

ارزیابی تأثیر مکش بافتی، درجه‌ی اشباع و تراکم نسبی بر روی مقاومت برشی و رفتار مکانیکی خاک‌های ماسه‌یی رس‌دار غیراشباع

علی میرزایی (کارشناس ارشد)

سید شهاب‌الدین ینوبی (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

در این نوشتار به مطالعه‌ی آزمایشگاهی تأثیر مکش بافتی، درجه‌ی اشباع و تراکم نسبی بر روی مقاومت برشی و رفتار مکانیکی نوعی خاک ماسه‌یی رس‌دار پرداخته شده است. لذا از آزمایش‌های سه‌محوری در دو حالت کاملاً اشباع و غیراشباع استفاده شده است. آزمایش‌های اشباع در دو حالت تحکیم یافته - زهکشی شده و تحکیم یافته - زهکشی نشده در دو گروه با تراکم‌های نسبی مختلف در تنش‌های تحکیمی مؤثر 50° ، 100° و 200° کیلوپاسکال انجام شده‌اند. برای انجام آزمایش‌های غیراشباع از دستگاه سه‌محوری غیراشباع ساخته شده در دانشگاه تربیت مدرس استفاده شده است. آزمایش‌های سه‌محوری غیراشباع به صورت تحکیم یافته با مقدار آب ثابت (CW) در دو گروه با تراکم نسبی مختلف در مقادیر مختلف مکش بافتی اولیه 30° ، 100° و 150° کیلوپاسکال در تنش‌های تحکیمی مؤثر 50° ، 100° و 200° کیلوپاسکال انجام شده‌اند. برای اندازه‌گیری مکش بافتی و تغییر حجم فازهای آب و هوای حفره‌یی خاک از روش جابجایی محوری و سلول دو جداره‌ی غیراشباع استفاده شده است. بر پایه‌ی نتایج به دست آمده تأثیر مکش بافتی، درجه‌ی اشباع، تراکم نسبی و تنش‌های تحکیمی بر روی تغییرات حجم و فشار آب و هوای حفره‌یی نمونه‌های خاک بررسی شده‌اند. در ادامه رفتار مکانیکی خاک با استفاده از متغیرهای حالت تنش در خاک‌های غیراشباع مطالعه شده و پارامترهای گسیختگی برشی خاک مورد مطالعه محاسبه شده‌اند.

واژگان کلیدی: خاک‌های غیراشباع، مکش بافتی، درجه‌ی اشباع، فشارهای حفره‌یی، روش جابجایی محوری، آزمایش‌های سه‌محوری غیراشباع، رفتار مکانیکی، مقاومت برشی.

ali_mirzaii@modares.ac.ir
yasrobis@modares.ac.ir

مقدمه

از جمله بحث‌های مطرح در مجامع علمی در حیطه‌ی مهندسی ژئوتکنیک، مطالعه‌ی رفتار مهندسی خاک‌ها است. رفتار مکانیکی یک خاک عمدتاً شامل مطالعه‌ی رفتار تغییر حجمی و مقاومت برشی بوده است و با استفاده از متغیرهای حالت تنش بیان شده است. این متغیرها مستقل از خصوصیات خاک است و تعداد آن‌ها مستقیماً به تعداد فازهای موجود در خاک بستگی دارد. متغیر حالت تنش در خاک‌های کاملاً اشباع را اصل تنش مؤثر نامیده‌اند که با رابطه‌ی ۱ بیان شده است:^[۱]

در رابطه‌ی ۱، σ' تنش مؤثر؛ u_w فشار آب حفره‌یی؛ و σ تنش کل است. نتایج آزمایش‌ها و تجارب پژوهشگران نشان داده است که برای بیان رفتار مکانیکی خاک‌های کاملاً اشباع استفاده از یک متغیر تنش همچون رابطه‌ی ۱ کاملاً مطلوب است. از جمله کاربردهای اصل تنش مؤثر در خاک‌های اشباع بیان مقاومت برشی خاک است. مقاومت برشی خاک‌های کاملاً اشباع با استفاده از اصل تنش مؤثر و پوش گسیختگی موهر - کولمب به صورت رابطه‌ی ۲ بیان شده است:^[۱]

