

## بررسی تغییرات اصلاح دانه‌بندی روی رفتار تحکیمی خاک‌های درشت‌دانه رس‌دار

سمیرا نعمت‌زاده\*، مسعود حاجی‌علیلوی بناب و حامد وفائی ملامحمود\*\*

\*نگارنده مسئول: گروه ژئوتکنیک، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. تلفن: ۰۴۱)۳۳۳۹۲۵۵۱، پیام‌نگار: snematzadeh.civil@yahoo.com

\*\* به‌ترتیب: دانشجوی کارشناسی ارشد؛ استاد گروه ژئوتکنیک، دانشکده عمران دانشگاه تبریز؛ و دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان  
تاریخ دریافت: ۹۵/۷/۳؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۲۵

### چکیده

ارزیابی خصوصیات تحکیمی خاک‌های رس‌دار با توجه به این موضوع که نشست خاک در برخی مواقع می‌تواند خسارت‌هایی جبران‌ناپذیری به بار آورد، یکی از گام‌های مهم در طراحی و ساخت پروژه‌های عمرانی و به‌ویژه در احداث سازه‌های آبی و ... است. رفتار تحکیمی خاک‌ها معمولاً با استفاده از آزمایش ادنومتر در قالب تحکیم یک بعدی سنجیده می‌شود. اما در مورد خاک‌های درشت‌دانه شنی رس‌دار به‌علت اندازه کوچک قالب باید دانه‌بندی اصلاح شود که منجر به تغییرات در نوع دانه‌بندی خاک می‌شود. دستگاه تحکیم هیدرولیکی با رفع این محدودیت، امکان کنترل مسیره‌های زهکشی و ثبت فشار منفذی نمونه خاک را نیز در حین عمل تحکیم فراهم می‌کند. هدف اصلی از تحقیق حاضر بررسی تغییرات در رفتار تحکیمی خاک‌های شنی رس‌دار در اثر اصلاح دانه‌بندی است. در این خصوص، دانه‌بندی خاک‌های شنی رس‌دار به روش‌های جایگزینی و حذفی اصلاح و رفتار تحکیمی نمونه‌های اصلاح شده با استفاده از آزمایش ادنومتر سنجیده شد. علاوه بر این، نمونه‌های اصلی نیز با دستگاه تحکیم هیدرولیکی آزمایش شدند. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که با اصلاح دانه‌بندی در نمونه‌ها، ضریب فشردگی ۱/۵ تا ۲/۵ برابر افزایش و ضریب تحکیم ۳۰ تا ۸۰ درصد کاهش می‌یابد. تغییرات این مقادیر در خاک‌های اصلاح شده به روش حذفی شدیدتر است تا به روش جایگزینی و بنابراین اصلاح دانه‌بندی به روش جایگزینی در بررسی رفتار تحکیمی خاک‌های شنی رس‌دار مناسب‌تر است و مقادیر نزدیک‌تری به خاک اصلی دارد.

### واژه‌های کلیدی

اصلاح دانه‌بندی، دستگاه تحکیم هیدرولیکی، شاخص فشردگی، ضریب تحکیم

### مقدمه

در پروژه‌های عمرانی، نشست خاک در بعضی مواقع می‌تواند خسارت‌هایی جبران‌ناپذیری به بار آورد، از این‌رو پیش‌بینی صحیح و کاربرد آن در طراحی سازه‌ها می‌تواند از این خسارت‌ها جلوگیری کند. علاوه بر این، در اکثر موارد نشست زیر پی سازه‌ها عاملی محدودکننده در تعیین ظرفیت باربری پی سازه‌هاست. بنابراین، شناخت هرچه بیشتر پدیده تحکیم می‌تواند ما را در افزایش ظرفیت باربری سازه‌ها و ایمنی آنها یاری دهد.

یکی از مسائل مهم و اساسی در کارهای مهندسی، ارزیابی دقیق میزان نشست خاک زیر سازه‌هاست. ماهیت تدریجی و طولانی‌مدت این پدیده می‌تواند خطری بالقوه برای اکثر سازه‌ها باشد. تراکم‌پذیری و قابلیت تحکیم از جمله ویژگی‌های مهندسی ژئوتکنیک هستند که در طراحی‌های پی و بستر اغلب سازه‌های عمرانی، به‌ویژه سازه‌های آبی، نقش اساسی دارد (Abbasi et al., 2006).

پیشنهادها در تحقیق حاضر می‌توان عدد ۶ را به‌عنوان عددی تایید شده برای این نسبت دانست.

به‌دلیل محدودیت دستگاه‌های موجود در آزمایشگاه از لحاظ ابعاد نمونه و ارتباط آن با اندازه بزرگترین قطر دانه‌های خاک، راهکارهای متفاوتی را باید برای به‌دست آوردن پارامترهای تحکیمی خاک‌های درشت‌دانه جستجو کرد. یکی از این راهکارها، استفاده از دستگاه تحکیم ادنومتر بزرگ‌مقیاس<sup>۳</sup> است که بسیاری از محققان آن را توسعه داده‌اند. در این‌باره، مختاری و همکاران (Mokhtari *et al.*, 2015) و کونکیتکول و همکاران (Kongkitkul *et al.*, 2014) نشان دادند که نمونه‌های بزرگتر غالباً در اکثر آزمایش‌های ژئوتکنیکی دارای همخوانی بهتری با نتایج خاک طبیعی هستند. در همین خصوص، برخی محققان مانند ابوفرسخ و یو (Abu-Farsakh & Yu, 2012) و سالم و الشربینی (Salem & El-Sherbiny, 2014) با مقایسه رفتار تحکیمی نمونه‌های با اندازه بزرگتر و نتایج حاصل از آن با ادنومتر معمولی و آزمایش‌های در محل، به این نتیجه رسیدند که مقادیر ضریب تحکیم اندازه‌گیری شده در محل با مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه بسیار تفاوت دارد و معمولاً بیشترند. بنابراین می‌توان گفت که استفاده از نمونه‌های با مقیاس بزرگتر می‌تواند رفتار تحکیمی خاک‌های درشت‌دانه رس‌دار را بهتر ارزیابی کند، ولی محدودیت‌های دیگر موجود در این دستگاه به ناچار محققان را به بررسی روش‌های دیگر سوق می‌دهد.

