

## بررسی شرایط هیدرولیکی در آزمایش تحکیم با نرخ کرنش ثابت و روش تعیین نوع جریان آب منفذی

حجت احمدی<sup>۱\*</sup> - حسن رحیمی<sup>۲</sup> - عباس سروش<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۸۹/۱/۳۱

تاریخ پذیرش: ۹۰/۴/۸

### چکیده

در این تحقیق آزمایش تحکیم با نرخ کرنش ثابت در شرایط غیرداریسی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور معادله جدیدی برای تحکیم با نرخ کرنش ثابت در شرایط رژیم جریان غیرداریسی ارائه گردید. همچنین جهت اعتبارسنجی معادله ارائه شده، آزمایش‌های تحکیم با کرنش ثابت تحت نرخ‌های مختلف کرنش بر روی انواع مختلف نمونه‌های خاک انجام پذیرفت. نتایج آزمایش‌های صورت گرفته و مقایسه آنها با معادله ارائه شده نشان داد که جریان زهکشی در بخش ابتدایی از آزمایش غیرداریسی بوده که معمولاً در انتهای آزمایش به حالت داریسی تبدیل می‌گردد. بر اساس نتایج حاصله آستانه تبدیل جریان غیرداریسی به داریسی وابسته به تغییرات فشار آب منفذی نسبت به تنش کل وارد بر نمونه بوده و می‌توان آنرا از روی تغییرات شیب منحنی نسبت فشار آب منفذی به تنش کل تشخیص داد.

**واژه‌های کلیدی:** تحکیم، جریان غیرداریسی، فشار آب منفذی، کرنش ثابت

### مقدمه

می‌باشد (۳ و ۵). سالفورز با انجام آزمایش‌های مختلف با این روش بر روی رس‌های سوئد، این روش را جایگزین روش تحکیم اودومتری پیشنهاد کرد (۱۳). در ارائه روش و روابط حاکم بر آزمایش تحکیم CRS از یک سری فرضیات ساده کننده مشابه با فرضیات ترزاقی استفاده شده است (۲).

لی و همکاران (۱۰) بر مبنای تئوری مرزهای متحرک و کرنش‌های بزرگ روش دیگری برای انتخاب سرعت مناسب و همچنین روابطی جهت تعیین ضریب تحکیم در آزمایش تحکیم با کرنش ثابت ارائه کرد. آلمیدا و همکاران (۱) با انجام آزمایش‌هایی بر روی رس‌های ریودوژانیرو نشان دادند که روش لی معیار مناسبی جهت انتخاب سرعت مناسب نیست. در پیشرفت نشست ناشی از تحکیم مهم‌ترین عامل، سرعت استهلاک فشار آب منفذی است که این موضوع وابسته به هیدرولیک جریان آب منفذی می‌باشد (۴). با این حال عوامل مختلفی ممکن است باعث به‌وجود آمدن جریان غیرداریسی در پدیده تحکیم گردد که این پدیده موجب بسته شدن مسیر جریان در خاک یا باز شدن مسیرهای جدید در خاک شده و این یکی از مهم‌ترین دلایل ایجاد جریان غیرخطی یا غیرداریسی است (۹) و (۱۱). در جریان غیرداریسی به دلیل آشفتگی جریان، مقاومت جریان افزایش می‌یابد و این موضوع باعث افزایش زمان تحکیم در حالت

### تحکیم با کرنش ثابت

تئوری آزمایش تحکیم CRS<sup>۴</sup> برای اولین بار توسط همیلتون و کراوفورد در جهت اصلاح کاستی‌ها و معایب آزمایش تحکیم معمولی ارائه شد. این محققان آزمایش‌هایی با نرخ کرنش ۰/۱۵٪ تا ۰/۰۵٪ در دقیقه انجام دادند و با این که سرعت بسیار کمی برای آزمایش در نظر گرفته بودند فشار آب منفذی اضافی در طول آزمایش مشاهده کردند هر چند که ایشان آن را ثبت نکردند (۶). تئوری و روش انجام آزمایش تحکیم CRS با کارهای اسمیت و والاس و همچنین تحقیقات ویسا و همکاران به‌صورت جامع‌تر با معیارهای نسبتاً بهتری برای انجام آزمایش ارائه شد (۱۳ و ۱۴). در مقایسه با روش تحکیم معمولی، روش تحکیم CRS از مزایای بسیاری برخوردار است که سریع بودن این روش یکی از مهم‌ترین این مزایا

۱-استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه  
(Email: hojjat.a@gmail.com) \* - نویسنده مسئول:

۲-استاد گروه آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران  
۳-دانشیار دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

شرایط مرزی برای معادله فوق بر اساس فیزیک حاکم بر مساله تحکیم با کرنش ثابت به صورت زیر است:

$$u(0, t) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z}(H, t) = 0 \quad (9)$$

با دو بار انتگرال گیری از معادله ۷ و اعمال شرایط مرزی ۸ و ۹، حل تحلیلی معادله ۷ به شکل زیر خواهد بود:

$$u(z, t) = \gamma_w \left( \frac{u}{n+1} \right) \left( \frac{C}{k} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{H^{\frac{n+1}{n}} - (H-z)^{\frac{n+1}{n}}}{(1 + e_0 - Ct)^{\frac{1}{n}}} \quad (10)$$

فشار آب منفذی زیر نمونه با قرار دادن مقدار  $z$  برابر با  $H$  از رابطه زیر به دست می آید:

$$u_b = u(H, t) = \gamma_w \left( \frac{n}{n+1} \right) \left( \frac{C}{k} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{H^{\frac{n+1}{n}}}{(1 + e_0 - Ct)^{\frac{1}{n}}} \quad (11)$$

در روابط ارائه شده فوق پارامتر  $n$  توان گرادیان هیدرولیکی در رابطه جریان غیرداری است که با توجه به نوع خاک و شرایط حاکم ممکن است این تغییر کند. با این حال مقدار این ضریب قبلاً توسط هانسبو برای جریان غیرداری در خاکهای رسی حدود ۱/۵۵ ذکر شده است (۷ و ۸). در شرایط  $n=1$  تمام معادلات فوق به شرایط جریان داری تبدیل می گردند.