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_w) \times \tan \varphi' \quad (2)$$

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad (1)$$

در رابطه‌ی ۲، τ_f تنش برشی گسیختگی؛ c' چسبندگی مؤثر؛ و φ' زاویه اصطکاک داخلی مؤثر خاک است. به دلیل سه‌فازی بودن خاک‌های غیراشباع رفتار مکانیکی

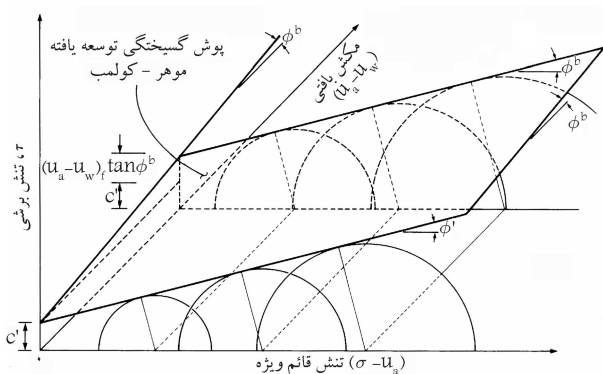
در رابطه‌ی ۵، c' محل تقاطع پوش گسیختگی موهر-کولمب در صفحه‌ی تنش‌های قائم ویژه - تنش‌های برشی متناظر با مکش بافتی صفر با محور تنش‌های برشی است و اصطلاحاً به آن جسیبندگی مؤثر اطلاق می‌شود؛ $(u_a - u_w)_f$ ، $(\sigma - u_a)_f$ به ترتیب مکش بافتی و تنش‌های قائم ویژه متناظر با حالت گسیختگی؛ φ' زاویه‌ی اصطکاک داخلی متناظر با متغیر $(\sigma - u_a)$ ؛ و φ^b زاویه‌ی اصطکاک متناظر با متغیر $(u_a - u_w)$ است. [۴] صفحه‌ی گسیختگی برشی متناظر با رابطه‌ی ۵، در شکل ۱ نشان داده شده است.

در جدول ۱، برخی از مقادیر پیشنهادی پژوهشگران برای پارامترهای φ^b ، φ' و c' در خاک‌های مختلف آورده شده است. [۵] برخی محققان با استفاده از اصول کار و انرژی و توان ورودی و زائل‌شده در خاک‌های غیراشباع تنش‌های مؤثر سازگار با کرنش‌های ایجادشده در خاک را به صورت رابطه‌ی ۶ پیشنهاد کرده‌اند: [۶]

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - [S_r u_w + (1 - S_r) u_a] \delta_{ij} \quad (6)$$

در رابطه‌ی ۶، σ'_{ij} تنش مؤثر؛ σ_{ij} تنش کل؛ S_r درجه‌ی اشباع؛ u_a و u_w فشار آب و هوای حفره‌یی؛ و δ_{ij} دلتای کرونگر است. سازگاری تنش‌های ویژه‌ی $(\sigma_{ij} - u_a \delta_{ij})$ و مکش بافتی $(u_a - u_w)$ نیز به ترتیب با نرخ کرنش‌های $\dot{\epsilon}_{ij}$ و $\dot{\epsilon}_{ij}$ $(-n \dot{S}_r + S_r \dot{\epsilon}_{ij})$ نشان داده شده است. [۶]

با جایگزینی $S_r = \chi$ ، رابطه‌ی ۶ مشابه اصل تنش مؤثر پیشاپ در خاک‌های غیراشباع (رابطه‌ی ۴) خواهد شد.



