



مطالعه رفتار مکانیکی خاک‌های ماسه‌ای رس‌دار با استفاده از دستگاه سه محوری غیر اشباع

علی میرزایی^{۱*}، سید شهاب‌الدین یثربی^۲

۲، ۱- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

* تلفن: ۰۹۱۲۴۴۴۵۷۴، پست الکترونیک: alimirzaiice@gmail.com

خلاصه

در این مقاله به بررسی رفتار مکانیکی یک خاک ماسه‌ای رس‌دار می‌پردازیم. این مطالعه با استفاده از دستگاه سه محوری غیر اشباع انجام شده است. با استفاده از این دستگاه می‌توان مکش بافتی، تنش‌های انحرافی قائم و تغییر حجم آب و هوای حفره‌ای را به طور مستقل در طول آزمایش اندازه‌گیری نمود. آزمایش‌های انجام شده شامل آزمایش‌های سه‌محوری در ۲ حالت اشباع (زهکشی شده و زهکشی نشده) و غیر اشباع (تحکیم یافته با مقدار آب ثابت) می‌باشد که برای انجام آن‌ها از روش جابجایی محوری و سلول دو محفظه غیر اشباع استفاده شده است. بر پایه نتایج بدست آمده به مطالعه رفتار مکانیکی خاک با توجه به متغیرهای حالت تنش پرداخته شده است.

کلمات کلیدی: خاک‌های غیر اشباع، مکش بافتی، روش جابجایی محوری، اندازه‌گیری تغییر حجم، مقاومت برشی

مقدمه

از دیرباز تاکنون یکی از فرضیات اساسی در بررسی رفتار مهندسی گونه‌های مختلف خاک‌ها فرض بر اشباع کامل و یا خشک بودن توده خاک بوده و بسیاری از روابط کلاسیک علم مکانیک خاک بر پایه همین فرضیه بنا شده است. در صورتی که در طبیعت بر اثر عوامل مختلف جوی و ساختار محیطی منطقه لایه‌های خاک در حالت اشباع کامل نبوده و نیز حالت کاملاً خشک را نمی‌تواند داشته باشد و در واقع وضعیت لایه‌های خاک به صورت غیر اشباع می‌باشد. این وضعیت در لایه‌های خاک نزدیک به سطوح زمین به دلیل آن که در مجاورت سطح زمین واقع شده و بر اثر عوامل جوی؛ زیست محیطی؛ فیزیکی و ... آب موجود در آن‌ها دستخوش تغییر خواهد بود بیشتر دیده می‌شود. داشتن درک صحیح از رفتار مهندسی برای لایه‌های خاکی که در اعماق نزدیک به سطوح زمین قرار دارند برای مهندسین ژئوتکنیک از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد. برای داشتن درک صحیح از رفتار مهندسی خاک‌ها بایستی از چگونگی وضعیت تنش‌ها و نحوه گسترش آن در لایه‌های خاک و نیز رفتاری که خاک بر اثر تلاش‌های وارده به صورت‌های مختلف همچون تغییر شکل، مقاومت، گسیختگی و ... از خود نشان می‌دهد شناخت کافی داشته باشیم.

از جمله متداول‌ترین ابزارهای آزمایشگاهی برای مطالعه رفتار مکانیکی یک خاک با توجه به تنش‌های وارده بر آن دستگاه سه محوری می‌باشد. از جمله تفاوت‌های اساسی دستگاه‌های سه محوری غیر اشباع نسبت به دستگاه‌های سه محوری متداول وجود فاز هوای حفره‌ای در نمونه خاک می‌باشد که مستلزم اندیشیدن تمهیدات ویژه در دستگاه برای اندازه‌گیری پارامترهای مختلف خاک (از جمله تغییر حجم و مکش بافتی درون خاک) خواهد بود. مطالعات گسترده‌ای با انجام آزمایش‌های مختلف بر روی خاک‌های غیر اشباع برای بررسی رفتار مقاومت برشی آن‌ها در ۳۰ سال اخیر صورت گرفته است. در این آزمایش‌ها بر حسب نوع انجام آزمایش فشارهای هوا و آب حفره‌ای به طور مجزا کنترل و یا اندازه‌گیری می‌شدند. برای تفکیک ۲ فاز آب و هوا از یکدیگر و اندازه‌گیری و یا کنترل فشارهای آب و هوای حفره‌ای، از دیسک‌های سرامیکی متخلخل استفاده می‌شد و در حالتی که میزان مکش بافتی درون خاک از فشار اتمسفر بیشتر باشد از روش جابجایی محوری برای اندازه‌گیری و یا کنترل فشارهای حفره‌ای استفاده شده است. در اوائل دهه ۱۹۶۰ پیشاپ با استفاده از سلول سه محوری ارتقا یافته‌ای که برای انجام آزمایش‌های سه محوری ابداع نمود به انجام آزمایش‌های سه محوری در شرایط مختلف بر روی نمونه خاک‌های غیر اشباع پرداخت [۱]. در اوائل دهه ۱۹۷۰ فردلوند و مورگنسترن به بررسی رفتار مقاومت برشی

