



تأثیر اندازه ذرات و درجه اشباع بر پتانسیل روانگرایی خاک ماسه‌ای

غلامعلی جعفرزاده ایمن آبادی، سید ابوالحسن نائینی^{*}، رضا ضیائی مؤید

دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۱۴
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۷/۲۶
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۱۹
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۰/۱۱

کلمات کلیدی:

خاک غیراشباع
اندازه ذرات
پتانسیل روانگرایی
آزمایش سه محوری دینامیکی
ماسه سست

خلاصه: در سال‌های اخیر، بررسی خصوصیات مقاومتی خاک‌های غیراشباع با توجه به اهمیت مکش در این نوع خاک‌ها بیشتر محدود به خاک‌های ریزدانه چسبنده یا خاک‌های ماسه‌ای با تراکم بالا بوده است و تحقیقات کمی در مورد روانگرایی خاک‌های ماسه‌ای سست در حالت غیراشباع و تأثیر اندازه ذرات بر این رفتار انجام شده است. در این تحقیق سعی شده است تا با انجام یک سری آزمایش‌های سه محوری سیکلیک در شرایط زهکشی نشده بر روی سه نوع ماسه با دانه‌بندی‌های مختلف، تأثیر اندازه ذرات و درجه اشباع بر مقاومت روانگرایی خاک‌های ماسه‌ای سست غیراشباع بررسی گردد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که تغییرات فشار آب حفره‌ای و مقاومت روانگرایی در ماسه‌های مورد مطالعه تا حدود زیادی وابسته به اندازه ذرات و نسبت تخلخل بین دانه‌ای می‌باشد، به طوری که ماسه ۱۳۱ فیروزکوه به دلیل بیشتر بودن نسبت تخلخل بین دانه‌ای دارای کمترین مقاومت روانگرایی در حالت اشباع بین ماسه‌های مورد مطالعه می‌باشد. همچنین طبق نتایج به دست آمده، افزایش اندازه دانه‌های ماسه، مکش بافتی ایجاد شده در توده خاک به دلیل کاهش درجه اشباع را کاهش می‌دهد. افزایش تعداد سیکل‌های وقوع روانگرایی و در نتیجه آن مقاومت روانگرایی نمونه‌های ماسه مورد مطالعه در اثر کاهش درجه اشباع به خصوص در ماسه‌های دارای دانه‌های ریزتر از دیگر نتایج این تحقیق می‌باشد.

۱- مقدمه

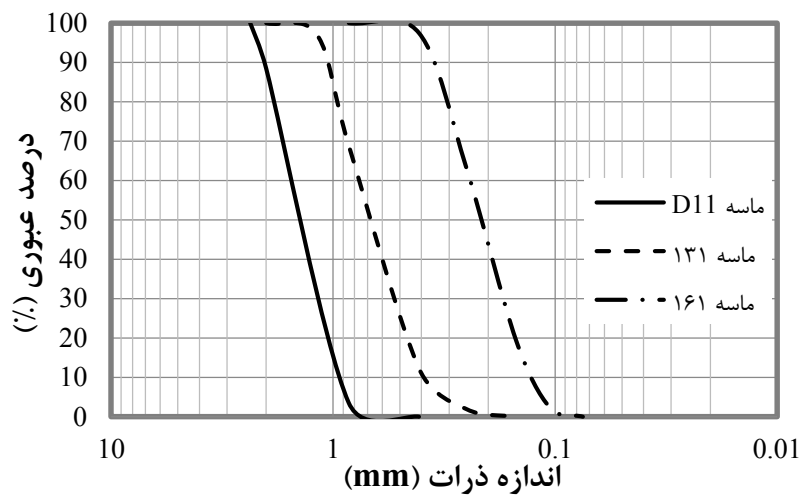
در ارزیابی احتمال وقوع روانگرایی خاک هنگام زلزله، لایه‌های خاک واقع در بالای سطح آب زیرزمینی به طور کلی غیر روانگرا فرض می‌شوند. در بالای سطح آب زیرزمینی، لایه‌های خاک غیراشباع وجود دارد، که اندازه‌گیری‌های میدانی بیانگر وجود فشار منفذی منفی در این لایه‌های خاک می‌باشد [۱]. به طور ضمنی فرض بر این بوده است که در طی زلزله، روانگرایی در خاک‌های غیراشباع اتفاق نمی‌افتد، زیرا حباب‌های هوای حفره‌ای مانند بالشتک رفتار می‌کند و گسترش فشار آب حفره‌ای بیش از حد دشوار است. این در حالی است که، در طی زلزله‌های اخیر، تعدادی از شیب‌های تشکیل شده از لایه‌های خاک غیراشباع تغییر شکل زیادی مشابه آنچه که در زمان روانگرایی رخ می‌دهد را تجربه کرده‌اند. بنابراین بررسی رفتار سیکلیک و پتانسیل رخداد روانگرایی در این نوع خاک‌ها ضروری به نظر می‌رسد [۲]. وابستگی رفتار خاک‌های غیراشباع به مکش در توده خاک تحت شرایط مختلف زهکشی شامل، هوا و آب حفره‌ای زهکشی شده، مکش ثابت، هوا و آب حفره‌ای زهکشی نشده توسط تعدادی از محققین بررسی شده است که

نتایج آن‌ها حاکی از افزایش مقاومت روانگرایی و مقاومت برشی زهکشی نشده این نوع خاک‌ها می‌باشد [۱۰-۳]. اونو و همکاران^۱ [۹] به بررسی رفتار سیکلیک ماسه غیراشباع متراکم در مکش‌های کم تحت شرایط کاملاً زهکشی نشده پرداختند. نتایج کار ایشان نشان می‌دهد که روانگرایی در ماسه‌های غیراشباع زمانی رخ می‌دهد که فشار آب حفره‌ای و فشار هوای حفره‌ای برابر با تنش کل اولیه شوند. کیموتو و همکاران^۲ [۱۱] به این نتیجه رسیدند که کاهش تنش مؤثر تا رسیدن به روانگرایی به واسطه افزایش فشار آب منفذی ادامه پیدا می‌کند و تغییر حجم نمونه‌ها در تعداد سیکل‌های اولیه اتفاق می‌افتد. همچنین، طبق نتایج به دست آمده، افزایش سرعت اعمال کرنش سیکلیک باعث افزایش فشار آب حفره‌ای می‌شود. سوکاموتو و همکاران^۳ [۱۲] در تحقیقات خود روی ماسه لای دار غیراشباع به این نتیجه رسیدند که، مقادیر مکش در خاک‌های ماسه‌ای خیلی کم است و در مقایسه با خاک‌های رسی حتی در تراکم‌های بالا ناچیز می‌باشد. همچنین، کاهش

- 1 Unno et al.
- 2 Kimoto et al.
- 3 Tsukamoto et al.

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Naeini_h@ikiu.ac.ir





شکل ۱. منحنی دانه‌بندی ماسه‌های مورد مطالعه

Fig. 1. Grain size distribution curve of studied sands

نمونه‌سازی و غیراشباع کردن این نوع خاک‌ها را نمایان می‌سازد. از سوی دیگر، تاکنون مطالعه‌ای در خصوص تاثیر اندازه ذرات بر روانگرایی ماسه‌ها در حالت غیراشباع انجام نشده است. به همین منظور، در این تحقیق با در نظرگیری سه نوع ماسه سست غیراشباع با دانه‌بندی‌های مختلف، علاوه بر بررسی تاثیر درجه اشباع بر مقاومت روانگرایی ماسه، تاثیر اندازه ذرات نیز در این زمینه با انجام یک سری آزمایش‌های سه محوری سیکلیک زهکشی نشده در دو حالت اشباع و غیراشباع بررسی خواهد شد.

۲- مواد و مصالح مصرفی

در این تحقیق به منظور بررسی تاثیر اندازه ذرات بر پتانسیل روانگرایی از سه نوع خاک ماسه‌ای با دانه‌بندی‌های مختلف شامل، ماسه فیروزکوه ۱۶۱، ۱۳۱ و D11 استفاده شده است. منحنی دانه‌بندی خاک‌های مورد مطالعه طبق استاندارد ASTM D422-63 در شکل ۱ و خصوصیات فیزیکی آن‌ها در جدول ۱ ارائه گردیده است. طبق سیستم طبقه‌بندی متحد (USCS) هر سه خاک مورد مطالعه از نوع ماسه یکنواخت و بد دانه‌بندی شده (SP) با متوسط اندازه سنگدانه، به ترتیب، برابر با ۰/۲۲، ۰/۶۸ و ۱/۳۶ می‌باشند.