شکل ۱. صفحه‌ی گسیختگی برشی در خاک‌های غیراشباع. [۵]

جدول ۱. مقادیر پیشنهادی پژوهشگران برای پارامترهای φ^b ، φ' و c' در خاک‌های مختلف. [۵]

نوع خاک	c' (kPa)	φ' (deg)	φ^b (deg)	روش آزمایش	منبع
Compacted shale	۱۵٫۸	۲۴٫۸	۱۸٫۱	CW ^(۱)	پیشاپ (۱۹۶۰)
Boulder clay	۹٫۶	۲۷٫۳	۲۱٫۷	CW	پیشاپ (۱۹۶۰)
Dhanauri clay $\rho_d = ۱۵۸۰ \text{ kg/m}^3$	۳۷٫۳	۲۸٫۵	۱۶٫۲	CD ^(۲)	ساتیجا (۱۹۷۸)
Dhanauri clay $\rho_d = ۱۴۷۸ \text{ kg/m}^3$	۲۰٫۳	۲۹٫۰	۱۲٫۶	CD	ساتیجا (۱۹۷۸)
Dhanauri clay $\rho_d = ۱۵۸۰ \text{ kg/m}^3$	۱۵٫۵	۲۸٫۵	۲۲٫۶	CW	ساتیجا (۱۹۷۸)
Dhanauri clay $\rho_d = ۱۴۷۸ \text{ kg/m}^3$	۱۱٫۳	۲۹٫۰	۱۶٫۵	CW	ساتیجا (۱۹۷۸)
Madrid grey clay	۲۳٫۷	۲۲٫۵	۱۶٫۱	CD(direct shear)	اسکاریو (۱۹۸۰)
Decomposed granite	۲۸٫۹	۳۳٫۴	۱۵٫۳	CD (مرحله‌یی)	هو - فردلوند (۱۹۸۲)
Decomposed rhyolite	۷٫۴	۳۵٫۳	۱۳٫۸	CD (مرحله‌یی)	هو - فردلوند (۱۹۸۲)
Tappen-Notch Hill silt	۰٫۰	۳۵٫۰	۱۶٫۰	CD (مرحله‌یی)	کراهن (۱۹۸۹)
Compacted glacial till	۱٫۰	۲۵٫۳	۲۵٫۵ - ۷	CD (مرحله‌یی)	گان (۱۹۸۸)

آن‌ها نسبت به خاک‌های اشباع بسیار پیچیده‌تر است. مطالعات گسترده‌یی برای بیان حالت تنش با استفاده از یک متغیر حالت تنش در محیط‌های غیراشباع انجام شده است. نتایج این مطالعات همگی حاکی از این امر بوده‌اند که با استفاده از یک متغیر بیان‌گر حالت تنش نمی‌توان رفتار مکانیکی خاک‌های غیر اشباع را بیان کرد و به همین دلیل پژوهشگران به سمت استفاده از دو متغیر حالت تنش متمایل شدند و رابطه‌یی برای بیان رفتار تنش و کرنش‌های درون خاک با استفاده از دو متغیر تنش‌های مؤثر $\sigma' = \sigma - u_w$ و فشار آب حفره‌یی u_w ارائه کرده‌اند. رابطه‌ی ۳ برای بیان تنش‌های مؤثر در محیط‌های غیراشباع بیان شده است: [۳،۲]

$$\sigma' = \sigma - \beta' \times u_w \quad (3)$$

در رابطه‌ی ۳، β' ضریب بیان‌گر مرزهای سطح تماس مؤثر در مقاومت برشی خاک‌هاست. محققان با استفاده از دو متغیر حالت تنش $(\sigma - u_w)$ و $(\sigma - u_a)$ اصل تنش مؤثر در خاک‌های غیراشباع را پیشنهاد کرده‌اند: [۳،۲]

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (4)$$

در رابطه‌ی ۴، χ ضریب و بر حسب درجه‌ی اشباع؛ $(\sigma - u_a)$ تنش قائم ویژه؛ و $(u_a - u_w)$ مکش بافتی است. مقدار χ در خاک‌های خشک و کاملاً اشباع به ترتیب برابر ۰ و ۱ است.

