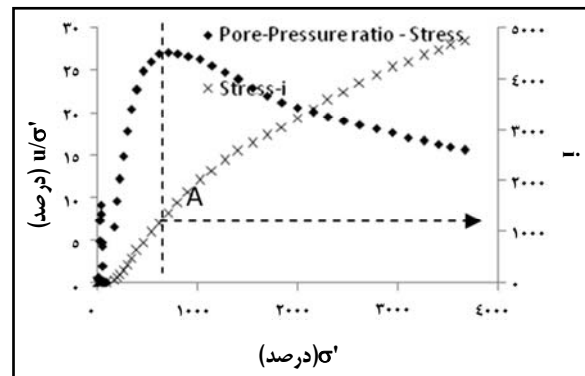
شکل ۱۲- مقایسه تغییرات فشار آب منفذی نسبی و گرادیان هیدرولیکی نسبت به تنش مؤثر متوسط در نمونه 2b3



شکل ۱۱- مقایسه تغییرات فشار آب منفذی نسبی و گرادیان هیدرولیکی نسبت به تنش مؤثر متوسط در نمونه 1b2



شکل ۱۴- مقایسه تغییرات فشار آب منفذی نسبی و گرادیان هیدرولیکی نسبت به تنش مؤثر متوسط در نمونه 4b1



شکل ۱۳- مقایسه تغییرات فشار آب منفذی نسبی و گرادیان هیدرولیکی نسبت به تنش مؤثر متوسط در نمونه 4b2

نتیجه‌گیری

با توجه به یافته‌های این تحقیق نتایج کلی زیر قابل استخراج است:

- گرادیان هیدرولیکی به وجود آمده در حین اجرای آزمایش تحکیم با کرنش کنترل شده، کاملاً وابسته به سرعت کرنش اعمالی است و در طول فرایند تحکیم همیشه در حال افزایش است.

بدین ترتیب، با اعمال معادلات کلی جریان‌های غیر داری و داری در معادله تحکیم می‌توان ضریب تحکیم را بدون اعمال هر گونه محدودیت در انتخاب سرعت کرنش از طریق آزمایش CRS به دست آورد. بدین منظور کافی است در توسعه و استخراج معادله تحکیم، رابطه ۳ را در معادله پیوستگی به عنوان قانون جریان اعمال و معادله‌ای جدید برای تحکیم ارائه کرد. بیان کامل شکل این معادله خارج از بحث این مقاله است.

قرار گرفته است و از این‌رو محققان همیشه سعی کرده‌اند در انتخاب مقدار فشار آب منفذی ایجاد شده مرز بالا و پایینی ارائه دهند. این مطلب در مورد نتایج کارهای آلمیدا و همکاران (Almeida *et al.*, 1995) که بر اساس تئوری کرنش‌های بزرگ به دست آمده نیز مشاهده می‌شود.

• به منظور ارائه یک روش کلی و اساسی برای اجرای آزمایش تحکیم با سرعت کرنش ثابت (CRS)، لازم است شرایط جریان غیر داری و داری در معادله آزمایش تحکیم با سرعت کرنش ثابت (CRS) گنجانده شود. در این صورت می‌توان این آزمایش را بدون محدودیت به کار گرفت.

• گرادیان هیدرولیکی ایجاد شده با توجه به سرعت کرنش اعمالی، ممکن است یک یا سه حالت از نوع جریان آب در محیط‌های متخلخل ایجاد کند که شامل جریان داری، جریان‌های غیرداری زیرخطی و جریان غیر داری فراخطی است.

• دلیل عمده اختلاف نظر محققان در ارائه یک روش مناسب در انتخاب سرعت کرنش برای اجرای آزمایش‌های تحکیم با سرعت کرنش ثابت (CRS) لحاظ نشدن انواع حالات جریان در معادله و تئوری این روش است. به طوری که تنها حالت لحاظ شده جریان داری است. این جریان بین دو حالت جریان غیر داری فرا خطی و جریان داری زیر خطی

مراجع

- Almeida, M. S. S., Martins, I. S. and Carvalho, S. R. L. 1995. Constant rate of strain consolidation of singapore marine clay. *Geotechnique*. 45(2): 333-336.
- Anon. 2002. Annual Book of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials (ASTM). Soil and Rock. D4186-89, 500-505.
- Armour, D. W. Jr. and Drnevich, V. P. 1986. Improved Techniques for the Constant-Rate-of-Strain Consolidation test. *Consolidation of Soils: Testing and Evaluation*. ASTM SPT 892. Yong, R. N. and Townsend, F. C. (Eds.) American Society for Testing and Materials. 170-183.
- Dobak, P. 2003. Loading Velocity in consolidation analysis. *Czasopismo: Geological Quarterly Selected full texts rok*. 47(1): 13-20.
- Dubin, B. and Mulin, G. 1986. Influence of a Critical Gradient on the Consolidation of Clays. *Consolidation of Soils: Testing and Evaluation*. ASTM SPT 892. Yong, R. N. and Townsend, F. C. (Eds.) American Society for Testing and Materials. 354-377.
- Gromen, C. T. 1981. Strain Rate Selection in the Constant-Rate-of-Strain Consolidation Test. Research Report UKTRP-81-1. Kentucky Transportation Research Program. University of Kentucky. Lexington.
- Gromen, C. T., Hopkins, T. C., Deen, R. C. and Drenvich, V. P. 1978 Constant rate of strain and controlled gradient consolidation testing geotech. *Testing J*. 1(1): 3-15.
- Hamilton, J. J. and Crawford, C. B. 1959. Improved determination preconsolidation pressure of a sensitive clay papers on soil. *ASTM Spec. Tech. Publ*. 254-270.