مقاومت سیکلیک با افزایش درجه اشباع از نتایج این تحقیق می‌باشد. افزایش سختی در سیکل‌های اولیه بارگذاری و افزایش مقاومت روانگرایی با تغییرات جزئی در درجه اشباع و مکش اولیه نمونه‌های ماسه‌ای ریزدانه از جمله نتایج به دست آمده از مطالعات ورنی و همکاران^۱ [۱۳] می‌باشد. سوکاموتو [۱۴] در تحقیقات خود روی رفتار سیکلیک خاک‌های ماسه لای دار متراکم غیراشباع، افزایش ۲ تا ۳ برابری مقاومت روانگرایی با کاهش درجه اشباع را گزارش داده است. مل و همکاران^۲ [۱۵] و مل و فلورا^۳ [۱۶] در تحقیقات خود روی سه نوع خاک ماسه‌ای با درصد‌های مختلف ریزدانه لای در تراکم‌های متوسط و زیاد، افزایش مقاومت روانگرایی را با کاهش درجه اشباع نتیجه‌گیری کرده‌اند. ترن و همکاران^۴ [۱۷] در مطالعات خود روی ماسه متراکم در درجات اشباع مختلف به این نتیجه رسیدند که، کاهش درجه اشباع تاثیر قابل ملاحظه‌ای در افزایش تعداد سیکل‌های منجر به روانگرایی دارد. به طوری که در CSR ثابت، کاهش درجه اشباع از ۱۰۰ به ۸۰ باعث افزایش حدود ۲۰۰ درصدی مقاومت روانگرایی می‌شود.

مرور تحقیقات پیشین، فقدان مطالعات پیرامون روانگرایی خاک‌های ماسه‌ای سست در حالت غیراشباع به دلیل مکش‌های پایین و سختی

- 1 Vernay et al.
- 2 Mele et al.
- 3 Mele and Flora
- 4 Tran et al.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی ماسه‌های مورد مطالعه

Table 1. Physical properties of studied sands

ویژگی	مقدار		
	ماسه ۱۶۱	ماسه ۱۳۱	ماسه D11
D_{50} (mm)	۰/۲۲	۰/۶۸	۱/۳۶
C_u	۱/۷۱	۱/۸۸	۱/۶۳
C_c	۰/۸۶	۰/۹۷	۱/۲۲
G_s	۲/۶۵	۲/۶۲	۲/۶۶
e_{max}	۰/۸۵۵	۰/۸۹۷	۰/۸۵۶
e_{min}	۰/۵۵۹	۰/۵۸۰	۰/۵۳۸
طبقه‌بندی خاک	SP	SP	SP

۳- نمونه‌سازی و انجام آزمایش‌ها

۳-۱- روش نمونه‌سازی

در این تحقیق از روش تراکم کاهش یافته^۱ طبق روابط لد^۲ [۱۸] و بین و همکاران^۳ [۱۹] (رابطه ۱) برای ساخت نمونه‌های ماسه‌ای سست به قطر ۵۰ و ارتفاع ۱۰۰ mm استفاده شده است.

$$U_n = U_{n1} - \left[\frac{U_{n1} - U_{nj}}{j-1} (n_i - 1) \right] \quad (1)$$

در این رابطه، U_{ni} درصد کاهش تراکم برای هر لایه؛ U_{n1} درصد کاهش تراکم برای لایه اول که با استفاده از روش سعی و خطا با تزریق ژلاتین به داخل نمونه و اندازه‌گیری نسبت تخلخل در بخش‌های مختلف نمونه به دست می‌آید (برای ماسه ۱۶۱، ۱۳۱ و D11، به ترتیب، ۳، ۴ و ۷٪ به دست آمده است)؛ U_{nj} درصد کاهش تراکم برای لایه آخر (معمولاً صفر در نظر گرفته می‌شود) و j تعداد کل لایه‌ها (در این تحقیق برابر با ۵ لایه) می‌باشد.

پس از تعیین U_{ni} ، از رابطه ۲ جهت تعیین ضخامت مصالح متراکم شده در هر لایه استفاده می‌شود.

$$h_n = \frac{h_t}{j} \left[(n_i - 1) + \left(1 + \frac{U_{ni}}{100} \right) \right] \quad (2)$$

در رابطه بالا، h_t ارتفاع نمونه می‌باشد.

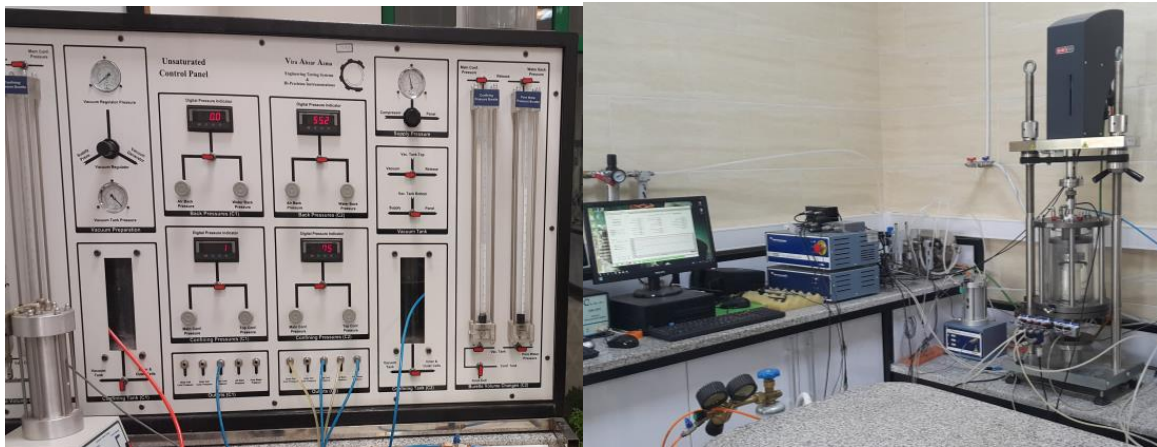
در این تحقیق درصد تراکم نسبی در زمان نمونه‌سازی به گونه‌ای انتخاب شده است که پس از تحکیم، تراکم نسبی کلیه نمونه‌ها در محدوده ۳۰٪ باشد.

۳-۲- آزمایش سه محوری دینامیکی

در این تحقیق به منظور بررسی پتانسیل روانگرایی ماسه‌های مورد مطالعه در دو حالت اشباع و غیراشباع از سلول سه محوری دو جداره غیراشباع مطابق شکل ۲ استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، پدستال پایین نمونه دارای دو مجرای ورودی و خروجی به داخل نمونه می‌باشد که یکی از آن‌ها به دیسک سرامیکی با عدد ورودی هوای kPa ۱۰۰ متصل می‌باشد و ورودی و خروجی دیگر از طریق سنگ متخلخل فلزی و کاغذ صافی جهت اشباع کردن نمونه به آن متصل می‌شود. در پدستال بالای نمونه نیز دو مجرا وجود دارد که یکی از آن‌ها جهت اعمال پس فشار^۴ در زمان اشباع‌سازی نمونه و دیگری جهت اعمال فشار هوا در مرحله غیراشباع کردن نمونه مورد استفاده قرار می‌گیرند. علت اعمال پس فشار از بالای نمونه اطمینان از تماس کامل نمونه خاک با دیسک سرامیکی در کلیه

- 1 under-compaction
- 2 Ladd
- 3 Been et al.

4 Back pressure



شکل ۳. نمایی از مجموعه دستگاه سه محوری سیکلیک، سلول سه محوری غیراشباع و پانل تأمین و انتقال فشار مورد استفاده

Fig. 3. Schematic view of used cyclic triaxial set, unsaturated triaxial chamber and pressure supply and transmission panel

بسته می‌شود و نمونه طبق توصیه صادق زادگان [۲۱] به مدت ۲۴ ساعت جهت رسیدن به تعادل رطوبتی در همان وضعیت باقی می‌ماند. از آنجایی که در زمان زلزله به علت سرعت بالای بارهای لرزه‌ای امکان زهکشی در خاک وجود ندارد، پس از گذشت ۲۴ ساعت کلیه شیرهای ورودی و خروجی از نمونه بسته و نمونه در حالت *undrained-unexhausted* تحت بارگذاری دینامیکی قرار می‌گیرد [۲۳-۲۱ و ۹].