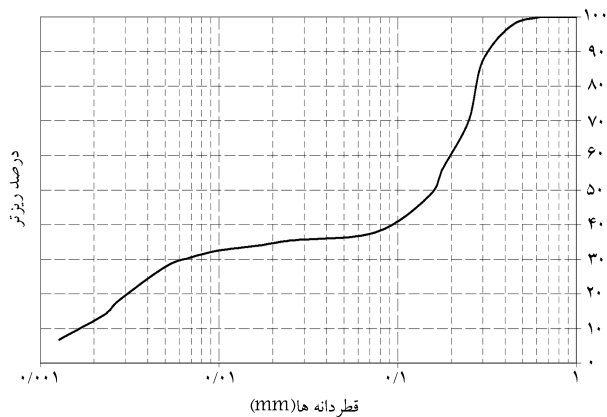
در سال ۱۹۷۷ با استفاده از مکانیک محیط‌های چند فاز، حالت تنش در خاک‌های غیراشباع و رفتار مکانیکی خاک با استفاده از سه حالت مختلف متغیرهای حالت تنش $(\sigma - u_a)$ ، $(\sigma - u_w)$ ، $(u_a - u_w)$ ، $(\sigma - u_a)$ و $(u_a - u_w)$ بررسی شده است. نتایج مطالعات حاکی از این امر بود که بهترین حالتی که می‌تواند بیان‌گر رفتار مکانیکی محیط‌های غیر اشباع باشد، استفاده از دو متغیر حالت تنش مکش بافتی، $(u_a - u_w)$ ، و تنش قائم ویژه $(\sigma - u_a)$ است. [۴]

در سال ۱۹۷۸ رفتار مقاومت برشی خاک‌های غیراشباع بر پایه‌ی دو متغیر حالت تنش $(\sigma - u_a)$ و $(u_a - u_w)$ بررسی و براساس نتایج مطالعات، رابطه‌یی بر پایه‌ی دو متغیر حالت تنش برای بیان پوش گسیختگی برشی در خاک‌های غیراشباع بیان شده است: [۴]

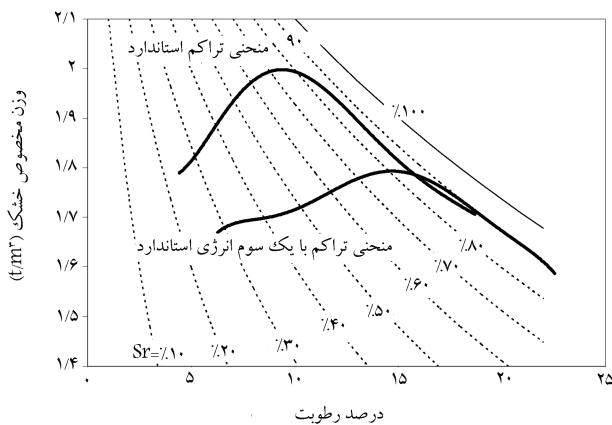
$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)_f \tan \varphi' + (u_a - u_w)_f \times \tan \varphi^b \quad (5)$$

(۱) تحکیم یافته با مقدار آب ثابت (۲) تحکیم یافته زهکشی شده

با توجه به مقادیر بالای به‌دست آمده برای وزن مخصوص خشک و بافت بسیار متراکم خاک از آزمایش تراکم استاندارد، امکان استفاده از روش جابجایی محوری برای اندازه‌گیری و یا کنترل مکش نمونه‌های ساخته شده بر روی این منحنی در آزمایش‌های سه‌محوری غیراشباع وجود نخواهد داشت. در نتیجه برای طراحی تراکم آزمایش‌های سه‌محوری غیراشباع از یک آزمایش تراکم با انرژی تراکم 1.98 kgf.cm/cm^3 (معادل 1.3 انرژی تراکم استاندارد) استفاده شده است. منحنی تراکم این آزمایش نیز در شکل ۴ ترسیم شده است. آزمایش‌های سه‌محوری انجام شده در این تحقیق با توجه به سمت خشک این منحنی انجام گرفته‌اند.^[۷]



شکل ۳. نمودار دانه‌بندی خاک مورد مطالعه.^[۷]



شکل ۴. منحنی‌های تراکم.

جدول ۲. مشخصات خاک مورد مطالعه.^[۷]

نوع خاک (طبقه‌بندی متحد)	SC
حد روانی %	۲۳٫۵
حد خمیری %	۱۴
نشانه‌ی خمیری %	۹٫۵
چگالی دانه‌ها (G_s)	۲٫۶۶
درصد رس %	۴۰
درصد رطوبت بهینه %	۹٫۵۸
وزن مخصوص بیشینه $(\text{Kn/m}^3)^*$	۱۹٫۷۱

* به‌دست آمده از آزمایش تراکم استاندارد.