از راهکارهای دیگر برای محاسبه خواص تحکیمی خاک‌های درشت‌دانه می‌توان به استفاده از دستگاه تحکیم هیدرولیکی (دستگاه تحکیم روسل<sup>۴</sup>) اشاره کرد (Rowe & Barden, 1966). در این دستگاه، بار قائم به صورت هیدرولیکی وارد می‌شود و می‌توان نمونه‌های بزرگتر (۷۵ تا ۲۵۴ میلی‌متر) را به‌علت اندازه بزرگتر قالب آزمایش بررسی کرد. همچنین، با توجه به قابل کنترل

معمولاً رفتار تحکیمی خاک‌ها با استفاده از آزمایش ادنومتر<sup>۱</sup> در قالب تحکیم یک‌بعدی اندازه‌گیری می‌شود. از مزیت‌های این آزمایش می‌توان به ارزان و ساده بودن در اجرای آن اشاره کرد که موجب افزایش هرچه بیشتر استفاده از آن در آزمایشگاه‌های مکانیک خاک شده است (Casagrande, 1936). اما دستگاه تحکیم ادنومتر محدودیت‌هایی دارد که موجب کاهش کارایی آن در برخی کارهای مهندسی می‌شود. از جمله می‌توان به ناتوانی در اندازه‌گیری فشار آب منفذی طی تحکیم و نبود حالت‌های مختلف زهکشی اشاره کرد (Pitts, 1984). نش و همکاران (Nash *et al.*, 1992) می‌گویند که به‌دلیل کوچک بودن قالب دستگاه ادنومتر، بازه خاک‌های قابل آزمایش با این دستگاه کاهش می‌یابد. تحقیقات متعدد نشان داده‌اند که اندازه‌گیری پارامترهای تحکیمی خاک‌های درشت‌دانه (خاک‌هایی که ذراتی بزرگتر از ۳-۵ میلی‌متر داشته باشند) با دستگاه ادنومتر معمولی نتایج مناسبی در بر ندارد.

مشکل اصلی برای آزمایش و بررسی رفتار مهندسی خاک‌های درشت‌دانه، اندازه ذرات آنهاست. معمولاً بزرگترین اندازه ذرات قابل آزمایش با توجه به ابعاد نمونه دستگاه تنظیم می‌شود. در این خصوص ابتدا بیشینه اندازه ذرات در نمونه آزمایشگاهی (d) تعیین می‌شود. این مقدار بر اساس کوچک‌ترین بعد نمونه (D) با بهره‌گیری از مطالعات پیشین و پیشنهادهای موجود برای نسبت  $\frac{D}{d}$  تعیین می‌شود. برای تعیین نسبت  $\frac{D}{d}$  مطالعات مختلفی شده و پیشنهادهای متعددی ارائه گردیده است. برای مثال، نش و همکاران (Nash *et al.*, 1992) عدد ۱۰، پیٹس (Pitts, 1984) عدد ۵، سازمان استاندارد انگلستان<sup>۲</sup> (Anon, 1990) عدد ۶ و پنمن (Penman, 1971) حد پایین ۴ را برای دانه‌بندی عریض (خاک خوب دانه‌بندی شده) و ۶ را برای دانه‌بندی باریک (خاک با دانه‌بندی یکنواخت)، پیشنهاد کرده‌اند. با در نظر گرفتن تمامی این

1- Oedometer

3- Large-scale Oedometer

2- British Standard

4- Rowe Consolidation Test

توجه داشت تأثیر اصلاح دانه‌بندی بر رفتار تحکیمی خاک‌های درشت‌دانه رس‌دار است زیرا خاک اصلاح شده مورد آزمایش همواره با خاک اصلی تفاوت خواهد داشت. با توجه به تحقیقات پیشین، مشاهده می‌شود که تأثیر روش‌های اصلاح دانه‌بندی تاکنون به درستی در تحقیقات مشابه بررسی نشده است. از این‌رو در این پژوهش پارامترهای تحکیمی خاک‌های درشت‌دانه رس‌دار با هدف تعیین اثرهای اصلاح دانه‌بندی بررسی شده است.

### مواد و روش‌ها

در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر اصلاح دانه‌بندی بر رفتار تحکیمی خاک‌های درشت‌دانه رس‌دار، از آزمایش‌های ادنومتر و تحکیم هیدرولیکی استفاده شد. آزمایش ادنومتر روی نمونه‌های اصلاح شده و آزمایش تحکیم هیدرولیکی روی نمونه‌های اصلی اجرا شد.

### تهیه نمونه‌های خاک

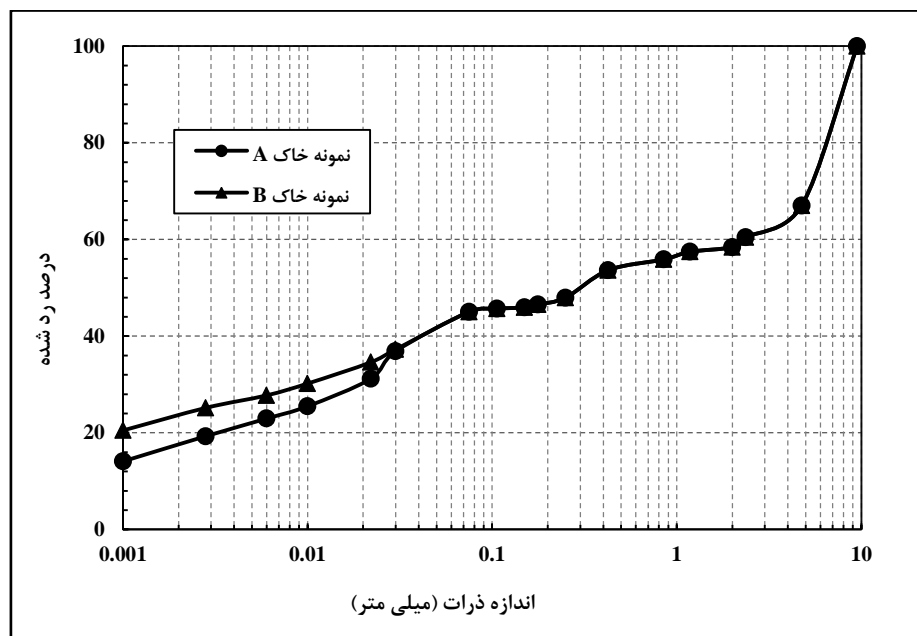
نمونه اولیه خاک شنی رس‌دار از ترکیب درصدی مختلف شن، ماسه، کائولینیت و بنتونیت ایجاد گردید. شن و ماسه مورد استفاده از ایستگاه ۲ متری تبریز تهیه شد. خاک‌های کائولینیت و بنتونیت نیز به ترتیب از شرکت‌های صنایع خاک چینی ایران و باریت فلات ایران تهیه شدند. برای تهیه نمونه‌های با دانه‌بندی اصلاح شده، بیشینه اندازه ذرات نمونه خاک (d) با توجه به اندازه کوچک‌ترین بعد نمونه دستگاه تحکیم هیدرولیکی و ادنومتر با در نظر گرفتن عدد ۶ برای نسبت  $\frac{D}{d}$  به ترتیب برابر با ۸/۳۳ و ۳/۲۸ میلی‌متر تعیین شد. با توجه به مقادیر بیشینه اندازه ذرات برای هر یک به ترتیب  $\frac{3}{8}$  الک (اینچ ۹/۵ میلی‌متر) و الک شماره ۸ (۲/۳۶ میلی‌متر) در نظر گرفته شد. نمونه اصلی برای آزمایش در دستگاه تحکیم هیدرولیکی از الک  $\frac{3}{8}$  اینچ (۹/۵ میلی‌متر) عبور داده شد و بخش درشت‌دانه آن

بودن مسیره‌های زهکشی، انواع حالت‌های تحکیمی را می‌توان طراحی و اجرا کرد. تجهیزات نصب شده روی دستگاه امکان اندازه‌گیری اطلاعات سودمندی همچون فشار آب منفذی، حجم آب خروجی، درجه اشباع و ضریب نفوذپذیری را فراهم کرده است که وضعیت کلی نمونه در حین آزمایش با استفاده از این اطلاعات به خوبی تعیین می‌شود. در حالت کلی می‌توان دستگاه تحکیم روسل را یکی از کامل‌ترین دستگاه‌ها برای ارزیابی رفتار تحکیمی انواع خاک‌ها دانست. اخیراً نیز با استفاده از این دستگاه مطالعات فراوانی شده و استفاده از آن برای تعیین تحکیم‌پذیری انواع خاک‌ها نیز پیشنهاد شده است (Abbasi et al., 2006).