- Hansbo, S. 1960. Consolidation of Clay, with Special Reference to Influence of Vertical Sand Drains. A study made in connection with full scale investigations at Skå-Edeby. Ph.D. Thesis. Swedish Geotechnical Institute.
- Hansbo, S. 2001. Consolidation equation valid for both darcian and non-darcian flow. *Geotechnique*. 51(1): 51-54.
- Hansbo, S. 2003. Deviation from Darcy's law observed in one-dimensional consolidation. *Geotechnique*. 53 (1): 601-605.
- Head, K. H. 1986. *Manual of Soil Laboratory Testing*. Pentech Press. London.
- Lechowicz, Z. and Szymański, A. 1984. Prediction of consolidation of organic soil. *Annual of Warsaw Agricultural University*. 20, 55-59.
- Lee, K. 1981. Consolidation with constant rate of deformation. *Geotechnique*. 35(3): 241-253.
- Lee, K., Choa, V., Lee, S. H. and Quek, S. H. 1993. Constant rate of strain consolidation of singapore marine clay. *Geotechnique*. 43(3): 471-488.
- Malinowska, E., Sas, M. and Szymanski, A. 2007. Nonlinear water flow characteristics describing organic soil consolidation. *Electronic J. Polish Agric. Uni*. 10(4).
- Mitchell, K. J. and Soga, K. 2005. *Fundamental of Soil Behavior*. 3rd Ed. John Wiley and Sons.
- Sallfors, G. 1975. *Perconsolidation Pressure of Soft highly Plastic Clays*. Chalmers Univ. Tech. Goteborg.
- Sathanathan, I. and Indraratna, B. 2006. Plane-Strain lateral consolidation with nondarcian flows. *Canadian Geotech. J*. 43, 119-133.
- Sheahan, T. C. and Watters, P. J. 1997. Experimental verification of CRS consolidation theory. *J. Geotech. Geoenviron. Eng*. 123(5): 430-437.
- Smith, R. E. and Wahls, H. E. 1969. Consolidation under constant rate of strain. *J. Soil Mec. Fdns. Div.* 95(SM2): 519-539.
- Tolga, A. O. 2005. *Estimation of Consolidation and Drainage Properties for Lake Bonneville Clays*. Ph.D. Thesis. University of Utah. USA.
- Wissa, A. E. Z., Christian, J. T., Davis, E. H. and Heiberg, S. 1971. Consolidation testing at constant rate of strain. *J. Soil Mec. Fdns Div.* 97(SM10): 1393-1413.
- Youn, C. Y. and Chung, C. K. 2005. Consolidation test at constant rate of strain for radial drainage. *Geotech. Testing J*. 28(1): 234-345.



Investigation of Flow Regime in Pore Water Flow through Soil in CRS Consolidation Test

H. Ahmadi*, H. Rahimi, A. H. Hourfar, A. Soroush and P. Vermeer

* Corresponding Author: Ph.D. student. Tehran University, P. O. Box: 4111, Tehran, Iran. E-mail: hojjat.a@gmail.com

The consolidation test method proposed by Terzaghi and used in most soil mechanic laboratories has limitations and weaknesses. To get correct results, improvement and modification of the test method is essential. Several experimental methods, such as constant loading rate, gradient and constant rate of strain (CRS) have been used over the past 40 years. Of these methods, CRS is more advantageous and is more popular, but there is no unique criterion for when to use the test, although many researchers have proposed different methods. Considerable differences exist between standards in the literature. The present study investigates the causes of differences between standards by investigating basic assumptions about flow regime caused by pore water loading during consolidation. CRS consolidation tests were carried out using an MIT consolidometer under different strain rates. The results indicate that a Darcy flow regime is not valid throughout the CRS test, thus, a consolidation equation based on the Darcy flow regime cannot model the test correctly. Also the present research showed three different flow regimes during the test for strain rate, including prelinear (non-Darcy), linear (Darcy low) and postlinear (non-Darcy).

Key Words: Consolidation Test, Constant Strain, Darcy Low, Hydraulic Gradient, Non-Darcy Flow