### کارهای آزمایشگاهی

در تحقیق حاضر آزمایش های متعددی با استفاده از دستگاه های تحکیم CRS بر روی دو نوع خاک تهیه شده از ایران و سوئد در شرایط دست نخورده و دست نخورده در دانشگاه تهران و دانشگاه صنعتی چالمرز سوئد انجام گردید. نمونه های خاک ایران به روش دوغاب تهیه و نمونه های خاک رس دست نخورده کشور سوئد از قسمت های شمال غربی شهر گوتنبرگ تهیه شدند. جدول ۱، خصوصیات فیزیکی و خمیری نمونه های تحت بررسی را نشان می دهد. شکل های ۱ و ۲ به ترتیب شمای دستگاه تحکیم با کرنش ثابت مورد استفاده شده در ایران و سوئد را نشان می دهند. در هر دو وسیله، نمونه از بخش فوقانی زهکشی شده و طی آزمایش شیرهای انتهای نمونه بسته است و اجازه زهکشی از این بخش به نمونه داده نمی شود. در این قسمت با قرار دادن سنگ متخلخل و یک فشار سنج الکترونیکی از نوع دیافراگمی مقدار فشار آب منفذی ایجاد شده ثبت گردید. همچنین تغییر شکل ایجاد شده در نمونه و بار وارده بر آن به ترتیب توسط کرنش سنج (LVDT) و نیروسنج (Load Cell) اندازه گیری و داده های حاصل به کمک دستگاه ثبت داده ذخیره شد.

کنترل تنش (تحکیم معمولی یا اودومتري) می گردد (۹). بررسی دقیق آزمایش تحکیم معمولی نشان داده است که در مراحل اولیه این آزمایش نوع جریان آب منفذی از قانون داری تبعیت نمی کند (۷، ۸ و ۹). با این وجود در پدیده تحکیم در شرایط کرنش ثابت و تنش کل ثابت، قانون حاکم بر جریان قانون داری فرض شده است (۲). در این تحقیق با بررسی جریان داری و غیرداری در پدیده تحکیم، معادله جدیدی برای تحکیم CRS ارائه شده و به کمک آن و با انجام آزمایش های مختلف شرایط جریان زهکشی در تحکیم CRS بررسی شده است.

### مواد و روش ها

#### مدل ریاضی

قانون جریان غیرداری برای جریان آب منفذی به شکل زیر است (۷):

$$v_E = -k u^n = -\frac{k}{\gamma_w^n} \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^n \quad (1)$$

در رابطه فوق،  $u$ : فشار آب منفذی،  $k$ : ضریب هدایت هیدرولیکی،  $i$ : گرادیان هیدرولیکی،  $z$ : محور قائم،  $\gamma_w$ : وزن مخصوص آب و  $n$ : مقداری ثابتی می باشد (۹). با به کارگیری این رابطه معادله تحکیم یک بعدی در شرایط جریان غیرداری به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{nk}{\gamma_w^n} \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^{n-1} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \frac{1}{1 + e_0} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2)$$

در صورتی که مقدار نرخ کرنش ثابت اعمالی در آزمایش تحکیم با کرنش ثابت در نظر  $\dot{\epsilon}$  گرفته شود مقدار تغییر شکل و حجم نمونه پس از زمان  $t$  از شروع آزمایش به ترتیب برابر خواهد با:

$$\delta = \dot{\epsilon} t H \quad (3)$$

$$\Delta V = \dot{\epsilon} t H A \quad (4)$$

در روابط فوق  $A$  و  $H$  به ترتیب سطح مقطع و ارتفاع اولیه نمونه است. از آنجائی که تغییرات حجم نمونه خاک برابر با تغییرات تخلخل خاک می باشد، لذا ضریب تخلخل خاک در هر لحظه از آزمایش تحکیم CRS برابر است با:

$$e = e_0 - \frac{\dot{\epsilon} t H A}{V_s} \quad (5)$$

در رابطه فوق  $e_0$  نسبت تخلخل اولیه و  $V_s$  حجم ذرات جامد خاک است. تغییرات تخلخل نسبت به زمان برابر است با:

$$\frac{de}{dt} = -\frac{\dot{\epsilon} H A}{V_s} = -C \quad (6)$$

با جای گذاری معادلات ۵ و ۶ در معادله ۲، خواهیم داشت:

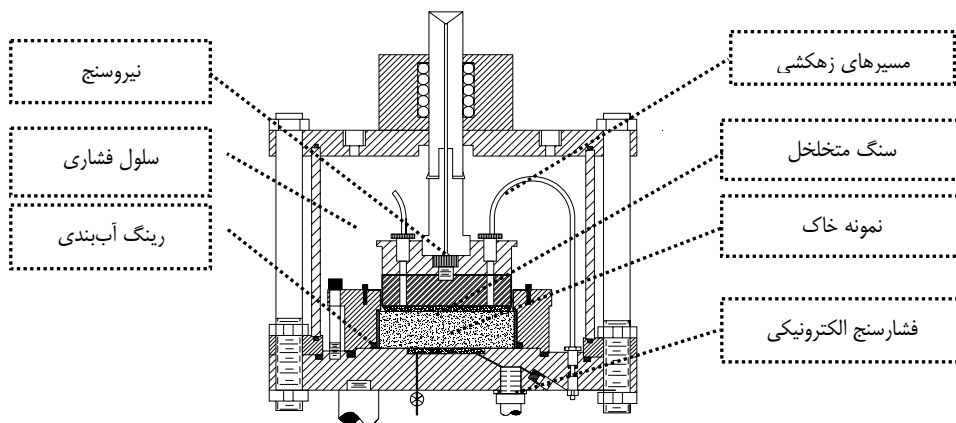
$$\frac{nk}{\gamma_w^n} \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^{n-1} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = -\frac{C}{1 + e_0 - Ct} \quad (7)$$

تکرارپذیری نتایج هر یک از آزمایش‌های مربوط به خاک کشورمان در سه تکرار انجام گردید.

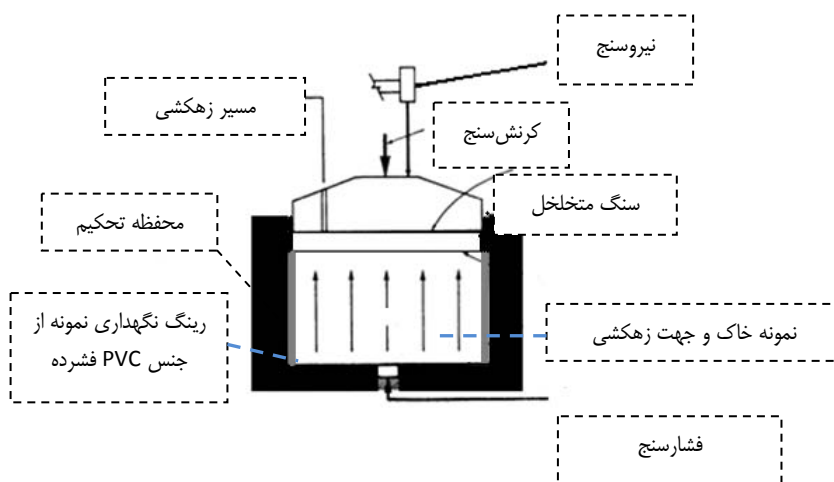
در تمام آزمایش‌ها کرنش ثابت به کمک دستگاه فشاری قابل کنترل به نمونه اعمال گردید. جدول ۲ به ترتیب نرخ کرنش‌های اعمال شده بر روی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در این تحقیق به منظور بررسی