افزایش اندازه قالب دستگاه ادنومتر یا استفاده از دستگاه تحکیم هیدرولیکی می‌تواند راه‌حلی مناسب برای اندازه‌گیری پارامترهای تحکیمی خاک‌های درشت‌دانه باشد، ولی در اکثر موارد، آزمایشگاه‌های مکانیک خاک از دستگاه تحکیم معمولی (ادنومتر) استفاده می‌کنند. معمولاً دستگاه تحکیم بزرگ‌مقیاس به دلیل زمان‌بر شدن و پرهزینه بودن آزمایش تهیه نمی‌شود و دستگاه تحکیم هیدرولیکی نیز به دلیل نیاز به نیروی متخصص برای کار کردن با آن و هزینه‌های بیشتر خود دستگاه و آزمایش‌ها، مورد توجه آزمایشگاه‌های مکانیک خاک قرار نمی‌گیرد. بنابراین، در اکثر موارد، نمونه‌های تحکیمی با روش‌های اصلاح دانه‌بندی اصلاح می‌شوند و با استفاده از آزمایش ادنومتر ارزیابی خواهند شد. دانه‌بندی نمونه‌های موجود معمولاً بر اساس یکی از دو روش حذفی<sup>۱</sup> (Zeller and Wullimann, 1957) یا جایگزینی<sup>۲</sup> (Frost, 1973) اصلاح می‌شوند که در روش حذفی قسمت درشت‌دانه مشخص شده از نمونه حذف می‌شود و در روش جایگزینی مصالح ریزدانه ماسه‌ای جایگزین بخش درشت‌دانه می‌شود. این روش‌ها می‌توانند بسیار مؤثر و راهگشا باشند ولی موضوعی که باید به آن

پس از آماده سازی این نمونه‌ها، خواص اولیه آنها با آزمایش‌های دانه‌بندی (Anon, 2007)، چگالی ویژه (Anon, 2014)، حدود اتربرگ (Anon, 2010) و تراکم (Anon, 2012) تعیین گردید. شکل ۱ نمودار دانه‌بندی خاک درشت‌دانه و مخلوط نمونه خاک‌های A و B و جدول ۲ مشخصات ژئوتکنیکی پایه نمونه‌های مورد آزمایش را نشان می‌دهد.

جدا گردید. به‌منظور اصلاح دانه‌بندی نمونه اصلی و آزمایش در ادنومتر، برای روش حذفی از قسمت درشت‌دانه (مانده روی الک شماره ۸) صرف‌نظر شد. در روش جایگزینی، بخش درشت‌دانه جدا و وزن شد و به همان مقدار وزنی بخش درشت‌دانه حذف شده، ماسه رد شده از الک شماره ۸ و مانده روی الک ۲۰۰ به نمونه اصلاحی اضافه شد. جدول ۱ مشخصات نمونه‌های تهیه شده در این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمودار دانه‌بندی خاک درشت‌دانه و مخلوط (نمونه خاک‌های اصلی A و B)

جدول ۱ - مشخصات کلی نمونه‌های تهیه شده در این تحقیق

نوع آزمایش	توضیحات	نمونه
تحکیم هیدرولیکی	خاک اصلی (۱۵ درصد بنتونیت، ۳۰ درصد کائولینیت، ۵۵ درصد ماسه و شن)	A
ادنومتر	خاک نوع A با دانه‌بندی اصلاح شده به روش حذفی	A-I
ادنومتر	خاک نوع A با دانه‌بندی اصلاح شده به روش جایگزینی	A-II
تحکیم هیدرولیکی	خاک اصلی (۲۵ درصد بنتونیت، ۲۰ درصد کائولینیت، ۵۵ درصد ماسه و شن)	B
ادنومتر	خاک نوع B با دانه‌بندی اصلاح شده به روش حذفی	B-I
ادنومتر	خاک نوع B با دانه‌بندی اصلاح شده به روش جایگزینی	B-II

جدول ۲ - مشخصات ژئوتکنیکی پایه مربوط به نمونه‌های مورد آزمایش

نمونه						مشخصات
B-II	B-I	B	A-II	A-I	A	
۲/۳۶	۲/۳۶	۹/۵	۲/۳۶	۲/۳۶	۹/۵	بیشینه اندازه ذرات خاک (میلی‌متر)
۲/۶۷	۲/۶۴	۲/۷۲	۲/۷	۲/۶۶	۲/۷۵	وزن مخصوص ذرات جامد
۶۴	۷۸	۷۸	۳۶	۴۸	۴۸	حد روانی (درصد)
۴۱	۴۶	۴۶	۲۳	۲۷	۲۷	حد خمیری (درصد)
۲۳	۳۲	۳۲	۱۳	۲۱	۲۱	نشانه خمیری (درصد)
۳۹	۶۳/۹۴	۳۹	۳۵	۵۷/۴	۳۵	عبور از الک شماره ۲۰۰ (درصد)
۱/۸۹	۱/۷۷	۱/۹۶	۱/۹۱	۱/۸۲	۱/۹۹	حداکثر وزن مخصوص خشک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
۱۰/۹۷	۱۴/۸۷	۱۱/۹	۱۱/۷	۱۳/۶	۱۰/۷۵	رطوبت بهینه (درصد)
SC	CH	GC	SC	CL	GC	طبقه‌بندی خاک USCS

### معرفی دستگاه تحکیم هیدرولیکی

محدودیت‌های موجود در دستگاه ادنومتر محققان را واداشت تا روی دستگاه‌های گوناگون به‌منظور تحکیم در نمونه‌های خاک تحقیق کنند. در بین این محققان رُو و باردن (Rowe & Barden, 1966) از نخستین افرادی بودند که موفق به ارائه طرحتی مناسب برای تحکیم انواع خاک‌ها شدند. دستگاه توسعه داده شده توسط این محققان به دلیل اعمال بار هیدرولیکی بعدها به دستگاه تحکیم هیدرولیکی شهرت یافت. از مزایای دستگاه تحکیم هیدرولیکی، در مقایسه با ادنومترهای معمولی، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- کنترل کردن شرایط و مسیرهای زهکشی
- داشتن امکان ثبت فشار آب منفذی و مشاهده روند استهلاک آن و نیز تعیین آغاز و پایان تحکیم اولیه
- داشتن امکان اشباع‌سازی نمونه با استفاده از اعمال پس‌فشار<sup>۱</sup>
- داشتن امکان اعمال پس‌فشار به نمونه برای شبیه‌سازی شرایط محلی

- کنترل کردن تغییر شرایط بارگذاری، بارگذاری با کرنش یکنواخت<sup>۲</sup> یا کرنش آزاد<sup>۳</sup>

- داشتن امکان اعمال فشار با مقادیر مورد نظر

- مناسب بودن برای نمونه‌های خاک درشت‌دانه و خاک‌های ناهمگن (به دلیل اندازه‌های بزرگ‌تر قالب‌های دستگاه تحکیم هیدرولیکی، در مقایسه با قالب‌های مرسوم دستگاه ادنومتر)

- تخمین زدن نشست آنی (که معمولاً در شروع آزمایش تحکیم رخ می‌دهد) به دلیل کنترل کردن زهکشی و تمیز دادن آن از نشست تحکیمی (که فقط در صورت زهکشی کردن ایجاد می‌شود).