جهت انجام بارگذاری دینامیکی و تحلیل و پردازش داده‌های خروجی از دستگاه سه محوری سیکلیک Dynatriax محصول شرکت Wyke-ham Farrance موجود در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، که قابلیت بارگذاری سیکلیک با فرکانس 0.001 تا 1 Hz طبق استاندارد ASTM D5311 را دارد، استفاده شده است. شکل ۳ مجموعه دستگاه سه محوری سیکلیک، سلول سه محوری غیراشباع و پانل تأمین و انتقال فشارهای آب و هوا را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه بارگذاری در حالت کاملاً زهکشی نشده انجام می‌شود، در حین بارگذاری مقادیر فشار آب حفره‌ای و فشار هوا به صورت مستمر توسط دستگاه قرائت می‌شود. همچنین، در نمونه‌های غیراشباع با توجه به وجود فاز هوا در داخل نمونه و امکان تغییرات حجمی برخلاف نمونه‌های اشباع، تغییر حجم نمونه نیز با استفاده از دستگاه ثبت تغییرات حجم^۲ با دقت بالا اندازه‌گیری شده است.

مراحل آزمایش می‌باشد. این نوع سیستم پیش از این جهت ساخت نمونه‌های غیراشباع توسط محققینی چون اوکامورا و نوگوچی^۱ [۲۰] و صادق زادگان [۲۱] استفاده شده بوده است. پیش از شروع نمونه‌سازی دیسک سرامیکی از طریق عبور آب هوازدایی شده^۲ با اعمال فشار حدود 100 kPa اشباع شده و در حین نمونه‌سازی و عبور دادن گاز CO_2 و آب جهت اشباع‌سازی نمونه نیز همواره آب هوازدایی شده با فشاری در حدود 10 الی 15 kPa زیر دیسک جریان دارد. پس از عبور دادن گاز CO_2 و آب از پایین نمونه به بالای نمونه و اشباع کردن آن با اعمال پس فشار 200 kPa تا رسیدن به پارامتر B برابر با 0.95 ، نمونه تحت فشار محصور کننده 100 kPa به مدت 45 دقیقه تحکیم می‌شود و آب حفره‌ای اضافی از طریق خروجی زیر دیسک سرامیکی از نمونه خارج می‌شود. در نمونه‌های غیراشباع، پس از مرحله تحکیم از ورودی هوای بالای نمونه فشار هوایی معادل 200 kPa را به داخل نمونه اعمال و با باز کردن ورودی پس فشار که مقدار آن روی 195 kPa تنظیم شده است، مقدار آبی که در داخل لوله‌ها و اتصالات مجرای ورودی هوا وجود دارد خارج می‌شود. سپس، ورودی پس فشار بسته و ورودی فشار آب حفره‌ای زیر دیسک با فشار 195 kPa باز می‌شود و مقدار آب لازم جهت رسیدن به درجه اشباع مورد نظر، تحت اختلاف فشار هوای بالای نمونه و فشار آب حفره‌ای اعمالی از زیر دیسک سرامیکی، به آرامی از نمونه خارج می‌شود. پس از رسیدن به درجه اشباع دلخواه، شیر خروج آب از زیر دیسک سرامیکی

- 1 Okamura and Noguchi
- 2 De-aired water

جدول ۲. برنامه آزمایش‌های انجام شده

Table 2. Program of performed tests

شماره آزمایش	نوع خاک	درجه اشباع (S _r) (%)	نسبت تخلخل بعد از تحکیم (e _c)	CSR
۳-۱		۱۰۰		۰/۲۲، ۰/۲۷، ۰/۳۰
۶-۴		۹۰		۰/۳۳، ۰/۳۸، ۰/۴۰
۹-۷	ماسه ۱۶۱	۸۰	۰/۷۶۹-۰/۷۶۱	۰/۴۵، ۰/۴۸، ۰/۵۰
۱۲-۱۰		۴۰		۰/۵۵، ۰/۵۸، ۰/۶۰
۱۵-۱۳		۱۰۰		۰/۱۸، ۰/۲۰، ۰/۲۲
۱۸-۱۶		۹۰		۰/۲۲، ۰/۲۶، ۰/۳۰
۲۱-۱۹	ماسه ۱۳۱	۸۰	۰/۸۰۵-۰/۷۹۶	۰/۳۰، ۰/۳۴، ۰/۳۶
۲۴-۲۲		۴۰		۰/۳۶، ۰/۳۷، ۰/۳۸
۲۷-۲۵		۱۰۰		۰/۲۲، ۰/۲۸، ۰/۳۰
۳۰-۲۸	ماسه D11	۹۰	۰/۷۶۴-۰/۷۵۵	۰/۳۰، ۰/۳۴، ۰/۳۶
۳۳-۳۱		۸۰		۰/۳۴، ۰/۳۶، ۰/۴۰
۳۶-۳۴		۴۰		۰/۴۰، ۰/۴۲، ۰/۴۴

به ۱۰۰ kPa برسد. در صورتی که در ماسه ۱۳۱ و به خصوص در ماسه D11 در سیکل‌های اولیه فشار آب حفره‌ای با نرخ کمتری نسبت به ماسه ۱۶۱ افزایش و در سیکل‌های پایانی نرخ افزایش فشار آب حفره‌ای به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. همچنین، افزایش کرنش محوری در ماسه ۱۶۱ به صورت یکنواخت‌تری اتفاق می‌افتد، ولی در نمونه‌های ماسه ۱۳۱ و D11 تغییر شکل یا شکست ناگهانی در سیکل‌های پایانی مشاهده می‌شود. نتایج به دست آمده برای ماسه ۱۶۱ مشابه نتایج مطالعات صادق زادگان [۲۱] می‌باشد.

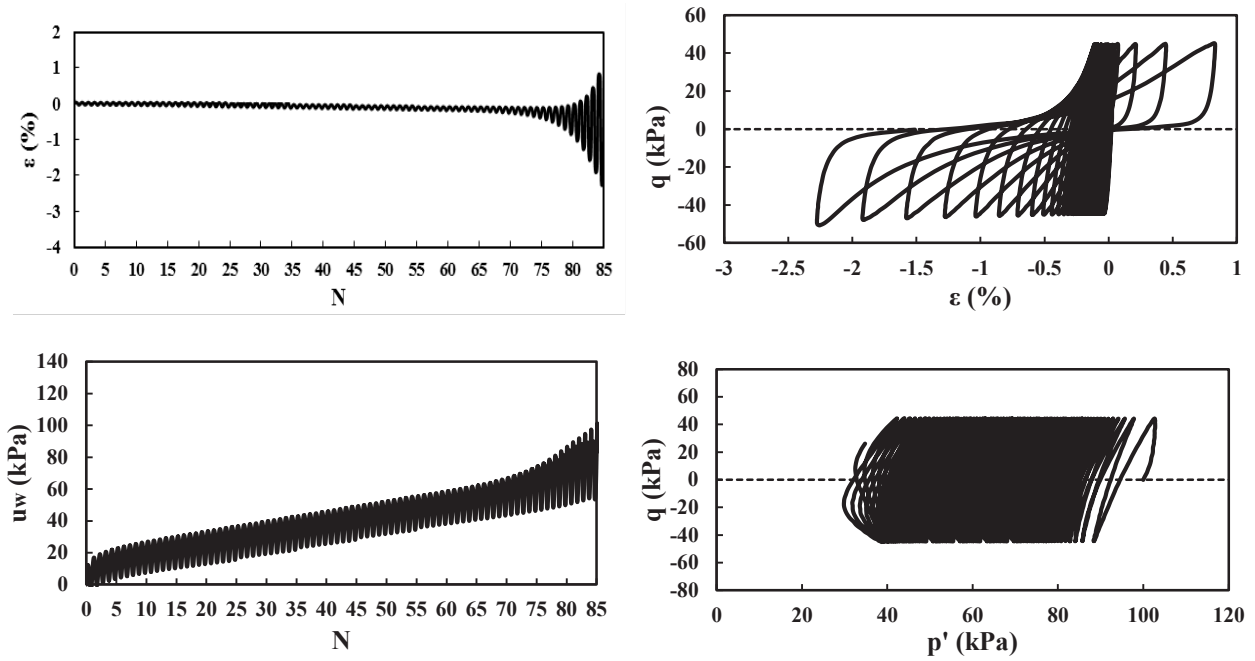
در این تحقیق، وقوع روانگرایی زمانی در نظر گرفته شده است که فشار آب حفره‌ای به تنش محصور کننده (r_{II} برابر با ۱) یا دامنه کرنش محوری به ۵٪ برسد [۲۶-۲۱، ۱۵ و ۹]. همان‌طور که در اشکال ۴ تا ۶ مشاهده می‌شود، در ماسه‌های مورد مطالعه در این تحقیق، روانگرایی در سیکل‌های متناظر با فشار آب حفره‌ای اضافی برابر با ۱۰۰ kPa اتفاق افتاده است، که با توجه به ماهیت دانه‌ای بودن و شکل‌پذیری کم خاک‌های ماسه‌ای منطقی به نظر