^۱ کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس

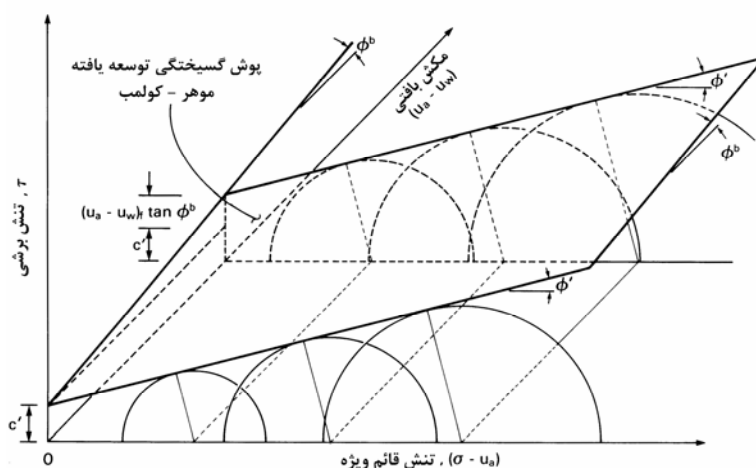
^۲ دانشیار خاک و پی، دانشگاه تربیت مدرس

خاک‌های غیر اشباع بر پایه ۲ متغیر حالت تنش مکش بافتی؛ $(u_a - u_w)$ و تنش‌های همه جانبه ویژه؛ $(\sigma - u_a)$ پرداختند و بر پایه نتایج مطالعات خود رابطه زیر را بر پایه ۲ متغیر حالت تنش برای بیان پوش گسیختگی برشی در خاک‌های غیر اشباع بیان نمودند [۲]:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)_f \times \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \times \tan \phi_b \quad (1)$$

که در آن c' محل تقاطع پوش گسیختگی موهر کولمب در صفحه تنش‌های قائم ویژه - تنش‌های برشی متناظر با مکش بافتی صفر با محور تنش‌های برشی می‌باشد و به آن اصطلاحاً چسبندگی موثر می‌گوییم، $(u_a - u_w)_f$ و $(\sigma - u_a)_f$ نیز به ترتیب مکش بافتی و تنش‌های قائم ویژه متناظر با حالت گسیختگی، ϕ' زاویه اصطکاک داخلی متناظر با متغیر $(\sigma - u_a)$ و ϕ_b زاویه اصطکاک متناظر با متغیر $(u_a - u_w)$ می‌باشد.

پوش گسیختگی برشی در خاک‌های غیر اشباع در فضای تنش‌های قائم ویژه، تنش برشی و مکش بافتی در تصویر ۱ نشان داده شده است. این پوش با رسم خطوط مماس بر دوائر موهر کولمب در مقادیر مکش بافتی مختلف به دست می‌آید. شکل این پوش می‌تواند به صورت منحنی و یا یک صفحه باشد که با توجه به رابطه ۱ شکل پوش گسیختگی یک صفحه خواهد بود. این صفحه به وسیله پارامترهای ϕ_b, ϕ', c' در فضای سه بعدی مشخص می‌شود. تاثیر تنش‌های قائم ویژه و مکش‌های بافتی بر روی مقاومت برشی خاک‌های غیر اشباع متفاوت از هم بوده و برای همین امر از ۲ پارامتر ϕ_b, ϕ' برای بیان نحوه تاثیر آن‌ها استفاده شود. با توجه به نتایج آزمایش‌های مختلف مقدار ϕ_b از مقدار ϕ' همواره کوچکتر و یا مساوی می‌باشد.



تصویر ۱- پوش گسیختگی موهر - کولمب در خاک‌های غیر اشباع [۲]

در این مقاله به ارائه نتایج بدست آمده از مطالعه انجام شده بر روی رفتار مکانیکی یک خاک ماسه‌ای رس‌دار غیر اشباع می‌پردازیم. این مطالعه با استفاده از دستگاه سه محوری غیر اشباع انجام شده است. این دستگاه در دانشگاه تربیت مدرس طراحی و ساخته شده و با استفاده از آن می‌توان مکش بافتی، تغییر حجم آب و هوای حفره‌ای را به طور مستقل در طول مراحل مختلف آزمایش کنترل و یا اندازه‌گیری نمود. خاک مورد مطالعه به صورت ترکیبی از ماسه و کائولینیت می‌باشد و در ۲ حالت اشباع کامل و غیر اشباع مورد آزمایش قرار گرفته است. آزمایش‌های سه محوری اشباع در ۲ حالت کاملاً زهکشی شده (CD) و زهکشی نشده انجام شده‌اند. آزمایش‌های غیر اشباع به صورت کاملاً زهکشی شده برای فاز هوای حفره‌ای و زهکشی نشده برای فاز آب حفره‌ای (CW) انجام شده‌اند.