جدول ۱- مشخصات عمومی خاک‌های بررسی شده در تحقیق حاضر

نمونه	محل تهیه	بافت خاک (%)			حدود اتربرگ (%)		نوع خاک	ابعاد نمونه (mm)	
		ماسه	سیلت	رس	PL	LL		قطر	ضخامت
A	مغان	۶	۵۴	۳۰	۱۶/۵	۳۵/۵	CL	۱۰۰	۲۰
B	سوئد	۰	۷	۹۳	۱۵	۷۵	CH	۵۰	۲۰



شکل ۱- شمای دستگاه تحکیم سنج با کرنش کنترل شده در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه تهران



شکل ۲- طرح و اجزای مختلف دستگاه تحکیم سنج با کرنش ثابت استفاده شده در دانشگاه چالمرز - سوئد

جدول ۲- مشخصات نمونه‌های خاک و نرخ‌های کرنش ثابت به کار رفته در آزمایش تحکیم CRS

شماره نمونه	کرنش %/min	ارتفاع اولیه (mm)	رطوبت اولیه %	تخلخل اولیه	حداکثر u (kPa)
1A1		۱۹/۹۳	۷۴/۲	۱/۷۸	۷/۲۴
1A2		۱۹/۹۵	۷۲/۳	۱/۷۶	۸/۵
1A3	۰/۰۲۵	۱۹/۹۱	۷۵/۶۲	۱/۷۵	۷/۱
2A1		۱۹/۸۲	۷۰/۲	۱/۸۰	۹۰
2A2		۱۹/۸۵	۶۵/۴	۱/۷۹	۱۰۵
2A3	۰/۰۵	۱۹/۸۷	۶۷/۴	۱/۷۷	۱۰۱
3A1		۱۹/۵۷	۶۸/۱	۱/۷۶	۲۴۵
3A2		۱۹/۹۵	۶۲/۵	۱/۷۳	۲۳۷
3A3	۰/۲۵	۱۹/۶۸	۶۴/۱	۱/۷۵	۳۸۲
4A1		۱۹/۸	۶۸/۱	۱/۷۷	۶۲۳
4A2		۱۹/۳۸	۷۱/۴	۱/۶۹	۵۷۱
4A3	۰/۳۷۵	۱۹/۶۷	۶۹/۳	۱/۷۳	۵۹۲
1B	۰/۰۰۱	۲۰	۸۹	۲/۴	۲
2B	۰/۰۰۶	۲۰	۸۸	۲/۴	۱۴
3B	۰/۰۱۲	۲۰	۸۹	۲/۴۱	۲۲
4B	۰/۰۲۴	۲۰	۸۴	۲/۵	۵۰/۶

جدول ۳- خلاصه آنالیز طرح کامل تصادفی برای بررسی تکرارپذیری نتایج آزمایش

نرخ کرنش به کاررفته	مقدار متوسط کل داده‌های ثبت شده در هر آزمایش			مقدار Pr	مقدار F	پارامترهای ثبت شده
	تکرار ۳	تکرار ۲	تکرار ۱			
0/025%/min	۲/۲۳	۲/۰۶	۲/۶۹	۰/۴۵	۰/۲۱	نیرو kN
	۴/۱۹	۴/۰۲۲	۴/۸۴	۰/۶۴	۰/۶۴	فشار آب kPa
	۳/۲۸	۳/۱۹	۳/۱۵	۰/۳۲	۱/۰۸	کرنش mm
0/05%/min	۴/۵۶	۴/۸۷	۴/۴۷	۰/۷۸	۰/۲۴	نیرو kN
	۳۶/۲۹	۳۷/۴۶	۴۴/۱۹	۰/۲۴	۱/۴	فشار آب kPa
	۴/۸۲	۴/۷۴	۴/۷۵	۰/۷۸	۰/۱۳	کرنش mm
0/25%/min	۴/۵۴	۸/۶۸	۶/۴۴	۰/۱۳	۲/۰۳	نیرو kN
	۸۴/۷۳	۱۱۶/۱۷	۱۳۵/۱۷	۰/۲۷	۱/۳۲	فشار آب kPa
	۳/۷۸	۳/۹۸	۴/۴۰	۰/۴۹	۰/۷۶	کرنش mm
0/375%/min	۵/۵۳	۶/۰۴	۵/۸۵	۰/۸۹	۰/۱۲	نیرو kN
	۱۷۴/۶۴	۱۴۹/۰۴	۱۵۷/۹۹	۰/۸۳	۰/۱۸	فشار آب kPa
	۳/۴۶۸	۳/۷۲۷	۳/۸۵	۰/۴۷	۱/۸۱	کرنش mm

## نتایج

### تکرارپذیری آزمایش‌ها

به منظور بررسی دقت آزمایش و همچنین تکرارپذیری نتایج، آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه خاک‌های ایران در ۳ تکرار انجام شد. با توجه به این مساله که در تحقیق حاضر تکرارها نسبت به تیمار مشخصی انجام نشده‌اند از روش <sup>۱</sup>CDR (طرح تصادفی کامل)

۱- Complete Design Randomize

در محیط نرم افزار SAS برای بررسی تکرارپذیری نتایج استفاده شد. در این مدل داده‌های مربوط به فشار آب منفذی ثبت شده در کف نمونه، تنش کل وارده بر نمونه‌ها و همچنین تغییر شکل اندازه گرفته شده نسبت به زمان مربوط به هر یک از نرخ کرنش‌های ثابت، مورد آنالیز قرار گرفت. جدول شماره ۳ خلاصه نتایج تحلیل آماری مربوط به آزمایش‌های صورت گرفته بر روی نمونه A را نشان می‌دهد. همان طوری که از جدول فوق مشخص است مقدار پارامتر Pr برای تمام داده‌ها بزرگ‌تر از ۰/۰۰۵ بوده در نتیجه اختلاف سه تکرار

صورت گرفته برای آزمایشات در سطح احتمال ۹۵٪ معنی‌دار نیست. با مقایسه بین مقدار عددی این پارامتر برای سه فاکتور اندازه‌گیری شده نیرو، فشار آب منفذی و کرنش ایجاد شده، بیشترین اختلاف مربوط به داده‌های نیرو می‌باشد. علت این امر می‌تواند مربوط به واسنجی ابزار اندازه‌گیری باشد.