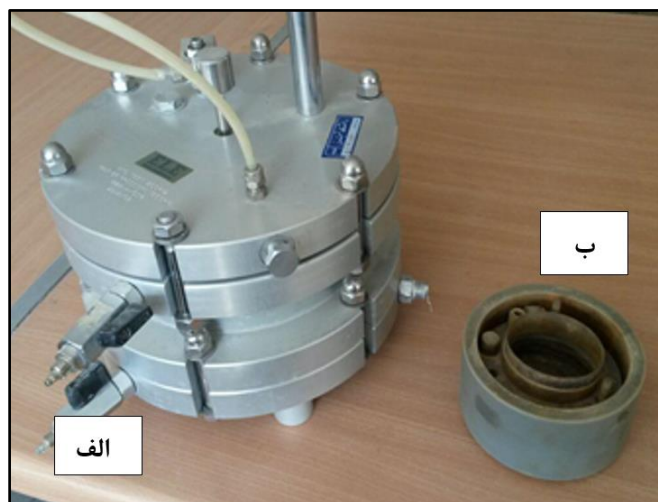
دستگاه تحکیم هیدرولیکی استفاده شده در این تحقیق ساخت شرکت ELE و دارای قطر نمونه ۱۵۱ میلی‌متر است که به‌همراه تجهیزات ضمیمه مورد نیاز آن در شکل ۲ نشان داده شده است. در این دستگاه، بارگذاری به نمونه آزمایشی به‌صورت هیدرولیکی و در اثر فشار آب به واسطه سطحی انعطاف‌پذیر انجام می‌شود.



شکل ۲- نمایی از دستگاه تحکیم هیدرولیکی به همراه تجهیزات لازم: الف) سیستم هواگیری آب، ب) دستگاه مولد فشار و ج) دیتالاگر

همچنین، امکان اعمال پس فشار به نمونه، به منظور شبیه‌سازی شرایط در محل، نیز فراهم خواهد بود در حالی که ادنومترهای معمولی چنین توانایی را ندارند. شکل ۳ دستگاه‌های تحکیم هیدرولیکی و ادنومتر مورد استفاده در آزمایش‌ها را در قیاس با یکدیگر نشان می‌دهد.

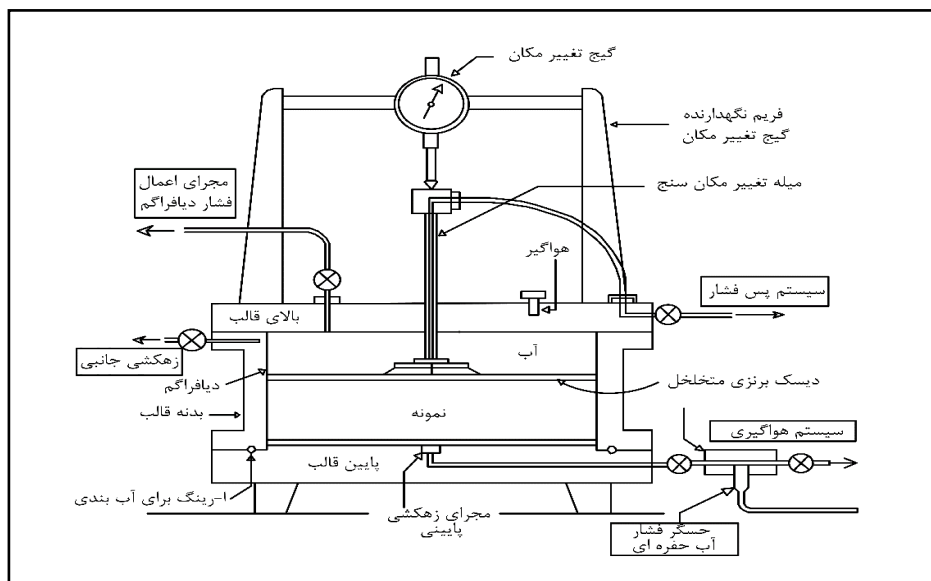
زهکشی نمونه قابل کنترل کردن است و مقادیر فشار آب منفذی را نیز می‌توان ثبت کرد. بدین منظور در سطح انتهایی دستگاه حفره‌های پوشیده از سنگ متخلخل وجود دارد که با لوله‌های رابط در داخل دستگاه به یک شیر کنترلی و سپس به دستگاه ثبت فشار متصل می‌شود.



شکل ۳- نمایی از نمونه‌های آزمایشی در قیاس با یکدیگر: الف) تحکیم هیدرولیکی و ب) ادنومتر

کنترل است (Head & Epps, 1986). جزئیات دستگاه مورد استفاده به صورت شماتیک در شکل ۴ نشان داده شده است.

اعمال فشار هیدرولیکی به صورت سربار و پس فشار و نیز اندازه‌گیری تغییرات فشار آب منفذی با استفاده از پانل‌های فشار معمولی یا یک سیستم خودکار قابل



شکل ۴- شماتیک دستگاه تحکیم هیدرولیکی (Anon, 1990)

### آزمایش تحکیم یک‌بعدی

پس از تهیه و تعیین مشخصات اولیه نمونه خاک‌ها، خواص تحکیمی آنها ارزیابی و آزمایش شد. برای این منظور، آزمایش ادنومتر بر اساس استاندارد ASTM D2435 (Anon, 2011) روی نمونه‌های اصلاح شده (نمونه استوانه‌ای با ارتفاع ۱۹/۷ و قطر ۶۲/۹ میلی‌متر) اجرا شد. علاوه بر این، نمونه خاک اصلی به شکل استوانه‌ای به قطر ۱۵۱ و ارتفاع ۵۰ میلی‌متر تهیه و با استفاده از دستگاه تحکیم هیدرولیکی، که در شکل ۲ نشان داده شده است، بر اساس استاندارد BS 1377-6 (Anon, 1990) آزمایش شد.