دستگاه سه محوری غیر اشباع

این دستگاه به طور کلی شامل سه بخش می‌باشد:

- ۱- سلول ۲ جداره سه محوری غیر اشباع^۱
- ۲- تابلو کنترل و بارگذاری^۲
- ۳- سیستم پردازش و ثبت اطلاعات^۳

¹ Doubled wall unsaturated triaxial cell

² Control & Loading panel

³ Data acquisition system

در تصویر ۲ شمای کلی دستگاه و بخش‌های مختلف آن نشان داده شده است. تمامی اجزای این دستگاه با استفاده از امکانات صنعت داخل کشور طراحی و ساخته شده و تنها قطعات خارجی آن سنسورهای به کار رفته در بخش ابزار دقیق و دیسک سرامیکی متخلخل می‌باشند. بخش‌های مختلف دستگاه به گونه‌ای طراحی و ساخته شده که قابلیت انجام آزمایش‌های مختلف سه محوری غیر اشباع و^۱ SWRC را داشته باشد. سیستم ثبت اطلاعات^۲ دستگاه قادر به پردازش و ثبت داده‌ها با دقت داده برداری ۰,۱ ثانیه می‌باشد. برای کنترل و پردازش داده‌ها یک نرم افزار مختص آزمایش‌های سه-محوری غیر اشباع و SWRC طراحی شده است. دستگاه سه‌محوری ساخته شده قابلیت استفاده از روش جابجایی محوری را دارا بوده و با استفاده از سلول دو جداره غیر اشباع تغییر حجم کل و آب حفره‌ای خاک در طول آزمایش به طور مستقل اندازه‌گیری می‌شوند. با استفاده از این دستگاه می‌توان رفتارهای تغییر حجم خاک را در چرخه‌های مختلف تر و خشک شدگی و اعمال فشارهای همه جانبه بررسی نمود.

سلول دستگاه دارای ۲ محفظه داخلی و خارجی بوده تا بتوان تغییر حجم کل نمونه خاک را در طول آزمایش اندازه‌گیری نمود. با توجه به آن که فشار درون محفظه‌های داخلی و خارجی سلول همواره با هم برابر می‌باشد این امر باعث جلوگیری از تغییر حجم جداره شیشه‌ای محفظه داخلی می‌گردد. برای کاهش وزن سلول در ساخت آن از فلز آلومینیوم استفاده شده است. در تصویر ۳- الف شمای کلی سلول سه محوری غیر اشباع نشان داده شده است. مطابق این تصویر سلول شامل ۲ قسمت بدنه پایین و بالا می‌باشد که در مرحله آماده سازی نمونه می‌توان بدنه بالایی را از بدنه پایین جدا نمود. بدنه بالایی سلول شامل محفظه خارجی و میله بارگذاری و بدنه پایین شامل مجاری ورودی و خروجی به محفظه داخلی و پدستال پایین (محل قرار گیری نمونه خاک) می‌باشند. مطابق تصویر ۴- الف بدنه بالا و پایینی سلول به وسیله ۶ میله رابط به یکدیگر متصل می‌شوند. برای بالا بردن ایمنی و مقاومت محفظه خارجی در فشارهای همه جانبه بالا، شیشه خارجی سلول به وسیله سه تسمه فولادی پیش تنیده مسلح شده است. مقدار نیروی کششی درون تسمه‌ها را می‌توان با استفاده از پیچ‌های تعبیه شده بر روی تسمه‌ها تغییر داد. مطابق تصویر ۳- الف در بخش بدنه بالای سلول ۲ شیر برای هواگیری محفظه‌های داخلی و خارجی (A, B) و ۲ شیر دیگر (C, D) برای اعمال فشار همه جانبه (به وسیله هوا) وجود دارد. مجرای اعمال فشار همه جانبه محفظه خارجی (به وسیله آب) نیز بر روی بدنه خارجی قرار گرفته است. اما مهمترین بخش سلول بدنه پایین آن می‌باشد که شامل ۴ مجرای ورودی - خروجی برای اعمال فشارهای همه جانبه و اندازه‌گیری تغییر حجم کل نمونه (مجرای D)، اندازه‌گیری و یا اعمال فشارهای آب و هوای حفره‌ای (به ترتیب مجرای C, A)، هواگیری و اندازه‌گیری هوای جمع شده در محفظه زیر دیسک سرامیکی (مجرای B) می‌باشد. این مجاری در تصویر ۳- ب نشان داده شده اند.