#### اعتبارسنجی معادلات ارائه شده

در طول آزمایش تحکیم CRS فشار آب منفذی در کف نمونه اندازه‌گیری می‌شود و این نقطه از توزیع فشار آب منفذی به‌عنوان داده‌های واقعی برای بررسی و اعتبارسنجی معادله ارائه شده (معادله ۱۱) مورد استفاده قرار گرفته‌است. در معادله مذکور برای ضریب ثابت  $n$  با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در مورد کارهای محققان قبلی مقدار  $1/55$  در نظر گرفته شد. شکل ۳ نتایج برخی از آزمایش‌های صورت گرفته تحت نرخ‌های مختلف کرنش بر روی نمونه خاک‌های مختلف را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود معادله غیرداری با ضریب  $n$  برابر با  $1/55$  همبستگی خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد، در حالی که برای حالت  $n$  برابر با یک که نشان‌گر جریان داری می‌باشد، اختلاف بین داده‌های آزمایشگاهی و معادله مربوطه بسیار زیاد بوده که نشان‌دهنده اختلاف فاحش بین نتایج حالت داری و داده‌های واقعی است.

#### بررسی تغییرات فشار آب منفذی

جهت بررسی رفتار تغییرات فشار آب منفذی تغییرات فشار آب منفذی نسبی یعنی نسبت فشار آب منفذی در کف نمونه به تنش کل وارد بر نمونه در مقابل تنش کل وارده رسم گردید. رفتار فشار آب منفذی نسبی نسبت به تنش کل برای نمونه‌های بررسی شده نشان داد که شکل منحنی حاصل از آزمایشات در شرایط مختلف به دو فرم مختلف ممکن است نمایان شود. در نمونه‌های یکسانی که تحت سرعت‌های متفاوت بررسی شده‌اند این مساله به‌وضوح مشاهده می‌شود. شکل ۴ و ۵ تغییرات فشار آب منفذی نسبی را به تنش کل وارد بر دو نمونه یکسان که تحت دو کرنش متفاوت تحکیم یافته‌اند را نشان می‌دهد. همان‌طوری که مشاهده می‌شود در سرعت‌های پایین شکل منحنی در ابتدا با شیب سریع به‌صورت نزولی بوده که با ادامه آزمایش این کاهش بسیار خفیف می‌شود و تقریباً به‌صورت افقی ادامه پیدا می‌کند. انجام آزمایش بر روی همان نمونه با سرعت بالا نشان می‌دهد که سیر نزولی منحنی که معمولاً در ابتدای آزمایش رخ می‌دهد بسیار سریع اتفاق افتاده و سپس با یک شیب تند روند افزایشی پیدا می‌کند و پس از رسیدن به یک نقطه حداکثر مجدداً با روند نسبتاً ملایم‌تری حالت کاهشی پیدا می‌کند. دلیل توجیهی این مطلب تغییر رفتار فشار آب منفذی نسبی در مقابل تنش وارده بر

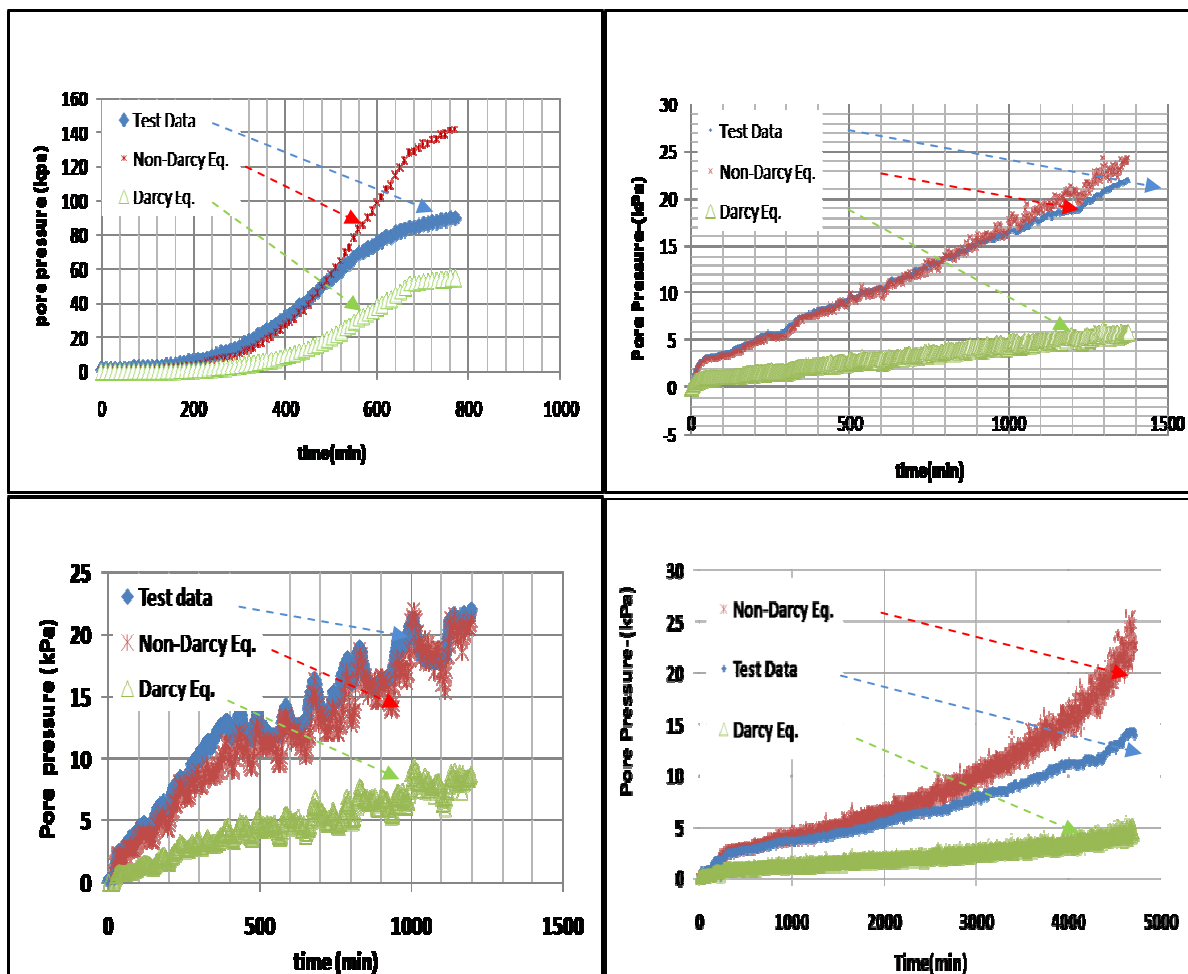
نمونه به علت تغییر رفتار زهکشی نمونه می‌باشد. در شروع آزمایش به سبب وزن نمونه اشباع فشار آب منفذی درجا به اندازه حدود  $1/5$  کیلوپاسکال ایجاد می‌گردد که به سبب صفر بودن مقدار تنش کل در ابتدای آزمایش مقدار فشار آب منفذی نسبی به سمت بی‌نهایت میل می‌کند که با شروع آزمایش از مقدار آن کاسته می‌شود. تا زمانی که سرعت بارگذاری به اندازه کافی آهسته باشد که اضافه فشار آب منفذی ایجاد نشود این روند به‌صورت کاهشی بوده و در نهایت ممکن است به یک خط افقی تبدیل شود (شکل ۴). در صورتی که سرعت آزمایش بالا بوده و فرصت استهلاک فشار آب منفذی اضافی وجود نداشته باشد افزایش در فشار آب منفذی نسبی مشاهده خواهد شد (شکل ۵).