برای مقایسه هرچه بهتر نتایج دستگاه‌های ادنومتر و تحکیم هیدرولیکی، شرایط مرزی و اولیه در هر دو نمونه باید یکسان در نظر گرفته شود، به این منظور شرایط زهکشی دو طرفه با کرنش یکنواخت در دستگاه تحکیم هیدرولیکی نزدیک‌ترین حالت به شرایط اولیه در آزمایش ادنومتر است (Head & Epps, 1986). نمونه‌ها به روش تراکم مرطوب با درصد رطوبت بهینه و در سه لایه با تراکم نسبی ۹۰ درصد در قالب‌های تحکیم ساخته شدند. هر یک

از آزمایش‌های ادنومتر و تحکیم هیدرولیکی با اعمال تنش‌های قائم برابر با ۵، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ کیلوپاسکال و گام‌های باربرداری تا ۲۵ و ۵ کیلوپاسکال اجرا گردید.

در آزمایش‌های اجرا شده در دستگاه تحکیم هیدرولیکی، ابتدا نمونه‌ها به روش افزایش پس‌فشار، با ارزیابی و محاسبه ضریب اسکمپتون<sup>۱</sup> اشباع شده سپس مقدار پس‌فشار تا انتهای آزمایش ثابت نگه‌داشته می‌شد. فشارهای سربار متناسب با مقادیر پس‌فشارها تا رسیدن به تنش‌های مؤثر مورد نظر افزایش داده می‌شد. به‌عبارت دیگر، در هر مرحله از آزمایش با بسته نگه‌داشتن شیر زهکشی مقدار سربار افزایش داده می‌شد و تغییرات فشار منفذی تا ثابت ماندن آن قرائت می‌گردید؛ سپس با باز نگه‌داشتن شیر زهکشی که به پس‌فشار مرحله اشباع متصل است، فرآیند تحکیم آغاز می‌شد. مدت‌زمان هر مرحله از تحکیم ۲۴ ساعت و مدت‌زمان اشباع‌سازی نمونه‌ها نیز حدود ۴۸-۲۴ ساعت به طول انجامید. جدول ۳، نتایج اشباع‌سازی نمونه خاک اصلی B را نشان می‌دهد.

جدول ۳- نتایج حاصل از مراحل اشباع‌سازی نمونه خاک اصلی B

$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma}$	$\Delta \sigma$ (کیلوپاسکال)	$\Delta u$ (کیلوپاسکال)	فشار آب حفره‌ای (U) (کیلوپاسکال)	پس فشار (کیلوپاسکال)	فشار دیافراگم ( $\sigma$ ) (کیلوپاسکال)
۰/۲۶	۱۵/۴۶	۴	۱۲/۷	۱۶/۵	۲۶/۰۸
			۱۶/۷	-	۴۱/۵۴
۰/۶۶	۱۲/۷۸	۸/۴	۲۴	۲۹	۴۱/۵۴
			۳۲/۴	-	۵۴/۳۲
۰/۸۴	۱۵/۱۵	۱۲/۷	۳۸/۳	۴۴	۵۴/۳۲
			۵۱	-	۶۹/۴۷
۰/۹۷	۱۳/۸۹	۱۳/۴۶	۵۲/۲۴	۵۸/۳۶	۶۹/۴۷
			۶۵/۷	-	۸۳/۳۶

### بحث و نتایج

#### ضریب تحکیم

نمودارها می‌توان دید که بیشترین مقدار نشست در خاک پایه B ثبت شده است. برای مثال مقادیر نشست کل برای نمونه‌های B، B-I و B-II به ترتیب برابر با ۴/۷۸، ۳/۷۷ و ۳/۰۱ میلی‌متر است. دلیل بیشتر بودن مقدار نشست در خاک B که خاک درشت‌دانه پایه است، استفاده از دستگاه تحکیم هیدرولیکی است که نمونه بزرگتری (ارتفاع: ۵۰ میلی‌متر) دارد. همچنین می‌توان مشاهده کرد که مقدار نشست در نمونه B-I که به روش حذفی اصلاح شده نسبت به نمونه B-II، اصلاح شده به روش جایگزینی، بیشتر است. با توجه به اینکه هر دو نمونه با استفاده از دستگاه ادئومتر آزمایش شده‌اند، بیشتر بودن مقادیر نشست در نمونه B-I به دلیل بیشتر بودن سهم خاک رس موجود در این نمونه است. باید دقت کرد که در روش جایگزینی، خاک ماسه ای ریزدانه جایگزین قسمت درشت‌دانه خاک می‌شود ولی در روش حذفی، قسمت درشت‌دانه خاک حذف می‌شود. بنابراین، سهم خاک رس در نمونه‌های اصلاح شده به روش حذفی بیشتر از سهم خاک رس در نمونه‌های اصلاح شده به روش جایگزینی است. نتایجی مشابه با آنچه برای خاک B گفته شد برای خاک نوع A نیز به دست آمده است. به طوری که نشست کل برای نمونه‌های A، A-I و A-II به ترتیب برابر با ۳/۶۳، ۳/۲۷ و ۲/۹۷ میلی‌متر است.

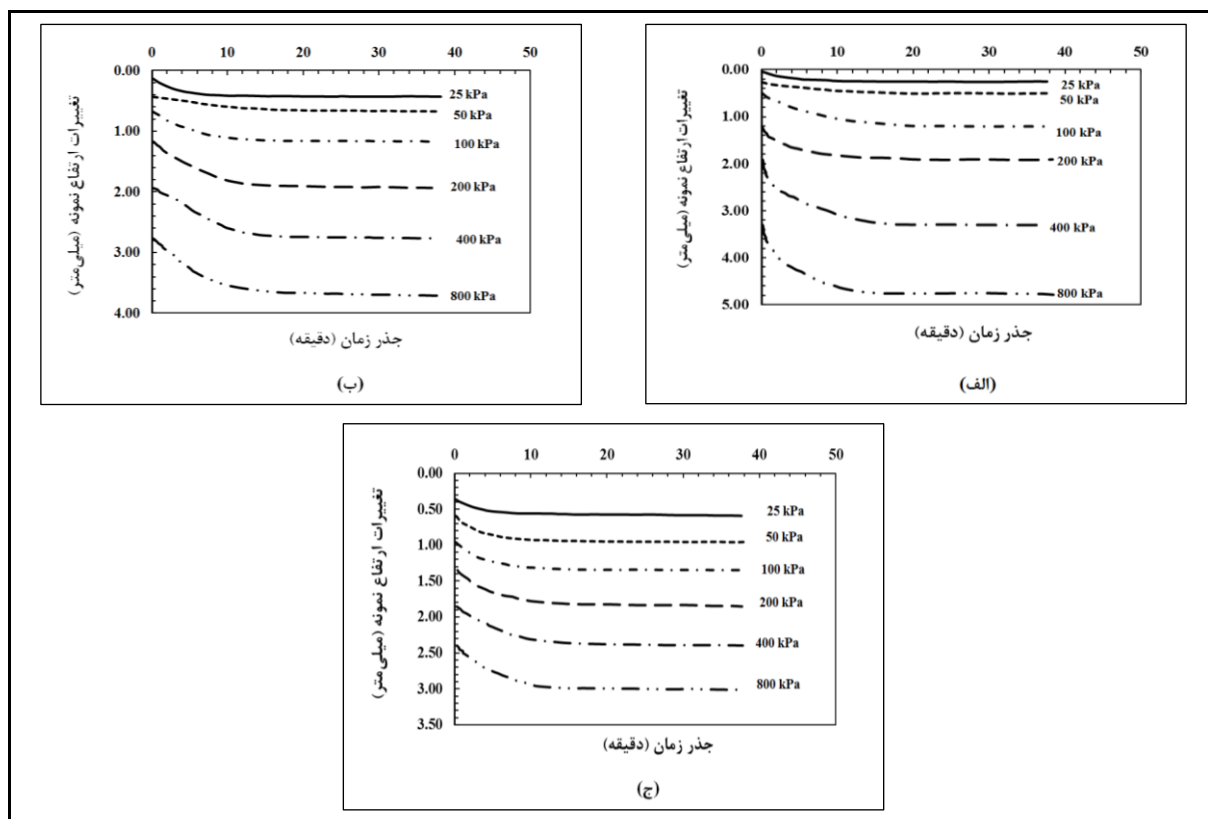
مقادیر ضریب تحکیم با استفاده از نتایج آزمایش‌ها و با بهره‌گیری از روش جذر زمان تعیین شد. در این روش، زمان مربوط به ۹۰ درصد تحکیم به صورت ترسیمی مشخص شده است و پس از آن با در نظر گرفتن فاکتور زمان متناظر با این درصد تحکیم ( $T_v=0/848$ )، مقدار ضریب تحکیم از رابطه ۱ برای هر مرحله بارگذاری محاسبه شده است.