دیسک سرامیکی به کار رفته در سلول دارای عدد عبوری هوای ۵ اتمسفر می‌باشد. مطابق تصویر ۳- ج این دیسک درون پدستال واقع در بدنه پایین دستگاه قرار گرفته و فضای اطراف آن به وسیله رزین اپوکسی پر می‌شود. ضخامت این دیسک ۹ میلی متر و قطر آن ۴۴ میلی متر می‌باشد. در زیر دیسک سرامیکی محفظه کوچکی برای جمع شدن آب و اندازه‌گیری تغییر حجم و یا فشار آن قرار گرفته است و برای اندازه‌گیری (و یا اعمال) فشار آب حفره‌ای و تغییر حجم آب درون خاک استفاده می‌گردد. این محفظه به ۲ مجرای A, B متصل می‌باشد.

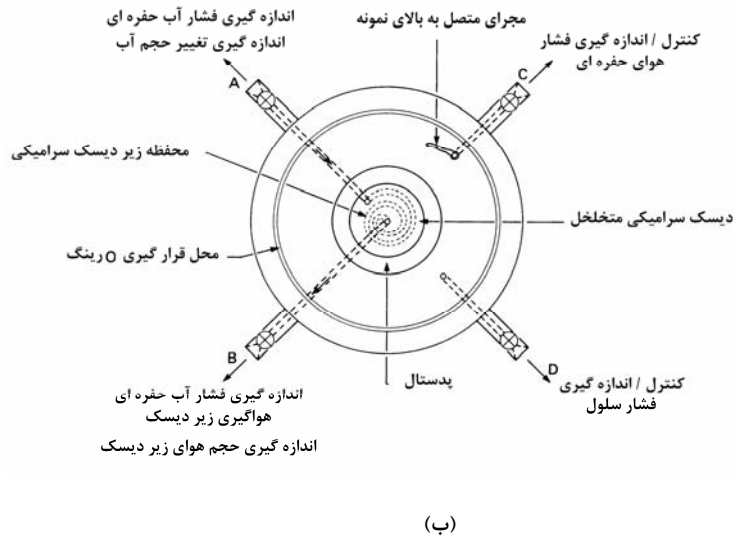
برای اندازه‌گیری تغییر حجم آب و هوای حفره‌ای به طور مستقل سلول دستگاه شامل ۲ بخش جداره داخلی و خارجی می‌باشد. مطابق تصویر ۳- د یک محفظه استوانه‌ای (که معمولاً از جنس شیشه می‌باشد) درون محفظه سلول قرار دارد و مقدار فشار سیال داخل و خارج محفظه شیشه‌ای همواره یکسان می‌باشند. این عمل باعث جلوگیری از تغییر حجم محفظه شیشه‌ای داخل سلول می‌شود و با اندازه‌گیری مقدار سیال ورودی و یا خروجی از داخل محفظه شیشه‌ای می‌توان تغییر حجم کل نمونه خاک را اندازه‌گیری نمود.



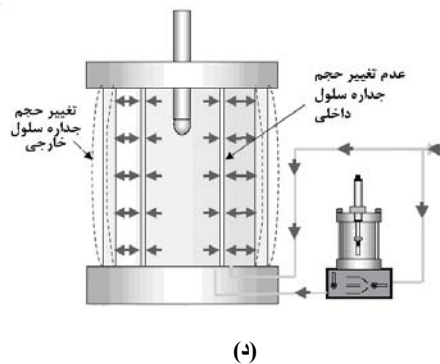
تصویر ۲- شمای کلی دستگاه سه محوری غیر اشباع

¹ Soil water retention curve

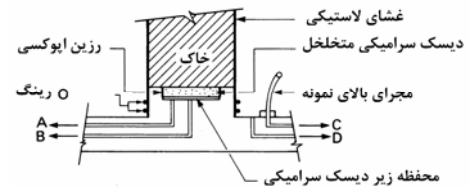
² Data acquisition system



(الف)



(ب)



(ج)

تصویر ۳- سلول سه محوری غیر اشباع

اعمال فشار در بخش‌های مختلف دستگاه با استفاده از فشار هوا و تنظیم آن به وسیله تابلو کنترل دستگاه انجام می‌گیرد (مطابق تصویر ۲). در بخش پایین تابلو کنترل دستگاه یک مخزن شیشه‌ای برای پر و خالی نمودن و اعمال فشار محفظه خارجی سلول تعبیه شده است. یکی از مهمترین بخش‌های تابلو دستگاه سیستم اعمال فشار و اندازه‌گیری تغییر حجم آب و هوای حفره‌ای نمونه خاک به طور مستقل می‌باشد. برای این امر از ۲ بورت مضاعف استفاده می‌کنیم. این بورت‌ها به مجرای زیر دیسک سرامیکی در بدنه پایین سلول و مجرای محفظه داخلی سلول متصل می‌باشند. برای مشاهده برخی از جزئیات آزمایش به طور لحظه‌ای یک نمایشگر LCD بر روی تابلو دستگاه قرار دارد. یکی از مهمترین بخش‌های دستگاه سیستم پردازش و ثبت اطلاعات می‌باشد که با استفاده از آن مقادیر نیروهای قائم، کرنش‌های محوری، فشار آب حفره‌ای، فشار هوای حفره‌ای و فشار همه جانبه در طول آزمایش ثبت و پردازش می‌شوند. برای این امر برنامه‌ای مختص انجام آزمایش‌های مختلف سه محوری غیر اشباع و SWRC طراحی شده است.