در این تحقیق، در مجموع ۳۶ آزمایش سه محوری سیکلیک در شرایط undrained-unexhausted مطابق جدول ۲ بر روی نمونه‌های ماسه‌ای سست در درجه اشباع‌های ۱۰۰، ۹۰، ۸۰ و ۴۰٪ تحت تنش محصور کننده ۱۰۰ kPa با فرکانس بارگذاری سینوسی ۰/۱ Hz و نسبت تنش‌های سیکلیک (CSR) مختلف انجام شد. در ادامه به تشریح نتایج این آزمایش‌ها پرداخته می‌شود.

۴- تحلیل نتایج

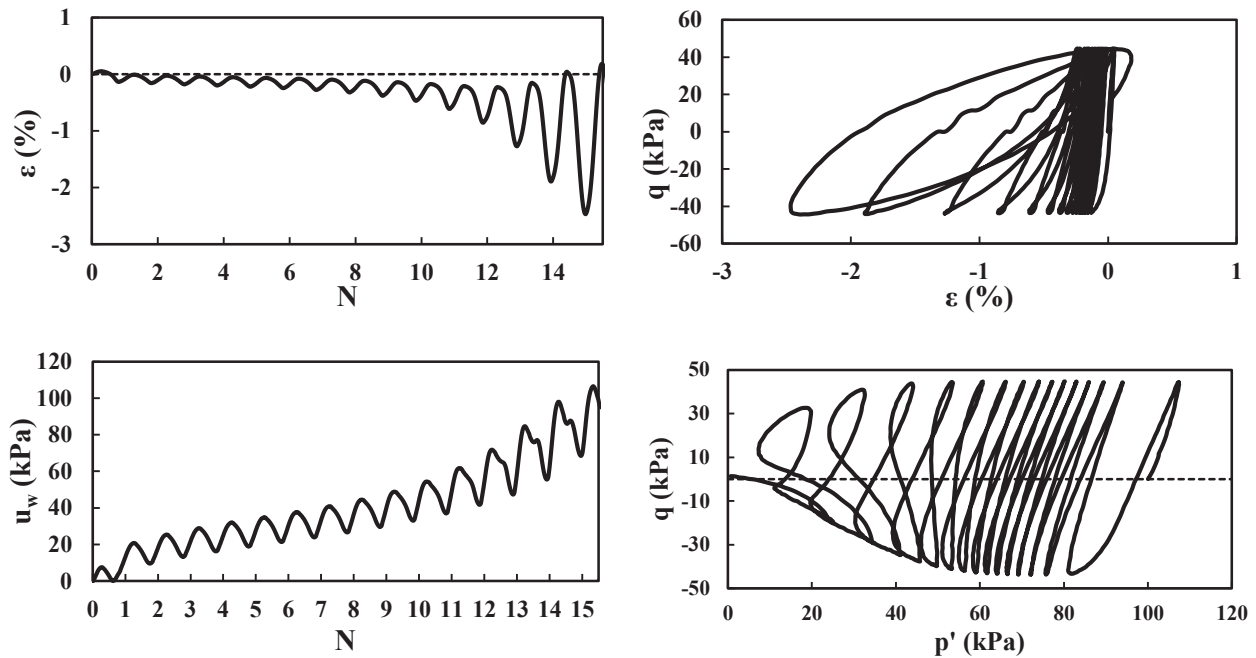
۴-۱ رفتار خاک اشباع

رفتار تنش-کرنش سیکلیک ماسه ۱۶۱، ۱۳۱ و D11 تحت نسبت تنش‌های سیکلیک (CSR) مختلف، به ترتیب، در اشکال ۴ تا ۶ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، فشار آب حفره‌ای در ماسه ۱۶۱ به واسطه ریزدانه‌تر بودن این ماسه نسبت به ماسه ۱۳۱ و D11 به صورت یکنواخت افزایش می‌یابد، تا مقدار اضافه فشار حفره‌ای



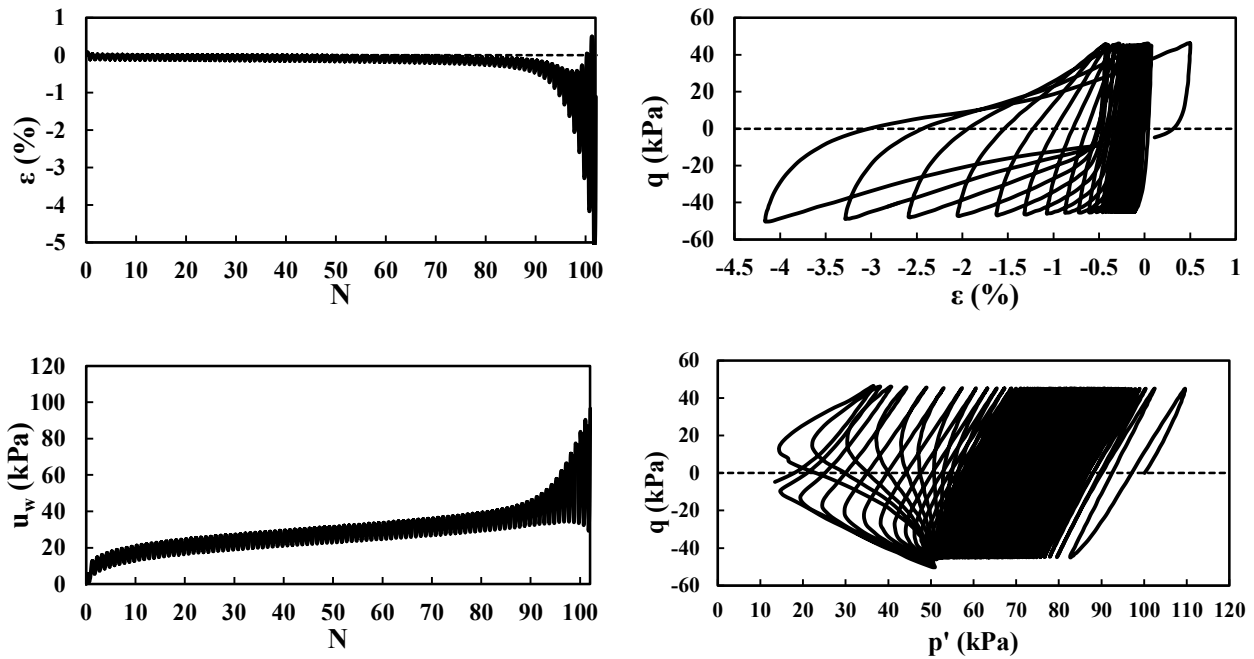
شکل ۴. رفتار تنش-کرنش ماسه ۱۶۱ تحت بارگذاری سیکلیک با CSR برابر با ۰/۲۲ تحت فشار محصور کننده ۱۰۰ kPa

Fig. 4. Stress-strain behavior of #161 sand under cyclic loading with CSR of 0.22 and 100 kPa confining pressure



شکل ۵. رفتار تنش-کرنش ماسه ۱۳۱ تحت بارگذاری سیکلیک با CSR برابر با ۰/۲۲ تحت فشار محصور کننده ۱۰۰ kPa

Fig. 5. Stress-strain behavior of #131 sand under cyclic loading with CSR of 0.22 and 100 kPa confining pressure