$$C_v = \frac{T_v H_d^2}{t_{90}} \quad (1)$$

که در آن،

$C_v$  = ضریب تحکیم؛  $T_v$  = فاکتور زمان؛  $H_d$  = طول مسیر زهکشی؛ و  $t_{90}$  = زمان مربوط به ۹۰ درصد تحکیم. شکل شماره ۵ تغییرات ارتفاع نمونه در مقابل جذر زمان را برای تنش‌های قائم مختلف در نمونه خاک B نشان می‌دهد. از این منحنی‌ها برای محاسبه مقادیر ضریب تحکیم به روش جذر زمان استفاده شده است. با دقت کردن در این نمودارها می‌توان دریافت که در اکثر بارگذاری‌ها، بیشترین مقدار نشست در ۱۰۰ دقیقه ابتدای بارگذاری رخ داده است. همچنین، با توجه دقیق‌تر به این



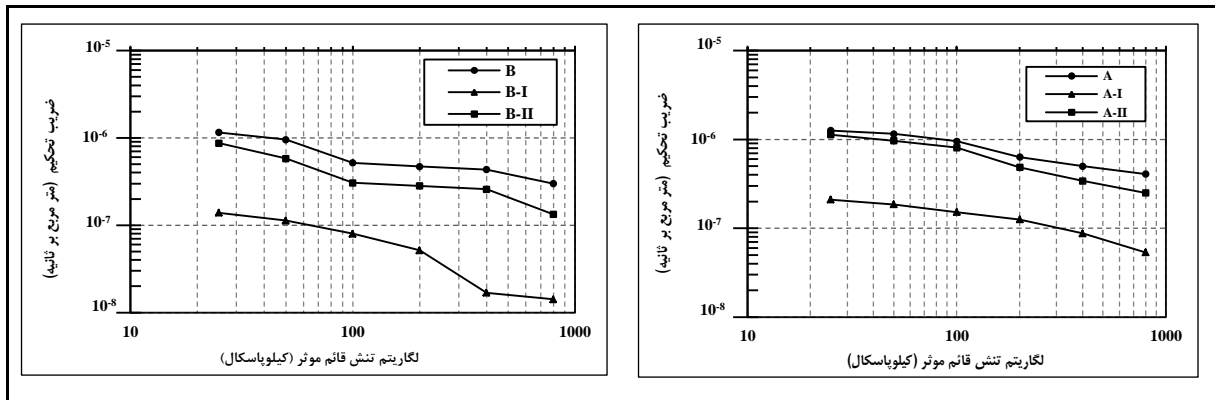


شکل ۵ - منحنی  $e - \sqrt{t}$  برای: الف) خاک پایه B، ب) خاک اصلاح شده B-I و ج) خاک اصلاح شده B-II

نمونه‌ها، مقادیر ضریب تحکیم به مقادیر مرتبط با نمونه خاک اصلی بسیار نزدیک‌اند. بنابراین، اصلاح دانه‌بندی به روش جایگزینی، می‌تواند روشی مناسب‌تر نسبت به روش حذفی برای پیدا کردن ضریب تحکیم در نمونه اصلی باشد.

همچنین می‌توان مشاهده کرد که با افزایش درصد بنتونیت در نمونه خاک‌های B نسبت به A، ضریب تحکیم کاهش می‌یابد. به طوری که با افزایش درصد بنتونیت، اختلاف ضرایب تحکیم خاک‌های اصلی و اصلاح شده بیشتر می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که هرچه خصوصیات (پتانسیل) تحکیمی بخش ریزدانه خاک اصلی کمتر باشد، مقادیر ضریب تحکیم خاک‌های اصلاح شده به مقادیر اصلی نزدیک‌تر خواهد بود.

شکل ۶ منحنی‌های مقادیر ضرایب تحکیم هر مرحله بارگذاری را ارائه می‌دهد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که مقادیر ضریب تحکیم برای تمامی نمونه‌ها با افزایش تنش مؤثر، کاهش می‌یابد. علاوه بر این، مقدار ضریب تحکیم برای خاک اصلی بیشتر از مقدار ضریب تحکیم برای نمونه‌های اصلاح شده است. همچنین، اصلاح دانه‌بندی به روش حذفی موجب کاهش بیشتر در مقادیر ضریب تحکیم می‌شود به طوری که نمونه‌های A-I و B-I کمترین مقادیر ضریب تحکیم را دارند. دلیل این پدیده را می‌توان در درصد بالای بخش ریزدانه رس‌دار در این نمونه‌ها دانست. نتیجه دیگری که قابل مشاهده است اختلاف ناچیز بین مقادیر مرتبط با نمونه‌های اصلاح شده به روش جایگزینی و خاک اصلی است. در این