کلیات تحقیق - مشخصات خاک مورد مطالعه

در این تحقیق به بررسی رفتار مکانیکی یک خاک ماسه‌ای رس‌دار در درجات اشباع مختلف با استفاده از آزمایش‌های سه محوری در حالت اشباع کامل و غیر اشباع پرداخته شده است. مشخصات فیزیکی خاک مورد مطالعه در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی خاک مورد مطالعه

وزن مخصوص ماکزیمم (t/m^3)	رطوبت بهینه %	درصد رس %	وزن مخصوص	نشانه خمیری	حد خمیری %	حد روانی %	نوع خاک
2.009	9.58	40	2.66	9.5	14	23.5	SC

آزمایش‌های سه محوری اشباع شامل ۳ آزمایش تحکیم یافته - زهکشی شده (CD) و ۳ آزمایش تحکیم یافته - زهکشی نشده (CU) بر روی یک نمونه خاک با توجه به تنش‌های تحکیمی موثر مختلف می‌باشد. آزمایش‌های سه محوری غیر اشباع شامل ۶ آزمایش تحکیم یافته با مقدار آب ثابت



(CW) در ۲ مقدار مکش بافتی اولیه ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال در تنش‌های تحکیمی موثر مختلف می‌باشد. نمونه‌های خاک در تراکم نسبی ۸۴٫۴۲ درصد و رطوبت اولیه ۸٫۴ درصد در ۸ لایه یکسان و با استفاده از روش تراکم دینامیکی ساخته شده‌اند.

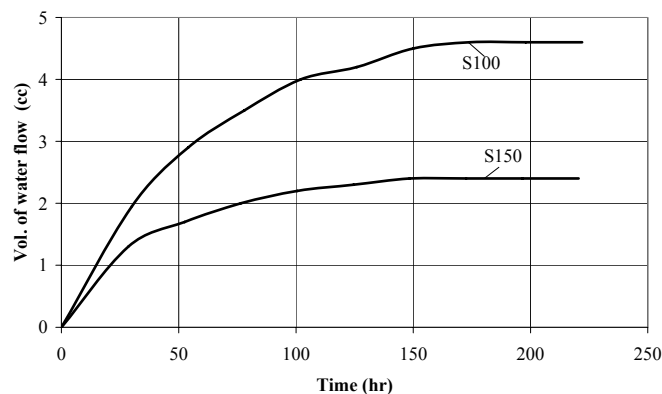
برای اندازه‌گیری و کنترل مکش بافتی خاک از روش جابجایی محوری و تر نمودن خاک استفاده شده است. در این مرحله برای نمونه خاک مفروض با اعمال فشار هوایی معادل با ۳۰۰ کیلو پاسکال فشار هوای حفره‌ای خاک را از مقدار فشار صفر (اتمسفریک) به مقدار ۳۰۰ کیلو پاسکال افزایش داده و متناظر با آن فشار آب درون محفظه زیرین دیسک سرامیک و بورت متصل به آن را به مقدار ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال می‌رسانیم. در نتیجه مقدار مکش بافتی نمونه خاک برابر تفاضل فشارهای هوا و آب حفره‌ای و به ترتیب برابر ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال خواهد بود. با توجه به آن که مکش بافتی اولیه خاک دارای مقداری بیشتر از ۱۰۰ kpa می‌باشد در نتیجه یک جریان آب از سمت محفظه زیرین دیسک به درون نمونه خاک خواهیم داشت. با ورود جریان آب از طریق دیسک سرامیکی به نمونه خاک درصد رطوبت و درجه اشباع آن افزایش یافته و تا زمان رسیدن مکش بافتی خاک به مقدار ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال ادامه خواهد یافت که اصطلاحاً به این فرآیند مرحله تر شدن خاک می‌گوییم. با گذشت زمان روند ورود آب به نمونه خاک کاهش یافته و بعد از مدتی (بین ۶ الی ۱۲ روز) دیگر آبی وارد نمونه خاک نخواهد شد. در این حالت اصطلاحاً خاک به حالت تعادل رسیده است. زمان رسیدن خاک به حالت تعادل به عوامل متعددی همچون نفوذ پذیری خاک غیر اشباع، مکش بافتی اولیه، شرایط تراکم، درصد رطوبت اولیه نمونه خاک و ضخامت دیسک سرامیکی متخلخل بستگی دارد. حجم آب ورودی به نمونه تا زمان رسیدن آن به حالت تعادل متناوباً اندازه‌گیری شده است. در تصویر ۴ نمودار تر شدن خاک تا رسیدن به حالت تعادل آورده شده است.