شکل ۶. رفتار تنش-کرنش ماسه D11 تحت بارگذاری سیکلیک با CSR برابر با ۰/۲۲ تحت فشار محصور کننده ۱۰۰ kPa

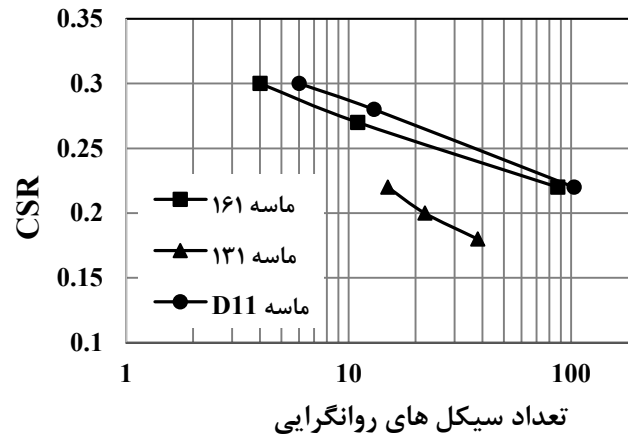
Fig. 6. Stress-strain behavior of D11 sand under cyclic loading with CSR of 0.22 and 100 kPa confining pressure

در اختلاف نسبت تخلخل کلی پس از تحکیم (e_c) که با توجه به عدم وجود ریزدانه برابر با نسبت تخلخل بین دانه‌های (e_{sc}) می‌باشد، بررسی کرد. همان‌طور که در جدول ۲ ارائه شده است، ماسه ۱۳۱ بیشترین مقدار نسبت تخلخل بعد از تحکیم را در میان ماسه‌های مورد مطالعه دارد. از آنجایی که افزایش نسبت تخلخل بین دانه‌ای باعث کاهش تماس‌های بین دانه‌ای و در نتیجه آن کاهش تنش مؤثر در خاک می‌شود، مقاومت روانگرایی در شرایط اشباع کاهش می‌یابد. سونمزر و همکاران^۱ [۲۷] و چاکرابورتی و همکاران^۲ [۲۸] کاهش سرعت افزایش فشار آب حفره‌ای در اثر افزایش اندازه ذرات ماسه‌های خیلی سست (۱۰ تا ۲۰٪) را گزارش کرده‌اند. علت اختلاف نسبی بین نتایج تحقیق حاضر و نتیجه مطالعات سونمزر و همکاران و چاکرابورتی و همکاران را می‌توان در اختلاف بین دانه‌بندی ماسه‌های مورد مطالعه و همچنین تراکم پایین‌تر ماسه‌های مورد استفاده در مطالعات چاکرابورتی و همکاران که باعث کاهش تاثیر نسبت تخلخل بین دانه‌ای بر رفتار سیکلیک می‌شود، بیان کرد.

می‌آید. شکل ۷ تغییرات تعداد سیکل منجر به روانگرایی را برای ماسه‌های مورد مطالعه تحت بارگذاری سیکلیک با CSR های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۷ به وضوح مشاهده می‌شود، کلیه ماسه‌های مورد مطالعه تحت بارگذاری سیکلیک با CSR های اعمالی روانگرا شده‌اند، ولی وقوع روانگرایی در ماسه ۱۳۱ اشباع در تعداد سیکل‌ها و CSR های کمتری نسبت به ماسه ۱۶۱ و D11 انجام می‌شود. به عنوان مثال، تحت CSR برابر با ۰/۲۲، ماسه ۱۳۱ در ۱۵ سیکل و ماسه‌های ۱۶۱ و D11، به ترتیب، در ۸۵ و ۱۰۳ سیکل روانگرا شده‌اند. در مطالعات انجام شده در زمینه روانگرایی خاک‌های ماسه‌ای معمولاً نسبت تنش سیکلیک متناظر با تعداد سیکل‌های روانگرایی ۱۰، ۱۵، ۲۰ یا ۲۵ به عنوان مقاومت روانگرایی (CRR) خاک در نظر گرفته شده است. در این تحقیق، مقاومت روانگرایی متناظر با ۲۰ سیکل (CRR_{20}) به عنوان شاخص ارزیابی پتانسیل روانگرایی ماسه‌های مورد مطالعه در نظر گرفته می‌شود. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، مقدار CRR_{20} برای ماسه ۱۶۱، ۱۳۱ و D11، به ترتیب، برابر با ۰/۲۵۵، ۰/۲۰۷ و ۰/۲۶۷ می‌باشد. علت تفاوت CRR_{20} و تعداد سیکل‌های روانگرایی در CSR ثابت در ماسه‌های مورد مطالعه را می‌توان

1 Sonmezer et al.

2 Chakraborty et al.



شکل ۷. تغییرات تعداد سیکل های روانگرایی ماسه های مورد مطالعه تحت بارگذاری سیکلیک با CSR های مختلف

Fig. 7. Variation of number of cycles to liquefaction of studied sands under cycling loading with different CSR

همان طور که در جدول ۳ مشاهده می شود، در کلیه ماسه های مورد مطالعه، مقدار مکش با کاهش درجه اشباع افزایش می یابد ولی نرخ این افزایش با افزایش اندازه دانه های ماسه کاهش می یابد. به عنوان مثال، کاهش درجه اشباع از ۹۰ به ۴۰٪، مکش در نمونه های ماسه ۱۶۱، ۱۳۱ و D11 را، به ترتیب، ۲۵۰، ۲۲۶ و ۱۸۸٪ افزایش می دهد. همان طور که پیش از این بیان شد، غیراشباع کردن خاک از طریق خروج آب حفره ای باعث شکل گیری پوسته انقباضی و افزایش نیروهای کشش سطحی و مکش در توده خاک می شود. از آنجایی که کاهش درجه اشباع باعث افزایش ضخامت این پوسته می شود، مقدار مکش بافتی در نمونه با کاهش درجه اشباع افزایش می یابد. در نمونه های با اندازه ذرات کوچک تر، به دلیل سطح مخصوص بیشتر، شعاع هلالی کاهش و در نتیجه آن کشش سطحی و مکش بافتی افزایش می یابد. همچنین، همان طور که در جدول ۳ مشاهده می شود، با توجه به تراکم پذیر بودن هوای جایگزین شده با آب حفره ای در حین عملیات غیراشباع سازی، نمونه های غیراشباع تحت بارگذاری سیکلیک تا رسیدن به لحظه روانگرایی تغییر حجمی برابر با ΔV_{liq} دارند که منجر به افزایش درجه اشباعشان می شود و تا حدود زیادی وابسته به درجه اشباع خاک می باشد. به بیان دیگر، کاهش درجه اشباع خاک باعث افزایش تغییر حجم نمونه در لحظه روانگرایی می شود. به عنوان مثال، در درجه اشباع ۴۰٪، تغییر حجم لحظه روانگرایی

۴-۲- تأثیر درجه اشباع

مشخصات اولیه و نهایی به دست آمده آزمایش های غیراشباع انجام شده بر روی نمونه های ماسه مورد مطالعه در جدول ۳ ارائه شده است. در این جدول، مقدار تخلخل و تغییر حجم پس از روانگرایی نمونه های غیراشباع، به ترتیب، با e_{liq} و ΔV_{liq} نمایش داده شده است. با داشتن تغییر حجم نمونه، با استفاده از روابط وزنی حجمی در مکانیک خاک کلاسیک، مقدار تخلخل نمونه پس از روانگرایی محاسبه می شود.