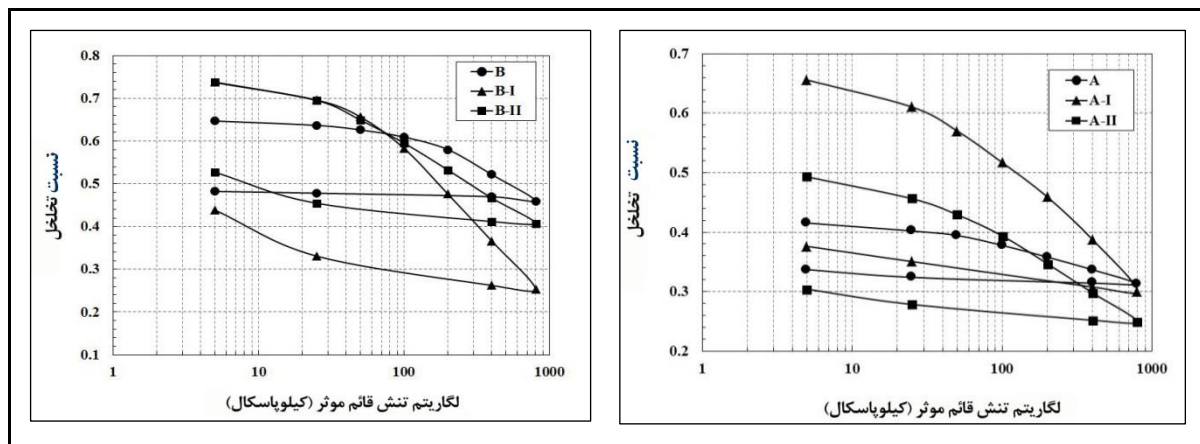


شکل ۶- نمودار ضرایب تحکیم روی نمونه‌های مورد آزمایش

است. دلیل این روند را می‌توان در حذف خاک درشت‌دانه در حین اصلاح دانه‌بندی جستجو کرد. با حذف کردن خاک درشت‌دانه، سهم خاک ریزدانه افزایش پیدا می‌کند که موجب تغییرات بیشتر در نسبت تخلخل خاک می‌شود. همچنین می‌توان از این نمودار دریافت که تغییرات نسبت تخلخل نمونه خاک اصلاح شده به روش جایگزینی، در مقایسه با خاک اصلاح شده به روش حذفی، بسیار نزدیک‌تر به خاک اصلی است که نشان‌دهنده تطابق بیشتر این نمونه با خاک اصلی است.

### منحنی $e-\log p$

شکل ۷ نمودار تغییرات نسبت تخلخل در مقابل لگاریتم تنش مؤثر را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که نمونه خاک اصلاح شده به روش حذفی بیشترین تغییرات را نسبت تخلخل در مراحل بارگذاری و باربرداری دارد. برای مثال، مقادیر نسبت تخلخل برای نمونه B-I در انتهای فاز بارگذاری از ۰/۷۵ به ۰/۲۵ تغییر یافته است در حالی که برای نمونه B-II، تغییرات در این ناحیه ۰/۷۵ تا ۰/۴۱ است و برای خاک B، از ۰/۶۵ به ۰/۴۶ کاهش پیدا کرده



شکل ۷- نمودار تغییرات نسبت تخلخل در مقابل لگاریتم فشار

دریافت که مقادیر ضریب فشردگی در خاک B در مقایسه با مقادیر ضریب فشردگی در خاک A بیشتر است که دلیل آن بیشتر بودن مقدار خاک بنتونیت در این نمونه است. همچنین مشاهده می‌شود که مقادیر ضریب فشردگی خاک اصلی کمتر از مقادیر ضریب فشردگی هر دو نوع خاک اصلاح شده است. برای مثال، مقدار ضریب فشردگی برای خاک B در تنش مؤثر ۲۵ کیلوپاسکال برابر با ۰/۰۱۴ است که کمتر از مقادیر متناظر برای نمونه‌های B-I (۰/۰۶۰) و B-II (۰/۰۵۹) است. همچنین با افزایش تنش مؤثر، مقادیر ضریب فشردگی نیز افزایش می‌یابد. علاوه بر این، خاک اصلاح شده به روش جایگزینی دارای تطابق بیشتری با خاک اصلی است. بنابراین، از لحاظ تعیین ضریب فشردگی در آزمایش تحکیم نیز روش جایگزینی روشی بهتر از روش حذفی برای اصلاح دانه‌بندی است.

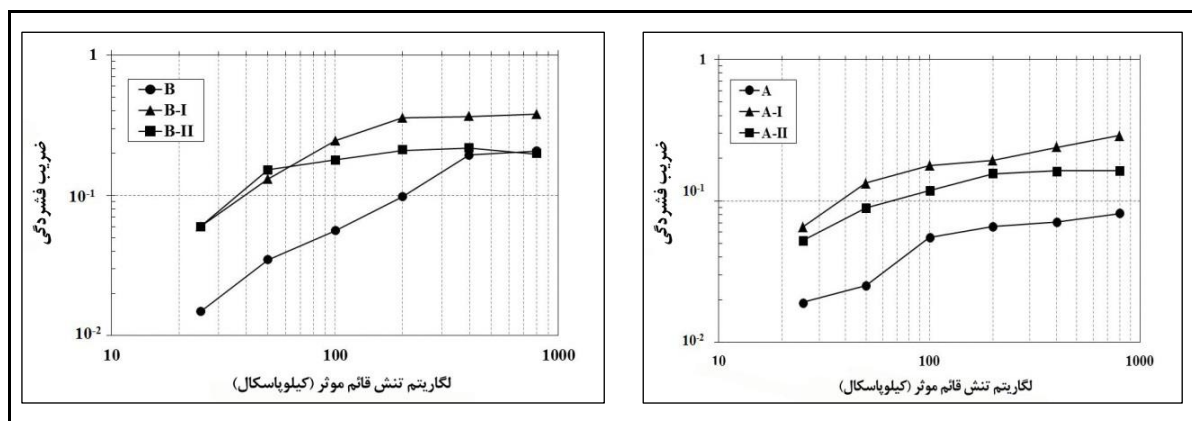
### تغییرات ضریب فشردگی

ضریب فشردگی یکی از پارامترهای مهم در تعیین خصوصیات تحکیمی خاک‌هاست. در این تحقیق برای محاسبه این ضریب از شیب نمودار  $e-\log p$  روی خط تحکیم عادی یافته<sup>۱</sup> بر اساس رابطه<sup>۲</sup> استفاده شده است:

$$C_c = \frac{e_2 - e_1}{\log \frac{(p)_2}{(p)_1}} \quad (2)$$

که در آن،

$C_c$  = ضریب فشردگی؛  $e$  = نسبت تخلخل؛ و  $p$  = تنش مؤثر. همچنین زیرنویس‌های ۱ و ۲ به دو نقطه انتخاب شده روی خط تحکیم عادی یافته مربوط می‌شوند. تغییرات ضریب فشردگی تمامی نمونه‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است. با دقتی شدن در این نمودار می‌توان



شکل ۸- نمودار تغییرات ضریب فشردگی در برابر تنش مؤثر

گردید. با در نظر گرفتن نتایج آزمایش‌ها می‌توان به موارد زیر به‌عنوان نتایج این تحقیق اشاره کرد:

- با اصلاح دانه‌بندی، مقادیر ضریب تحکیم کاهش می‌یابد. ضریب تحکیم در نمونه‌های اصلاح شده به روش جایگزینی و حذفی به ترتیب در حدود ۳۰ و ۸۰ درصد نسبت به مقادیر آن در نمونه‌های اصلی کاهش دارد.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر اصلاح دانه‌بندی خاک‌های درشت‌دانه شنی رس‌دار بر رفتار تحکیمی آن بررسی شد. برای دستیابی به این هدف، آزمایش‌های متعددی با دستگاه تحکیم هیدرولیکی روی نمونه خاک اصلی و با استفاده از دستگاه اِدئومتر روی نمونه‌های اصلاح شده اجرا