با رسیدن نمونه خاک به حالت تعادل مقدار تنش‌های همه جانبه وارد بر نمونه خاک را به اندازه تنش تحکیمی موثر (۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال) افزایش داده شده است. در این مرحله امکان زهکشی آب و هوای حفره‌ای وجود داشته و تحکیم نمونه تا زائل شدن اضافه فشارهای آب و هوای حفره‌ای ادامه می‌یابد. این مرحله بر حسب درجه اشباع خاک بین چند ساعت تا چندین روز به طول می‌انجامد.

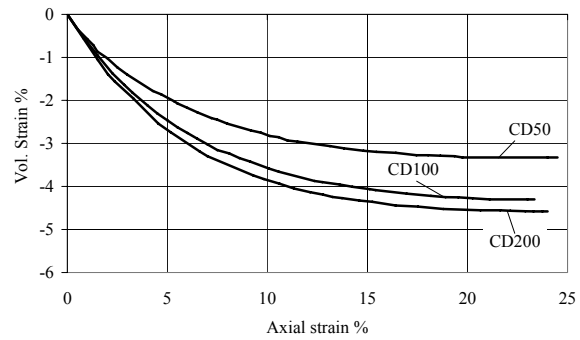
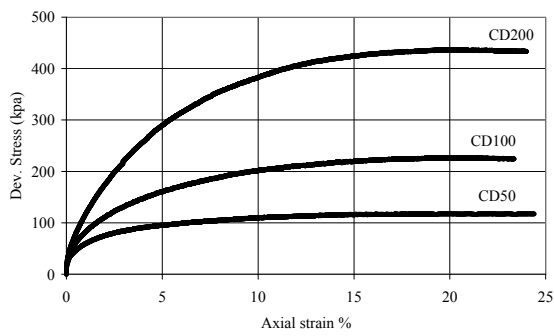
با اتمام مرحله تحکیم، بارگذاری نمونه خاک تا رسیدن آن به حالت گسیختگی آغاز می‌شود. در این مرحله نیز مشابه مرحله تحکیم شرایط زهکشی فازهای آب و هوای حفره‌ای به نوع آزمایش بستگی دارد. با توجه به آن که آزمایش مفروض از نوع CW بوده در این مرحله تنها اجازه زهکشی به فاز هوای حفره‌ای را خواهیم داد و آب حفره‌ای درون نمونه خاک به صورت زهکشی نشده می‌باشد. در نتیجه در طول اعمال بارهای انحرافی مقدار فشار هوای حفره‌ای ثابت بوده و بسته به رفتار نمونه خاک فشار آب حفره‌ای تغییر خواهد نمود. نرخ کرنش بارگذاری قائم نمونه خاک در آزمایش‌های CW بهتر است از مقدار ۰٫۰۱ میلی متر بر دقیقه کمتر باشد. در آزمایش‌های انجام شده از نرخ کرنش ۰٫۰۰۹ میلی متر بر دقیقه استفاده شده است. آزمایش‌های سه محوری اشباع نیز با نرخ کرنش‌های ۰٫۰۵ و ۰٫۵ میلی متر بر دقیقه به ترتیب در حالت‌های زهکشی شده و نشده انجام شده‌اند. با توجه به آن که امکان زهکشی هوای نمونه در طول مرحله بارگذاری قائم وجود دارد نمونه خاک دچار تغییر حجم شده و مقادیر مکش بافتی، درجه اشباع و نسبت تخلخل آن نیز تغییر خواهند نمود تا آن که نمونه خاک به حالت گسیختگی برسد. مدت زمان لازم برای رسیدن نمونه خاک به حالت گسیختگی بین ۴۰ تا ۵۴ ساعت خواهد بود. در تصویر ۵ نتایج آزمایش‌های سه محوری اشباع در حالت کاملاً زهکشی آورده شده است. در تصاویر ۶-الف و ب نیز نتایج آزمایش‌های سه محوری غیر اشباع به ترتیب در ۲ حالت مکش بافتی اولیه ۱۵۰ و ۱۰۰ کیلو پاسکال آورده شده است. در تصویر ۷ نتایج مربوط به رفتار حالت اشباع خاک در حالت بارگذاری زهکشی نشده نشان داده شده است.