همان طور که در جدول ۳ مشاهده می شود، در کلیه نمونه های ماسه، غیراشباع سازی نمونه ها باعث ایجاد مکش در آن ها می شود، ولی مقدار این مکش به دلیل ماهیت دانه ای و غیرچسبنده بودن و همچنین سست بودن نمونه ها، خیلی کمتر از خاک های رسی و متراکم می باشد. به عنوان مثال، کاهش درجه اشباع از ۱۰۰ به ۴۰٪، حداکثر مکشی که در ماسه های ۱۶۱، ۱۳۱ و D11 ایجاد می کند، به ترتیب، ۹/۱، ۴/۹ و ۲/۳ kPa می باشد. همچنین با توجه به جدول ۳، در کلیه درجات اشباع، مقادیر مکش بافتی ایجاد شده در نمونه های ماسه ۱۶۱ از دیگر ماسه های مورد مطالعه بیشتر می باشد. در واقع، با افزایش اندازه دانه های ماسه، مکش بافتی به دلیل کاهش ضخامت پوسته انقباضی و افزایش شعاع هلالی و در نتیجه آن کاهش کشش سطحی بین آب منفذی و سطح دانه های ماسه، کاهش می یابد. از طرف دیگر

جدول ۳. مشخصات اولیه و نهایی نمونه‌های غیراشباع

Table 3. Initial and final characteristics of unsaturated specimens

شماره آزمایش	نوع خاک	درجه اشباع اولیه (%) ($S_{r,i}$)	مکش (kPa)	ΔV_{liq} (cc)	e_{liq}	درجه اشباع نهایی (%) ($S_{r,liq}$)
۶-۴	ماسه ۱۶۱	۹۰	۲/۶	۵/۰۴	۰/۷۱۶	۹۶/۱
۹-۷		۸۰	۵/۴	۸/۷۸	۰/۶۸۰	۹۰/۰
۱۲-۱۰		۴۰	۹/۱	۲۵/۶۳	۰/۵۱۸	۵۹/۱
۱۸-۱۶	ماسه ۱۳۱	۹۰	۱/۵	۵/۶۲	۰/۷۴۵	۹۶/۷
۲۱-۱۹		۸۰	۲/۳	۹/۴۱	۰/۷۰۷	۹۰/۵
۲۴-۲۲		۴۰	۴/۹	۲۸/۱۶	۰/۵۲۳	۶۱/۲
۳۰-۲۸	ماسه D11	۹۰	۰/۸	۵/۱۵	۰/۷۱۶	۹۵/۴
۳۳-۳۱		۸۰	۱/۲	۹/۰۶	۰/۶۸۳	۸۸/۹
۳۶-۳۴		۴۰	۲/۳	۲۶/۱۲	۰/۵۲۲	۵۸/۲

بیشتر بودن تأثیر درجه اشباع در افزایش مقاومت روانگرایی ماسه ۱۶۱ نسبت به ماسه ۱۳۱ و D11 را می‌توان در بیشتر بودن مکش ایجاد شده در نمونه ماسه ۱۶۱ به دلیل بیشتر بودن سطح مخصوص آن نسبت به دیگر ماسه‌ها بیان کرد.

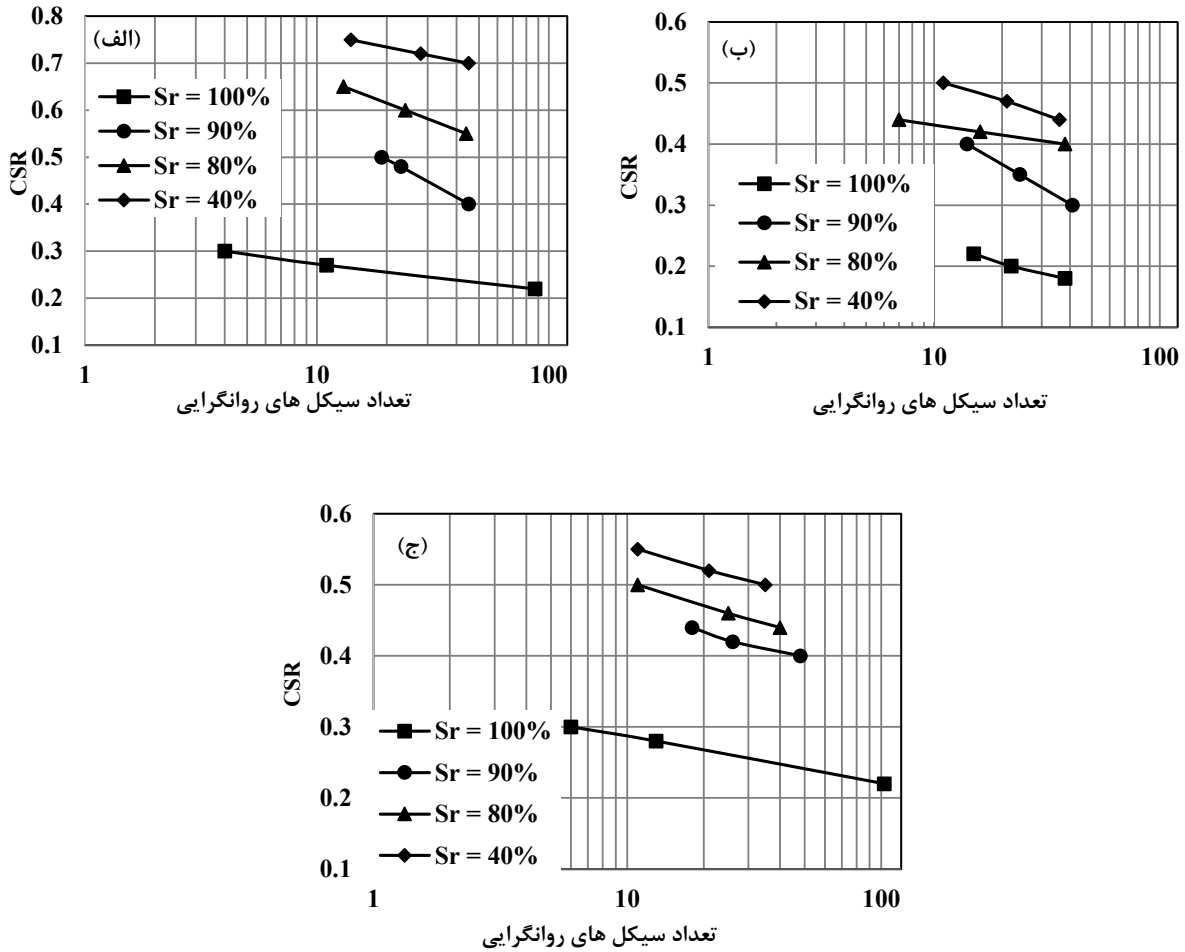
همچنین، با توجه به شکل ۹، نرخ افزایش مقاومت روانگرایی با کاهش درجه اشباع کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، کاهش درجه اشباع از ۱۰۰ به ۸۰٪، مقاومت روانگرایی ماسه ۱۶۱ را ۱۴۱/۶٪ افزایش می‌دهد و کاهش بیشتر درجه اشباع از ۸۰ به ۴۰٪ تنها باعث افزایش ۱۹/۳ درصدی مقاومت روانگرایی می‌شود. علت این رفتار را می‌توان در محدود بودن مکش بافتی به کشش سطحی بین آب منفذی و دانه‌های خاک بیان کرد که وابسته به ضخامت پوسته انقباضی می‌باشد. از آنجایی که ضخامت پوسته انقباضی در درجات اشباع پایین تقریباً ثابت می‌شود، تأثیر کاهش درجه اشباع در افزایش مکش و مقاومت روانگرایی در درجه اشباع‌های کم کاهش می‌یابد.

از آنجایی که دلیل افزایش مقاومت روانگرایی ماسه غیراشباع مستهلک شدن فشار آب حفره‌ای به هنگام بارگذاری در اثر قابلیت تراکم‌پذیری هوای حفره‌ای در داخل نمونه می‌باشد، اوکامورا و سوگا [۲۲] رابطه زیر را برای پتانسیل کرنش حجمی که حداکثر تغییر حجم نمونه در لحظه رسیدن اضافه فشار هوای حفره‌ای به تنش محصور کننده می‌باشد، ارائه کردند.

(ΔV_{liq}) ماسه‌های ۱۶۱، ۱۳۱ و D11، به ترتیب، ۲۵/۶۳، ۲۸/۱۶ و ۲۶/۱۲ می‌باشد. در ماسه‌های با دانه‌بندی ریزتر مقدار این تغییر حجم، به دلیل بیشتر بودن مکش بافتی و سخت‌تر شدن تراکم پوسته انقباضی، کمتر از ماسه‌های درشت‌دانه می‌باشد. از سوی دیگر، با وجود کمتر بودن میزان مکش بافتی در ماسه D11 نسبت به ماسه ۱۳۱، مقدار تغییر حجم آن کمتر می‌باشد. علت این رفتار را می‌توان اصطکاک بالای بین دانه‌های ماسه D11 در مقایسه با ماسه ۱۳۱ بیان کرد.