در شکل ۶ رفتار تغییرات فشار آب منفذی را در نرخ‌های مختلف کرنش برای نمونه B نشان داده شده است همان‌گونه که مشخص است با افزایش نرخ کرنش، تغییرات قابل ملاحظه‌ای در منحنی‌ها مشاهده می‌شود.

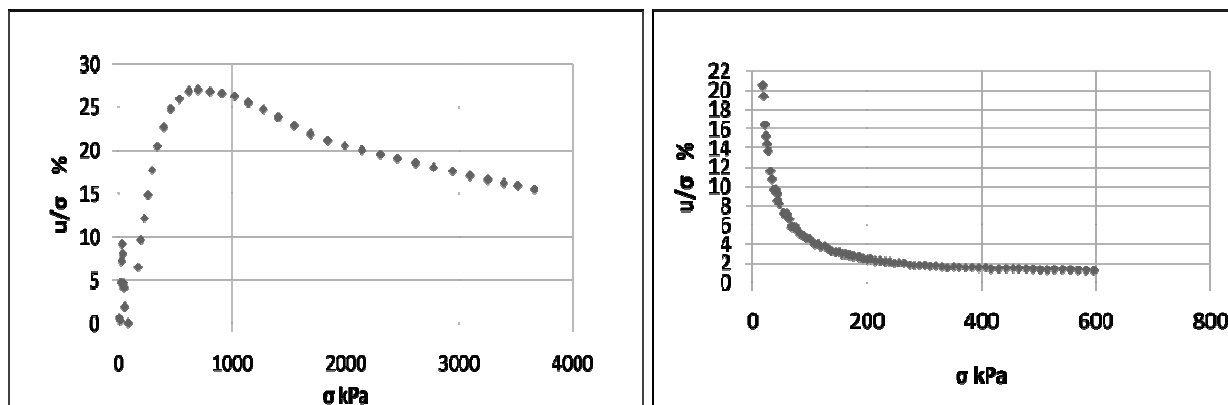
در جریان پدیده تحکیم با نرخ کرنش ثابت سرعت خروج جریان مساوی با نرخ کرنش اعمالی است. همچنین در هر لحظه از آزمایش با معلوم بودن ارتفاع نمونه و فشار آب منفذی در دو انتهای نمونه گرادیان هیدرولیکی قابل تعیین است. با این حال تنها یک نقطه از منحنی گرادیان هیدرولیکی - سرعت جریان مربوط به نفوذپذیری مربوطه قابل تعیین است. لذا در طول یک آزمایش امکان تعیین دقیق نوع جریان از طریق ترسیم گرادیان هیدرولیکی در برابر سرعت وجود ندارد.

با این حال تکرار آزمایش‌های صورت گرفته امکان رسم منحنی‌های سرعت جریان ( $v$ ) در برابر گرادیان هیدرولیکی ( $i$ ) را میسر می‌سازد. بدین صورت که در تکرارهای مختلف سرعت آزمایش، می‌توان نسبت به یک تخلخل ثابت که متناسب با ضریب هدایت هیدرولیکی معینی است، یک نقطه از منحنی  $v-i$  را مشخص کرد.

بدین صورت می‌توان قانون هیدرولیکی حاکم بر جریان در نمونه‌ها را تا حدودی بررسی کرد. در صورتی که این رابطه به‌صورت خط مستقیم باشد، جریان از نوع داری و در صورت منحنی بودن جریان از نوع غیرداری خواهد بود. شکل‌های ۷ و ۸ منحنی‌های جریان مربوط به بخشی از زمان آزمایش را دو نمونه خاک بررسی شده را نشان می‌دهد. همان‌طوری که از این شکل‌ها مشخص است، رابطه موجود بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان در محدوده مورد مطالعه غیرخطی می‌باشد. هر چند به سبب محدودیت تعداد داده‌ها تصمیم‌گیری نهایی در مورد قانون حاکم بر پدیده کمی مشکل است اما منحنی‌های موجود در شکل‌های مذکور نشان‌دهنده جریان غیرداری در محدوده مورد بررسی می‌باشد.

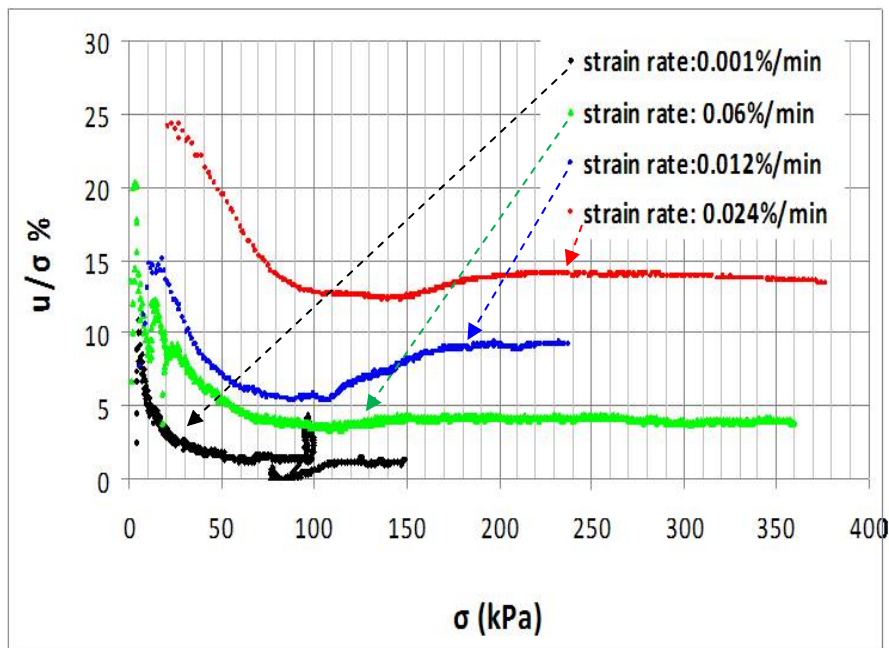


شکل ۳- افزایش فشار آب منفذی در کف نمونه برخی از آزمایش‌ها و مقایسه آن با معادله ۱۱، در شرایط جریان داریسی (n=1.55) و شرایط غیرداریسی (n=1).