نتایج

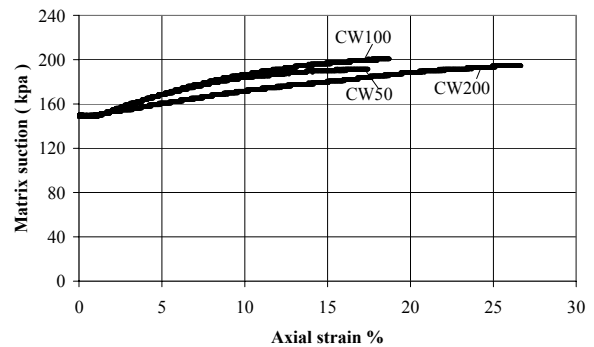
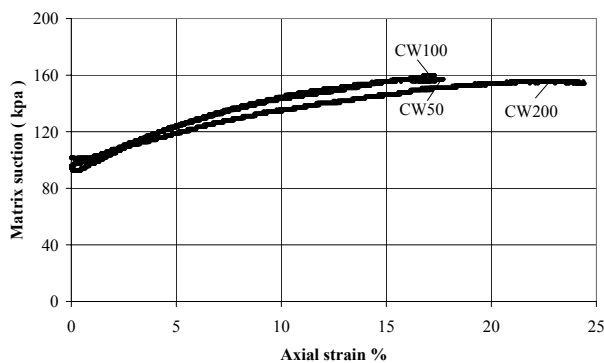
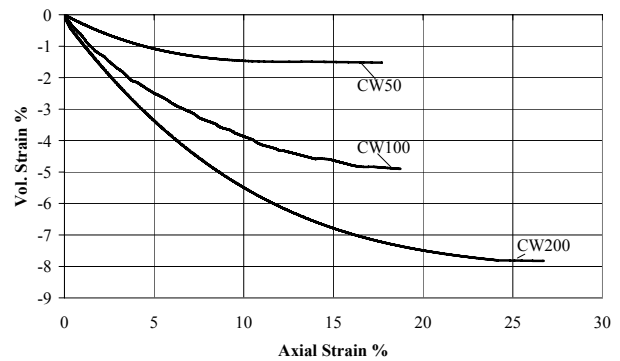
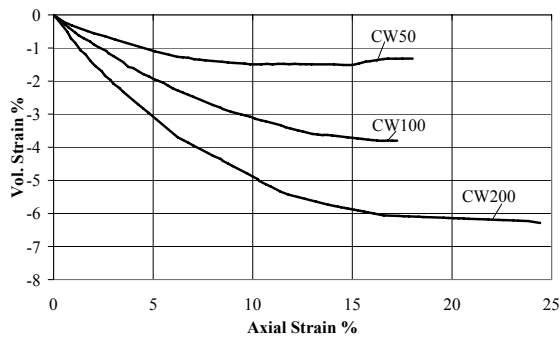
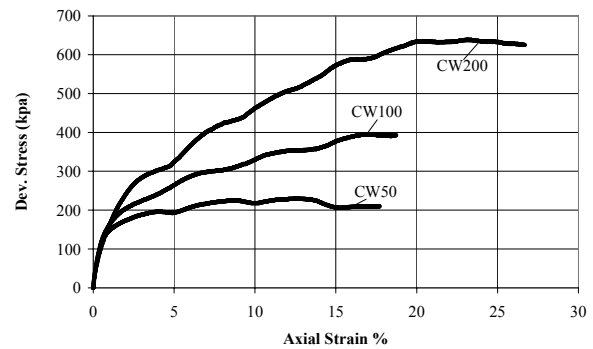
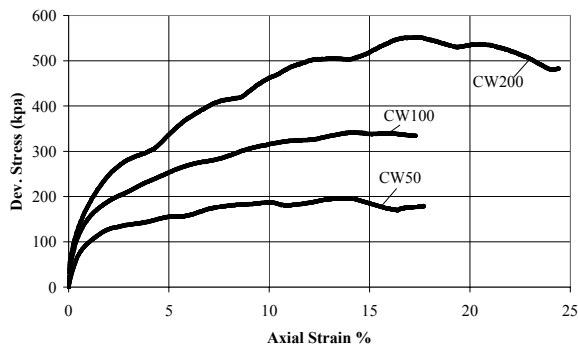
در تصویر ۶ نتایج مربوط به آزمایش‌های سه محوری اشباع در حالت کاملاً زهکشی شده آورده شده است. مطابق این تصویر تغییرات تنش انحرافی قائم و آب حفره‌ای نمونه خاک در محدوده کرنش‌های ۲۰ الی ۲۵ درصد ثابت شده و خاک به حالت بحرانی رسیده است. پارامترهای مقاومت برشی و رفتار حالت بحرانی خاک در حالت اشباع در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به نتایج ضریب اصطکاک داخلی موثر و چسبندگی خاک در حالت اشباع کامل به ترتیب ۳۰٫۹ درجه و ۳ کیلو پاسکال می‌باشند.