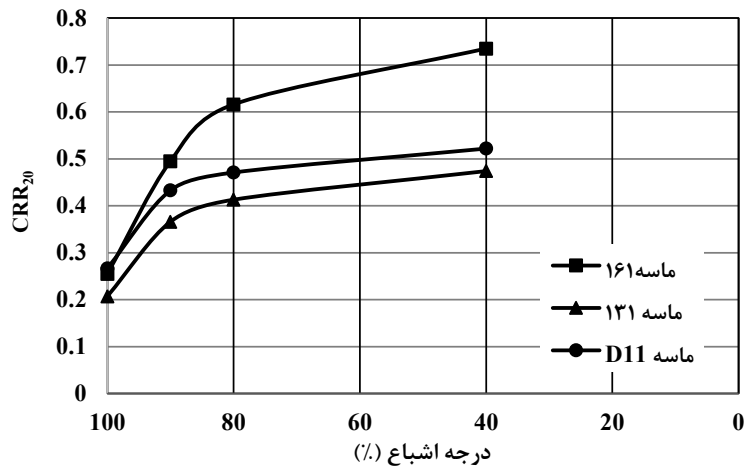
۴-۳- تأثیر درجه اشباع بر مقاومت روانگرایی

شکل ۸، تغییرات نسبت تنش سیکلیک (CSR) در مقابل تعداد سیکل‌های وقوع روانگرایی را برای ماسه‌های مورد مطالعه در درجات اشباع مختلف نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، در کلیه ماسه‌های مورد مطالعه، در CSR ثابت، کاهش درجه اشباع باعث افزایش تعداد سیکل‌های وقوع روانگرایی و در نتیجه آن مقاومت روانگرایی (CRR_{20}) نمونه می‌شود، ولی نرخ این افزایش در ماسه ۱۶۱ بیشتر از ماسه ۱۳۱ و D11 می‌باشد. به عنوان مثال، همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، کاهش درجه اشباع از ۱۰۰ به ۹۰٪، مقاومت روانگرایی ماسه ۱۶۱، ۱۳۱ و D11 را، به ترتیب، ۹۴/۱، ۷۶/۸ و ۶۲/۲٪ افزایش می‌دهد. علت



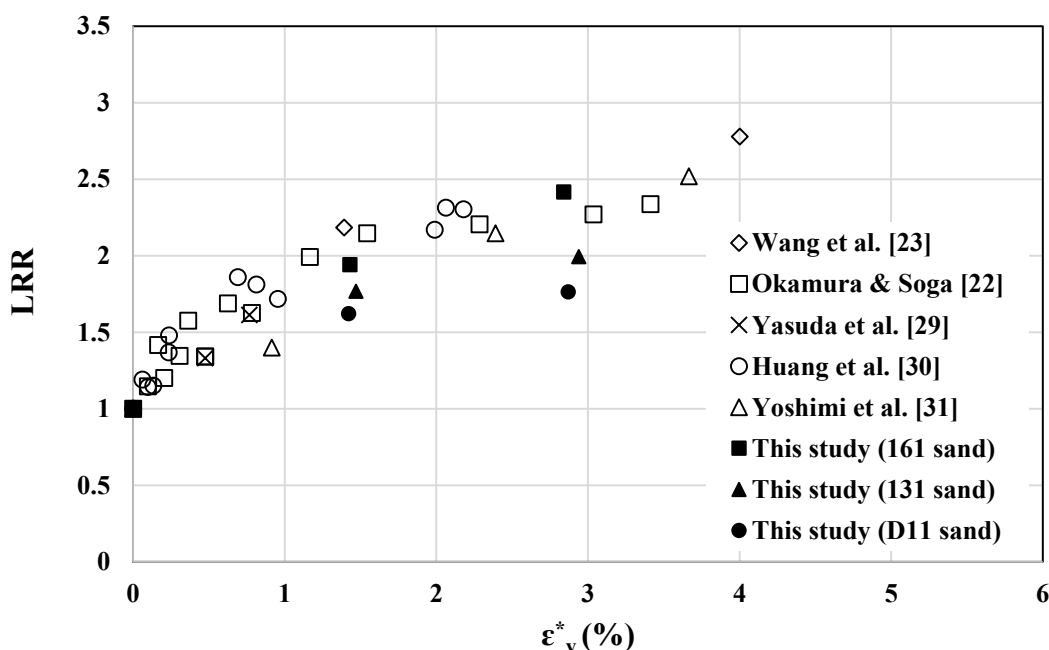
شکل ۸. تغییرات تعداد سیکل‌های روانگرایی ماسه (الف) ۱۶۱، (ب) ۱۳۱ و (ج) D11 با درجات اشباع مختلف تحت بارگذاری سیکلیک با CSR های مختلف

Fig. 8. The effect of degree of saturation on variation of number of liquefaction cycles under different CSR for (a) 161, (b) 131 and (c) D11 Firoozkooh sand



شکل ۹. تغییرات مقاومت روانگرایی (CRR20) ماسه‌های مورد مطالعه با درجات اشباع مختلف

Fig. 9. Variation of liquefaction resistance (CRR20) of studied sands with different degree of saturation



شکل ۱۰. تغییرات نسبت مقاومت روانگرایی (LRR) در برابر پتانسیل کرنش حجمی

Fig. 10. Variation of liquefaction resistance ratio (LRR) versus volumetric strain potential

مطالعه در این تحقیق باشد.

$$\varepsilon_v^* = \frac{\sigma'_c}{p_0 + \sigma'_c} (1 - S_r) \frac{e}{1 + e} \quad (3)$$

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور بررسی اثر اندازه ذرات و درجه اشباع بر مقاومت روانگرایی خاک‌های ماسه‌ای، مجموعه‌ای از آزمایش‌های سه محوری سیکلیک در حالت کاملاً زهکشی نشده بر روی سه نوع ماسه سست با دانه‌بندی‌های مختلف در دو حالت اشباع و غیراشباع انجام شد. اهم نتایج به دست آمده در این تحقیق به شرح زیر می‌باشد.

- در حالت اشباع، گسترش و افزایش فشار آب حفره‌ای در ماسه ریزدانه ۱۶۱ فیروزکوه به صورت یکنواخت‌تری نسبت به ماسه‌های درشت‌دانه ۱۳۱ و D11 اتفاق می‌افتد، در صورتی که در ماسه‌های درشت‌تر در سیکل‌های اولیه فشار آب حفره‌ای با نرخ کمی افزایش و در سیکل‌های پایانی نرخ افزایش فشار آب حفره‌ای به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.
- نسبت تخلخل بین دانه‌ای (e_{sc}) نقش به‌سزایی در تغییرات مقاومت روانگرایی دارد، به طوری که ماسه ۱۳۱ به دلیل بیشتر بودن نسبت تخلخل بین دانه‌ای دارای کمترین مقاومت روانگرایی در حالت اشباع می‌باشد.

که در آن، p_0 و e ، به ترتیب، مقدار فشار هوای حفره‌ای اولیه و نسبت تخلخل نمونه قبل از اعمال بار و σ'_c تنش محصور کننده مؤثر می‌باشد. به منظور مقایسه نتایج این تحقیق با تحقیقات گذشته مقادیر پتانسیل کرنش حجمی طبق رابطه ۳ و نسبت مقاومت روانگرایی (LRR) طبق رابطه ۴ محاسبه و در شکل ۱۰ ارائه شده است.

$$LRR = \frac{CRR_{20(unsat)}}{CRR_{20(sat)}} \quad (4)$$

همان‌گونه که در شکل ۱۰ مشهود می‌باشد، نتایج این تحقیق به خصوص برای ماسه ۱۶۱ تطابق خوبی با نتایج سایر محققین دارد. اختلاف نتایج به دست آمده برای ماسه ۱۳۱ و D11 با نتایج محققین قبلی می‌تواند به دلیل یکنواخت بودن دانه‌بندی و اندازه درشت‌دانه‌های ماسه‌های مورد