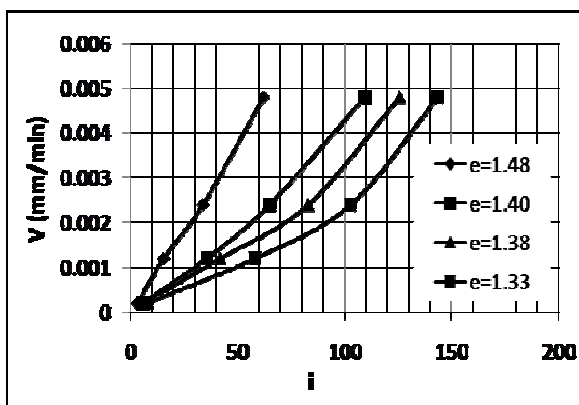


شکل ۴- تغییرات فشار آب منفذی نسبی در مقابل تنش کل اعمالی در نمونه 4A1

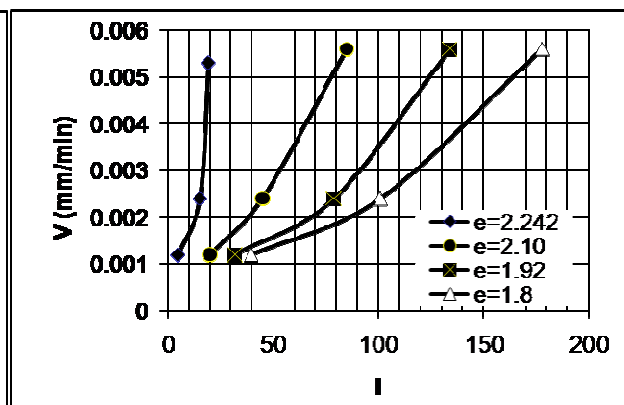
شکل ۵- تغییرات فشار آب منفذی نسبی در مقابل تنش کل اعمالی در نمونه 1A1



شکل ۶- تغییرات فشار آب منفذی در مقابل تنش کل اعمالی در نمونه B (هر منحنی مربوط به نرخ کرنش خاصی است)



شکل ۸- رابطه بین سرعت جریان زهکشی- گرادیان هیدرولیکی در نمونه B



شکل ۷- رابطه بین سرعت جریان زهکشی- گرادیان هیدرولیکی در نمونه C

مربوطه به خاک به سمت راست منتقل می‌گردد. با توجه به شکل ۹ و سرعت جریان آب منفذی که معادل سرعت کرنش اعمالی است، جریان حاکم بر پدیده تحکیم در حالت CRS می‌تواند یکی از حالات داری یا غیرداری و یا هر دو، در بخش‌هایی از آزمایش تحکیم مشاهده شود. معادلات ارائه شده برای تحکیم CRS همگی با فرض بر قراری جریان داری به‌دست آمده‌اند و لذا در این تحقیق برای اولین بار معادله‌ای برای حالت جریان غیرداری ارائه شده است بگونه‌ای که با دانستن شرایط جریان در آزمایش تحکیم با کرنش کنترل شده می‌توان از معادله مناسب جهت محاسبه و برآورد پارامترهای مورد نیاز بهره جست.

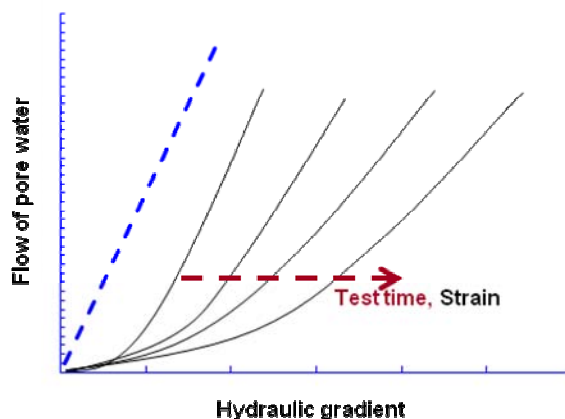
در واقع در آزمایش CRS رابطه بین گرادیان جریان و سرعت خروج آب از نمونه به‌صورت یک خط افقی موازی با محور گرادیان هیدرولیکی می‌باشد زیرا سرعت جریان خروجی برابر با سرعت تغییر شکل نمونه بوده و ثابت می‌باشد در حالی که گرادیان هیدرولیکی هر لحظه افزایش پیدا می‌کند. شکل ۹ شرایط ایجاد شده در طول آزمایش تحکیم CRS را در این خصوص نشان می‌دهد. در این شکل منحنی خط‌چین، جریان داری را برای تخلخل ثابت و منحنی‌های پیوسته جریان غیرداری را نشان می‌دهد به‌طوری‌که هر منحنی مربوط به لحظه خاصی از آزمایش می‌باشد زیرا در هر لحظه از آزمایش نمونه فشرده شده و تخلخل کاهش می‌یابد و منحنی  $v-i$

منفذی نسبی و تنش کل به صورت افزایشی و سپس کاهش می‌دهد می‌شود شرایط جریان از حالت غیرداری به جریان داری تبدیل می‌گردد (شکل ۵ و ۶). در واقع لحظه به اوج رسیدن منحنی فشار آب منفذی نسبی و تنش کل همان لحظه‌ای است که بین منحنی فشار آب منفذی و زمان مربوط به داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های حاصل از معادله ۱۱ (رابطه مربوط به حالت جریان غیرداری) جدایی مشاهده می‌گردد. در این تحقیق این موضوع در تمام آزمایش‌هایی که رفتار بین منحنی فشار آب منفذی نسبی و تنش کل به صورت افزایش و کاهش بود مشاهده شد. شکل ۱۰ منحنی تغییرات فشار آب منفذی نسبی در مقابل تنش وارد بر نمونه را در کنار تغییرات فشار آب منفذی ثبت شده و پیش‌بینی شده به وسیله معادله ۱۱ در حالت غیرداری نشان می‌دهد. آستانه جدایی داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های محاسباتی تقریباً همان نقطه‌ای است که روند کاهش در منحنی فشار آب منفذی نسبی - تنش شروع می‌شود. بدین ترتیب می‌توان برای محاسبه ضریب تحکیم و تنش موثر متوسط در نمونه تا لحظه وقوع حداکثر مقدار در منحنی فشار آب منفذی نسبی، از روابط ارائه شده بر پایه جریان غیرداری استفاده کرد. در نمونه‌هایی که فشار آب منفذی نسبی در برابر تنش کل در طول آزمایش روند کاهش داشته (شکل ۴)، تطابق بسیار خوبی بین داده‌های رابطه غیرداری و داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد لذا کاربرد روابط مبتنی بر جریان غیرداری برای کل محدوده آزمایش منطقی به نظر می‌رسد و در واقع به این دلیل که شرایط جریان در طول آزمایش تغییر نمی‌کند تغییری در روند منحنی فشار آب منفذی نسبی و تنش کل مشاهده نمی‌شود. دلیل وجود جریان غیرداری در آزمایش تحکیم CRS بسته شدن پی‌درپی مسر جریان در خاک می‌باشد که بر اثر فشردگی پیوسته نمونه خاک به وجود می‌آید.