تصویر ۴- نمودار تر شدن خاک در مرحله تعادل



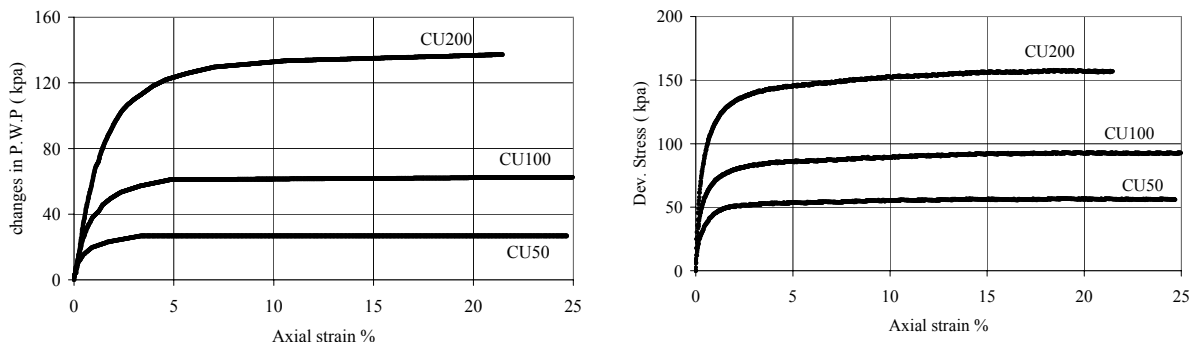
تصویر ۵- نتایج آزمایش های سه محوری اشباع در حالت کاملاً زهکشی شده



ب- مکش بافتی اولیه ۱۰۰ کیلو پاسکال

الف - مکش بافتی اولیه ۱۵۰ کیلو پاسکال

تصویر ۶- نتایج آزمایش های سه محوری غیر اشباع



تصویر ۷- نتایج آزمایش های سه محوری اشباع در حالت کاملاً زهکشی شده

آزمایش های سه محوری غیر اشباع نیز تا ثابت شدن تغییر حجم نمونه خاک، مکش بافتی و تنش انحرافی قائم ادامه داده شده اند. در این وضعیت خاک به حالت بحرانی رسیده است. در جدول ۴ مقادیر نهایی متغیر های حالت تنش و مشخصات فازی نمونه های خاک در لحظه گسیختگی آورده شده است. با توجه به جدول ۴ ملاحظه می شود که مقدار بدست آمده برای زاویه اصطکاک داخلی موثر، ϕ' ، چسبندگی، c' ، و زاویه اصطکاک ϕ^b به ترتیب برابر ۳۱،۲۷ درجه، ۱،۵ کیلو پاسکال و ۹،۱ درجه می باشند. مقادیر بدست آمده برای پارامتر های ϕ' و c' از آزمایش های غیر اشباع با نتایج بدست آمده از آزمایش های اشباع مطابقت می کند.

جدول ۳- پارامتر های مقاومت برشی و رفتار حالت بحرانی خاک در حالت اشباع

$c'(kpa)$	$\phi'(deg)$	M	λ	Γ
۳	۳۰،۹	۱،۳۱	-۰،۰۵۷	۱،۷۵۹

جدول ۴- مقادیر نهایی متغیر های حالت تنش و مشخصات فازی نمونه های خاک غیر اشباع

مکش بافتی اولیه	۱۰۰			۱۵۰		
	$(\sigma_3 - u_a)$	۵۰*	۱۰۰	۲۰۰	۵۰	۱۰۰
$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$	۲۰۲،۹۲	۲۹۳	۵۱۹،۷	۲۳۹،۱	۳۵۰،۷	۵۶۱
$(u_a - u_w)_f$	۱۵۷،۱	۱۵۹،۹	۱۵۵،۶	۱۹۱،۴	۲۰۰،۶	۱۹۴
$(S_r)_f \%$	۴۹	۵۴	۶۳،۴	۴۵،۹	۵۲،۴	۶۲
$(1+e)_f$	۱،۵۳	۱،۴۸	۱،۴۱	۱،۵۳	۱،۵	۱،۴
$c'(kpa)$	۱،۵			۱،۳		
$\phi'(deg)$	۳۱،۲۷			۳۰،۴۳		
$\phi^b(deg)$	۹،۱			۱۰،۵		

* تنش ها بر حسب کیلو پاسکال می باشند.

تشکر و قدردانی

در پایان لازم است تا از معاونت پژوهش دانشگاه تربیت مدرس به واسطه حمایت مالی این پروژه تشکر و قدردانی گردد.

مراجع

1. Bishop, M.A. & Blight, G.E. 1963. Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soil. Geotechnique 13(3): 177-197.



2. Escario, V. & Saez, J. 1986. The shear strength of partly saturated soils. Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soil. *Géotechnique* 36(3): 453-456.
3. Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R. & Widger, R.A. 1978. The shear strength of unsaturated soils. *Can. Géotech. J.* 15(3): 177-197. 313-321.
4. Fredlund D.G. and Rahardjo H. . (1994) *John Soil mechanics for unsaturated soils*. JOHN WILEY AND SONS INC.