منابع

- [1] D.G. Fredlund, H. Rahardjo, Soil mechanics for unsaturated soils, A Wiley inter-science publication, (1993), New York.
- [2] J. Xu, C. Liu, Liquefaction potential of unsaturated nevada sand at different initial conditions, Thesis for University of South Carolina, (2012).
- [3] D.G. Fredlund, N.R. Morgenstern, R.A. Widger, The shear strength of unsaturated soils, Canadian Geotechnical Journal, 15(3) (1978) 313–321.
- [4] Y.J. Cui, P. Delage, Yielding and plastic behaviour of an unsaturated compacted silt, Geotechnique, 46(2) (1996) 291-311.
- [5] H. Toyota, K. Nakamura, N. Sakai, W. Sramoon, Mechanical Properties of Unsaturated Cohesive Soil in Consideration of Tensile Stress, Soils and Foundations, 43(2) (2003) 115-122.
- [6] N. Nishimatsu, Y.S. Kim, T. Kodaka, S. Kimoto, triaxial compressive behavior of low saturated compacted silt under constant volume and unexhausted air conditions, Proc . of 44th annual meeting of JGS, Japan, (2004) 831-832.
- [7] F. Geiser, L. Laloui, L. Vulliet, Elasto-Plasticity of Unsaturated Soils: Laboratory Test Results on a Remoulded Silt, Soils and Foundations, 46(5) (2006) 545-556.
- [8] T. Yabuki, F. Oka, S. Kimoto, Mechanical behavior of unsaturated silt under cyclic loading , Proc . of 42nd annual meeting of JGS, Japan, (2007) 771-772.
- [9] T. Unno, M. Kazama, N. Sento, Liquefaction of Unsaturated Sand Considering the Pore Air Pressure and Volume Compressibility of the Soil Particle Skeleton, Soils and Foundations, 48(1) (2008) 87-99.
- [10] T. Nishimura, J. Koseki, Attempt of cyclic triaxial test for an unsaturated silty soil under undrained condition, Proc . of 44th annual meeting of JGS, Japan, (2009) 641-

- در کلیه نمونه‌های ماسه، غیراشباع‌سازی نمونه‌ها باعث ایجاد مکش در آن‌ها می‌شود، ولی مقدار این مکش به دلیل ماهیت دانه‌ای و غیرچسبنده بودن و همچنین سست بودن نمونه‌ها، خیلی کمتر از خاک‌های رسی و متراکم می‌باشد.
- با افزایش اندازه دانه‌های ماسه، مکش بافتی به دلیل کاهش ضخامت پوسته انقباضی و افزایش شعاع هلالی و در نتیجه آن کاهش کشش سطحی بین آب منفذی و سطح دانه‌های ماسه، کاهش می‌یابد.
- کاهش درجه اشباع خاک باعث افزایش تغییر حجم نمونه در لحظه روانگرایی می‌شود. در ماسه‌های با دانه‌بندی ریزتر مقدار این تغییر حجم، به دلیل بیشتر بودن مکش بافتی و سخت‌تر شدن تراکم پوسته انقباضی، کمتر از ماسه‌های درشت‌دانه می‌باشد.
- در کلیه ماسه‌های مورد مطالعه، در CSR ثابت، کاهش درجه اشباع باعث افزایش تعداد سیکل‌های وقوع روانگرایی و در نتیجه آن مقاومت روانگرایی نمونه می‌شود، ولی نرخ این افزایش در ماسه ۱۶۱ بیشتر از ماسه ۱۳۱ و D11 می‌باشد. در حالت کلی، نرخ افزایش مقاومت روانگرایی با کاهش درجه اشباع کاهش می‌یابد.

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی

C_c	ضریب انحناء دانه‌بندی
C_u	ضریب یکنواختی دانه‌بندی
D_{50}	اندازه متوسط سنگدانه‌ها، mm
D_r	تراکم نسبی نمونه، درصد
e_{max}	حداکثر نسبت تخلخل خاک
e_{min}	حداقل نسبت تخلخل خاک
h_t	ارتفاع نمونه، cm

علائم یونانی

ρ	چگالی، kg/m^3
σ'_c	فشار محصور کننده یا تحکیمی، kPa

- [22] M. Okamura, Y. Soga, Effects Of Pore Fluid Compressibility On Liquefaction Resistance Of Partially Saturated Sand, *Soils and Foundations*, 46(5) (2006) 695–700.
- [23] H. Wang, J. Koseki, T. Sato, G. Chiaro, J.T. Tian, Effect of saturation on liquefaction resistance of iron ore fines and two sandy soils, *Soils and Foundations*, 56(4) (2016) 732–744.
- [24] K. Ishihara, Liquefaction and Flow Failure during Earthquakes. *Geotechnique*, 43(3) (1993) 351-415.
- [25] A. Shafiee, Cyclic Resistance, Pre and Post-Liquefaction Behavior of Dry Pluviated Silty Sands, *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 8(3) (2006) 163-175.
- [26] S.S. Kumar, A. Dey, A.M. Krishna, Liquefaction Potential Assessment of Brahmaputra Sand Based on Regular and Irregular Excitations Using Stress-Controlled Cyclic Triaxial Test, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24 (2020) 1070–1082.
- [27] Y.B. Sonmezer, A. Akyuz, K. Kayabali, Investigation of the effect of grain size on liquefaction potential of sands, *Geomechanics and Engineering*, 20(3) (2020) 243-254.
- [28] P. Chakraborty, A. Das, Anil, Effect of Soil Grain Size on Liquefaction Strength of Sandy Soil. In: Latha Gali M., Raghuvier Rao P. (eds) *Geohazards. Lecture Notes in Civil Engineering*, 86 (2021) Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6233-4_38.
- [29] S. Yasuda, T. Kobayashi, Y. Fukushima, M. Kohari, T. Simazaki, Effect of degree of saturation on the liquefaction strength of Masa, *Proc. 34th Jpn. Nat. Conf. Geotech. Engrg.*, (1999) 2071-2072.
- [30] S. Huang, S.L. Barbour, D.G. Fredlund, Development and verification of a coefficient of permeability function for a deformable unsaturated soil, *Canadian Geotechnical Journal*, 35(3) (1998) 411–425.
- [31] Y. Yoshimi, K. Tanaka, K. Tokimatsu, Liquefaction resistance of a partially saturated sand, *Soils and Foundations*, 29(3) (1989) 157-162.
- [11] S. Kimoto, F. Oka, J. Fukutani, T. Yabuki, K. Nakashima, Monotonic and Cyclic Behavior of Unsaturated Sandy Soil Under Drained and Fully Undrained Conditions, *Soils and Foundations*, 51(4) (2011) 663-681.
- [12] Y. Tsukamoto, S. Kawabeb, Jo. Matsumoto, S. Hagiwara, Cyclic resistance of two unsaturated silty sands against soil liquefaction, *Soils and Foundations*, 54(6) (2014) 1094-1103.
- [13] M. Vernay, M. Morvan, P. Breul, Influence of saturation degree and role of suction in unsaturated soils behaviour: application to liquefaction, *E3S Web of Conferences*, 9 (2016) 1-6.
- [14] Y. Tsukamoto, Degree of saturation affecting liquefaction resistance and undrained shear strength of silty sands, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.04.041>.
- [15] L. Mele, J.T. Tian, S. Lirer, A. Flora, J. Koseki, Liquefaction resistance of unsaturated sands: experimental evidences and theoretical interpretation, *Geotechnique*, 69(6) (2019) 541-553.
- [16] L. Mele, A. Flora, On the prediction of liquefaction resistance of unsaturated sands, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 125 (2019) 105689.
- [17] K.H. Tran, S. Imanzadeh, S. Taibi, D.L. Dao, Liquefaction Behavior of Dense Sand Relating to the Degree of Saturation. In: Duc Long P., Dung N. (eds) *Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development, Lecture Notes in Civil Engineering*, 62 (2020) 879-886.
- [18] R. Ladd, Preparing Test Specimens Using Undercompaction, *Geotechnical Testing Journal*, 1(1) (1978) 16-23.
- [19] K. Been, M.G. Jefferies, J. Hachey, The critical state of sands, *Géotechnique*, 41(3) (1991) 365-381.
- [20] M. Okamura, K. Noguchi, Liquefaction resistances of unsaturated non-plastic silt, *Soils and Foundations*, 49(2) (2009) 221–229.
- [۲۱] صادق زادگان، ر. «رفتار دینامیکی ماسه رس دار غیراشباع». رساله دکتری، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، ۱۳۹۶.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Gh. A. Jafarzadeh Imanabadi, S. A. H. Naeini , R. Ziaie Moayed, *The effect of particle size and degree of saturation on liquefaction potential of sandy soil*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(7) (2022) 2627-2640.

DOI: 10.22060/ceej.2022.20238.7376