این معادلات می‌توانند در محاسبه تنش پیش‌تحکیمی و ضریب تحکیم مورد استفاده قرار بگیرند. برای کاربرد بهتر این معادلات لازم است شرایط جریان پس از آزمایش مشخص شود تا رابطه مناسب (بر پایه جریان داری یا غیرداری) جهت انجام محاسبات انتخاب گردد.

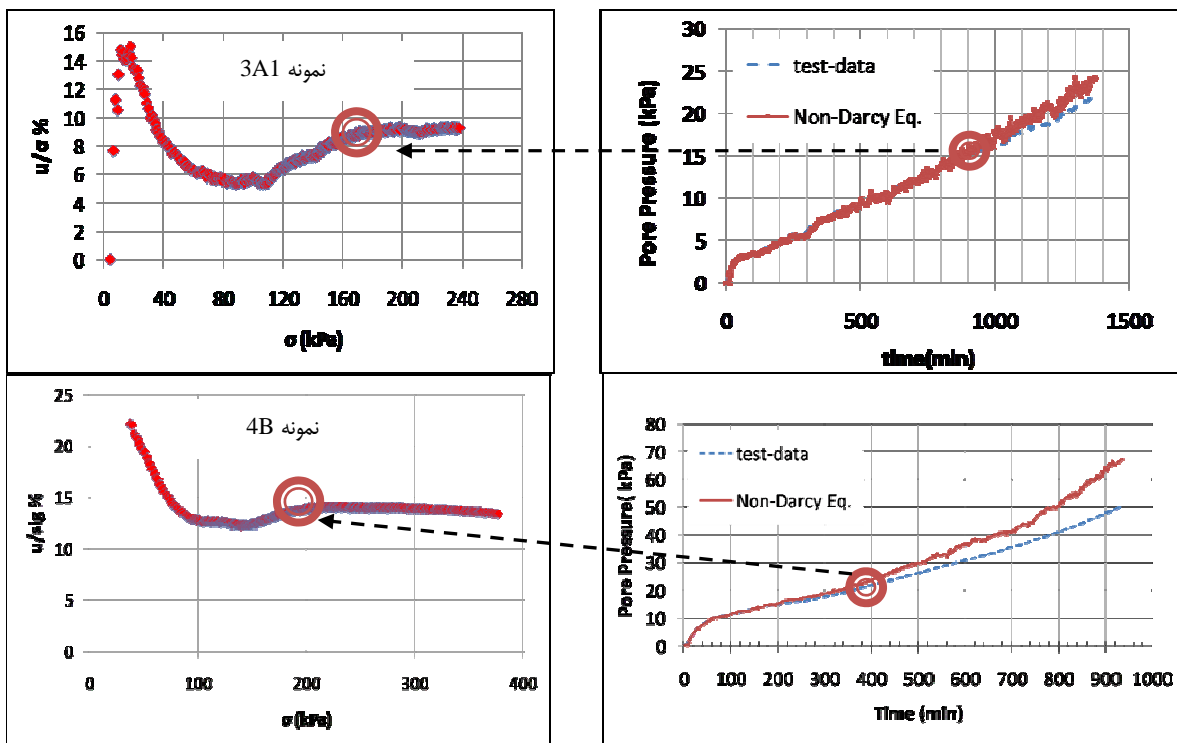
### مرز بین جریان داری و غیرداری

همان‌طوری که محققان قبلی نشان داده‌اند جریان غیرداری یا رابطه غیرخطی بین گرادین هیدرولیکی و سرعت جریان همیشه در قسمت نخست یا ابتدائی منحنی  $v-i$  قرار دارد. در آزمایش تحکیم با کرنش ثابت با افزایش تنش وارد بر نمونه فشار آب منفذی اضافی ایجاد می‌شود و به سبب زهکشی نمونه این فشار شروع به زایل شدن می‌کند. در صورتی که سرعت اعمال کرنش به اندازه کافی آهسته باشد، مشابه با آزمایش سه محوری CD، فشار آب مستهلک شده و بدین ترتیب نسبت فشار آب منفذی به تنش وارد روند کاهش خواهد داشت. ولی از آنجائی که روند افزایش تنش کل وارد بر نمونه در این آزمایش ثابت نیست (۴) و همچنین به دلیل فشردگی شدن دائمی نمونه نفوذپذیری آن کاهش یافته و استهلاک فشار آب منفذی با سرعت کمتری اتفاق می‌افتد، این امر موجب افزایش نسبت فشار آب منفذی به تنش وارد می‌شود. در آزمایش‌های صورت گرفته افزایش مقدار نسبت فشار آب منفذی به تنش وارد بعد از مدتی روند کاهش پیدا می‌کند که نشان از استهلاک سریع‌تر فشار آب منفذی دارد. از آنجایی که مقاومت جریان در جریان غیرداری همیشه بیشتر از جریان داری می‌باشد، استهلاک سریع‌تر فشار آب منفذی با وجود کاهش تخلخل، ضریب نفوذپذیری و افزایش تنش وارد تنها به دلیل تسهیل خروج آب از محیط ممکن می‌باشد که این موضوع با تغییر جریان از حالت غیرداری به داری و کاهش مقاومت جریان ممکن می‌گردد. بدین ترتیب در نمونه‌هایی که شکل منحنی فشار آب



شکل ۹- شرایط ایجاد شده در تحکیم CRS. منحنی خطچین قانون داری و دسته منحنی‌ها مربوط به قانون جریان در کرنش‌های مختلف می‌باشند که با پیشرفت آزمایش و کاهش تخلخل به سمت راست منتقل می‌شوند.