- بنابراین، اصلاح دانه‌بندی به روش جایگزینی دارای مقادیر ضریب تحکیم نزدیک‌تری به خاک اصلی است.
- با افزایش درصد بنتونیت از ۱۵ به ۲۵ (به مقدار ۱۰ درصد) در نمونه خاک B نسبت به A، ضریب تحکیم در حدود ۲۰ درصد کاهش می‌یابد. با افزایش درصد بنتونیت، اختلاف ضرایب تحکیم خاک‌های اصلی و اصلاح شده در حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد بیشتر می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که هرچه بخش ریزدانه خاک اصلی خصوصیات تحکیمی پایین‌تری داشته‌باشد، مقادیر ضریب تحکیم خاک‌های اصلاح شده به مقادیر ضریب تحکیم خاک اصلی نزدیک‌تر خواهد بود.
- نمونه خاک اصلاح شده به روش حذفی دارای بیشترین تغییرات نسبت تخلخل در مراحل بارگذاری و باربرداری است. همچنین، تغییرات نسبت تخلخل نمونه خاک اصلاح شده به روش جایگزینی مشابه با تغییرات نسبت تخلخل نمونه خاک اصلی است.
- با اصلاح دانه‌بندی خاک شنی رس‌دار، مقادیر ضریب فشردگی در روش‌های حذفی و جایگزینی به ترتیب ۲/۵ و ۱/۵ برابر افزایش می‌یابد. بنابراین روش حذفی، در مقایسه با روش جایگزینی، افزایش بیشتری نشان می‌دهد.
- در حالت کلی با توجه به آزمایش‌ها می‌توان روش جایگزینی را به مراتب مناسب‌تر از روش حذفی برای اصلاح دانه‌بندی خاک‌های درشت‌دانه شنی رس‌دار دانست زیرا خواص تحکیمی که این روش ارائه می‌دهد، در مقایسه با روش حذفی، بسیار نزدیک‌تر به خاک اصلی است.

## منابع

- Abbasi, N., Rahimi, H. and Fakher, A. 2006. Evaluation of compressibility behavior of soft fine-grained soils using hydraulic consolidation test. J. Agric. Eng. Res. 6(4): 95-112. (in Persian)
- Abu-Farsakh, M. and Yu, X. 2012. Comparison of predicted embankment settlement from piezocone penetration test with field measurement and laboratory estimated. 4<sup>th</sup> International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization (ISC-4). Sep. 18-21. Porto de Galinhas. Pernambuco, Brazil.
- Anon. 1990. Methods of tests for soils for civil engineering purposes. Part 6: consolidation and permeability tests in hydraulic cells and with pore pressure measurement. British Standards Institutions. BS 1377. London, UK.
- Anon. 2007. Standard test method for particle-size analysis of soils (ASTM D422). West Conshohocken, PA, ASTM International.
- Anon. 2010. Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. ASTM D4318. West Conshohocken, PA, ASTM International.
- Anon. 2011. Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading (ASTM D2435). West Conshohocken, PA, ASTM International.
- Anon. 2012. Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12 400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>)). ASTM D698. West Conshohocken, PA, ASTM International.
- Anon. 2014. Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer. ASTM D854. West Conshohocken, PA, ASTM International.

- Casagrande, A. 1936. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Harvard University, Cambridge.
- Frost, R. 1973. Some testing experiences and characteristics of boulder-gravel fill in earth dams. A Symposium Presented at the Seventy-Fifth Annual Meeting of American Society for Testing and Materials (Evaluation of Relative Density and its Role in Geotechnical Projects Involving Cohesionless Soils). June 25-30. California.
- Head, K. H. and Epps, R. 1986. Manual of soil laboratory testing. Pentech Press. London.
- Kongkitkul, W., Kongwisawamitr, K., Suwanwattana, V., Thaweeprasart, V. and Sukkarak, R. 2014. Comparisons of one-dimensional consolidation characteristics of clays by using two different specimen sizes [C]. GeoShanghai International Conference. May 26-28. Shanghai, China.
- Mokhtari, M., Shariatmadari, N. and Salehzadeh, H. 2015. Design and fabrication of a large-scale oedometer. J. Cent. South Univ. 22(3): 931-936.
- Nash, D., Powell, J. and Lloyd, I. 1992. Initial investigations of the soft clay test site at Bothkennar. Geotechnique. 42(2): 163-181.
- Penman, A. 1971. Rockfill, Building Research Station. Garston, Watford: BRE.
- Pitts, J. 1984. A review of geology and engineering geology in Singapore. Q. J. Eng. Geol. Hydroge. 17(2): 93-101.
- Rowe, P. W. and Barden, L. 1966. A new consolidation cell. Geotechnique. 16(2): 162-170.
- Salem, M. and El-Sherbiny, R. 2014. Comparison of measured and calculated consolidation settlements of thick underconsolidated clay. Alexandria Eng. J. 53(1): 107-117.
- Zeller, J. and Wullimann, R. 1957. The Shear Strength of the Shell Materials for the Göschenenalp Dam, Switzzelland. Butterworths Scientific Pub.



## **Investigation on the Effects of Modified Gradation on Consolidation Behavior of the Coarse Grained Clayey Soils**

**S. Nematzadeh<sup>\*</sup>, S. Hajjalilue-Bonab and H. Vafaei-Molamahmoud**

<sup>\*</sup> Corresponding Author: M. Sc. Student, Geotechnic Department of Civil Faculty, Tabriz University, Tabriz, Iran. Email: snematzadeh.civil@yahoo.com

Received: 24 September 2016, Accepted: 14 January 2017

The determination of consolidation properties of the clayey soils is one of the most important steps in designing and constructing the civil engineering projects; especially, irrigation and drainage projects. It is mainly important due to the fact that the settlement of these soils may cause a significant damage to the structures. Generally, the consolidation behavior of the soils is being evaluated by Oedometer in the form of one-dimensional consolidation. However, some modified gradation techniques should be employed in order to prepare samples of coarse grained clayey soils due to the smaller size of the test mold, which causes an alteration in the soil gradation. The hydraulic consolidation cell provides controlling drainage pathways and recording the pore pressure of the specimens during the test. The main objective of this study is to investigate the alterations made on coarse grained soils due to modified gradation. In this regard, the coarse grained clayey soils were grade modified by using scalped and replacement methods. Then, the consolidation behavior of the graded and modified specimens was tested by oedometer test. Moreover, the base soil specimens were tested by using hydraulic consolidation test. The results showed that by performing modified gradation techniques, the values of compression index and coefficient of consolidation, respectively, increases 1.5 to 2.5 time and decreases 30% to 80%. These alterations are more intense in grade modified specimens with sculpted method. Thus, the replacement method is a better approach for evaluating the consolidation behavior of coarse grained clayey soils, by providing closer values.

**Keywords:** Coefficient of Consolidation, Compression Index, Hydraulic Consolidation Cell, Modified Gradation