شکل ۱۰- رابطه بین نقطه شروع انحراف از جریان غیرداری به داری بر اساس تغییر شیب منحنی فشار آب منفذی نسبی- تنش کل برای دو نرخ مختلف کرنش در دو نمونه متفاوت

تحلیلی در شرایط غیرداری، تفاوتی مشاهده می‌شد که زمان وقوع این اختلاف با لحظه تغییر روند منحنی فشار آب منفذی نسبی و تنش کل یکسان است. این مطلب تأیید کننده بند ۲ بوده و نشان می‌دهد که در نقطه اوج منحنی فشار آب منفذی نسبی- تنش کل، شرایط جریان از حالت غیرداری به داری تبدیل می‌شود.

به منظور محاسبه صحیح پارامترهای تحکیم، نظیر تنش پیش تحکیمی و ضریب تحکیم لازم است از اثر جریان غیرداری در معادلات حاکم لحاظ گردد. این مطلب نیاز به بررسی‌های بیشتر دارد. نمونه‌های بررسی شده در این تحقیق از نظر خصوصیات خمیرائی در دو گروه خاک با خمیرائی بالا و کم قرار داشتند ولی در روند کلی نتایج تغییر قابل ملاحظه‌ای بین رفتار این دو نوع خاک مختلف مشاهده نشد. با این حال رفتار بررسی شده که متأثر از مقدار نرخ کرنش اعمالی است نشان داد که رفتارهای مشابه برای دو خاک با خمیرائی مختلف در نرخ‌های کرنش یکسان رخ نمی‌دهد به طوری که یک رفتار خاص برای خاک با خمیرائی کمتر در نرخ‌های کرنش سریع‌تری نسبت به خاک با خمیرائی زیاد رخ می‌دهد.

## نتیجه‌گیری

نتایج کلی این تحقیق را می‌توان به صورت زیر ارائه کرد:

بررسی رفتار تغییرات فشار آب منفذی اضافی خاک در طول آزمایش نشان می‌دهد که با توجه به سرعت آزمایش این رفتار می‌تواند ۲ حالت مختلف داشته باشد. در سرعت‌های پایین رفتار فشار آب منفذی نسبی در برابر تنش کل وارد بر نمونه حالت کاهشی و در سرعت‌های بالا روند افزایشی- کاهشی مشاهده گردد.

رفتار متفاوت فشار آب منفذی در مقابل تنش کل به دلیل تغییر رفتار زهکشی خاک در واقع به دلیل تغییر شرایط جریان از حالت داری به حالت غیرداری رخ می‌دهد. به طوری که در ابتدای آزمایش به سبب وجود جریان غیرداری، مقاومت جریان بیشتر بوده موجب بالا رفتن فشار آب منفذی می‌گردد. با تغییر شرایط به حالت داری و کاهش مقاومت جریان، زایل شدن فشار آب منفذی سریع‌تر اتفاق افتاده و روند کاهشی در منحنی فشار آب منفذی نسبی- تنش کل مشاهده می‌شود.

در نمونه‌های تحت نرخ سریع کرنش بعد از گذشت مدتی از آزمایش، بین مقادیر فشار آب منفذی ثبت شده و حاصل از معادله

## منابع

- 1- Almeida M.S.S., Martins I.S., and Carvalho S.R.L. 1995. "Constant Rate of Strain Consolidation of Singapore Marine Clay" discussion to paper (ed Lee., K. et all.) Geotechnique, 45 (2): 333-336.
- 2- ASTM. 2002. "Annual Book of ASTM Standards", American Society for Testing and Materials, Soil and Rock, D4186-89, 500-505.
- 3- Brown G.O., Garbrecht J.D., and Hager W.H. 2003. Henry P. G.Darcy and Other Pioneers in Hydraulics: Contributions in Celebration of the 200th Birthday of Henry Philibert Gaspard Darcy, ASCE, Reston, VA. Dobak, P., 2003. "Loading Velocity in Consolidation Analysis" Geological Quarterly, 47 (1): 1320.
- 4- Dobak P. 2003. "Loading Velocity in Consolidation Analysis" Geological Quarterly, 47 (1): 13-20.
- 5- 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, R. N. Yong and F. C. Townsend, Eds. , American Society for Testing and Materials, pp. 354-377.
- 6- Hamilton J.J., and Crawford C.B. 1959. "Improved Determination Preconsolidation Pressure of a Sensitive Clay" Papers on soils, ASTM Spec. Tech. Publ. No. 254-270.
- 7- 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 Ska<sup>o</sup>-Edeby". Doctoral thesis, Swedish Geotechnical Institute.
- 8- Hansbo S. 2001. "Consolidation Equation Valid for Both Darcian and Non-Darcian Flow" Geotechnique 51 No. 1, 51-54.
- 9- Hansbo S. 2003. "Deviation from Darcy's Law Observed in One-Dimensional Consolidation" Geotechnique 53 No. 3, 601-605.
- 10- 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.
- 11- Mitchell K.J., and Soga K. 2005. "Fundamental of soil behaviors", third edition, Wiley and Sons.
- 12- Sallfors G. 1975. Preconsolidation Pressure of Soft highly Plastic Clays Chalmers Univ. Tech. Goteborg .
- 13- Smith R.E., and Wahls H.E. 1969. Consolidation under Constant Rate of Strain ACSE J. of Soil mechanic and foundation Div., 95, SM2, 519-539.
- 14- Wissa A.E.Z., Christian J.T., Davis E.H., and Heiberg S. 1971. Consolidation Testing at Constant Rate of Strain J. of Soil mechanic and foundation Div., ASCE, 97 (10), 1393-1413.

## Investigation on Hydraulic Conditions in CRS Consolidation test and a Method to Determination of Pore Water Flow Regime

H. Ahmadi<sup>1\*</sup> - H. Rahimi<sup>2</sup> - A. Soroush<sup>3</sup>

Received:20-4-2010

Accepted:29-6-2011

### Abstract

At present study constant rate of strain (CRS) consolidation under Non-Darcy condition was investigated. In this study a governing conditions of drainage pore water were investigated using proposed equation. The CRS experiments under different rates of strain were conducted on different soil samples. Results these experiments and there comparison with proposed equation showed that flow of pore water drainage in the most part or each test was Non-Darcy and changed to Darcy condition in the final one fourth of test. According to the results the threshold that Non-Darcy flow changes to Darcy is dependent on variations of relative pore water pressure versus total strain and it can be determined based on variations in inclination of relative pore water pressure-total stress curve.

**Keywords:** Consolidation, Constant strain, Non-Darcy flow, Pore pressure

---

1- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University

(\*- Corresponding Author Email: Hojjat.a@gmail.com)

2- Professor, Department of Irrigation, Faculty of Agriculture, Tehran University

3- Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering., Amirkabir University of Technology