در این نوشتار به بررسی تأثیر مکش بافتی، درجه‌ی اشباع و تراکم نسبی بر روی رفتار مکانیکی یک نوع خاک ماسه‌یی رس‌دار پرداخته شده است. برای این امر مجموعه‌یی از آزمایش‌های سه‌محوری در دو حالت کاملاً اشباع و غیراشباع بر روی نمونه‌های خاک مورد مطالعه انجام شده‌اند. آزمایش‌های سه‌محوری اشباع شامل ۱۲ آزمایش است که در آن‌ها نمونه‌های خاک در دو گروه با تراکم نسبی مختلف بازسازی شده‌اند و تحت تأثیر تنش‌های 50 ، 100 و 200 کیلوپاسکال تحکیم یافته و در دو حالت زهکشی شده و زهکشی نشده بارگذاری شده‌اند. آزمایش‌های سه‌محوری غیراشباع نیز شامل ۱۲ آزمایش تحکیم یافته با مقدار آب ثابت است که در دو گروه با تراکم‌های نسبی مختلف در مکش‌های بافتی اولیه 30 ، 100 و 150 کیلوپاسکال و تنش‌های تحکیمی مؤثر 50 ، 100 و 200 کیلوپاسکال انجام شده‌اند.^[۷]

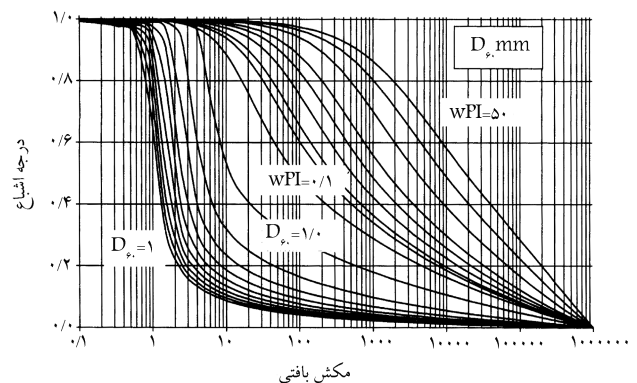
مشخصات خاک مورد مطالعه

خاک مورد مطالعه در این تحقیق به صورت مصالح ترکیبی ماسه و رس انتخاب شده است. انتخاب مصالح ترکیبی بر اساس معیارهای زیر انجام شده است:

۱. دانه‌بندی خاک به گونه‌یی باشد که مکش بافتی متناظر با درجه‌ی اشباع ماندگار از مقدار 400 کیلوپاسکال بیشتر نشود. برای این امر از دسته منحنی‌های مشخصه‌ی آب - خاک و ارائه شده بر حسب دانه‌بندی و شکل‌پذیری برای خاک‌های مختلف استفاده شده است (شکل ۲). با توجه به شکل ۲ خاک‌های ماسه‌یی رس‌دار و یا ماسه‌ی سیلتی برای این امر مناسب هستند (متناظر با $Dr = 0.2$).^[۸]
۲. شکل‌پذیری خاک ترکیبی در حدود $10-15$ باشد تا بتوان تأثیر چسبندگی را نیز در رفتار مکانیکی خاک بررسی کرد.

خاک ماسه‌ی مورد استفاده از جنس سیلیس و از معدن سنگ سیلیس فیروزکوه تهیه شده است. این خاک کاملاً درشت‌دانه با اندازه‌ی دانه‌های بزرگ‌تر از 0.75 میلی‌متر است. خاک رس مورد مطالعه از نوع کائولینیت با اندازه‌ی تمامی ذرات کوچک‌تر از 0.75 میلی‌متر است. مصالح ترکیبی این تحقیق شامل 60% ماسه و 40% کائولینیت است که به صورت درصد وزنی و در حالت کاملاً خشک با یکدیگر ترکیب شده‌اند. در شکل ۳، نمودار دانه‌بندی ترکیب ماسه و کائولینیت نشان داده شده است. نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های شناسایی پایه‌ی خاک نیز در جدول ۲ آورده شده‌اند.^[۷]

برای به‌دست آوردن منحنی‌های تراکم، آزمایش تراکم استاندارد بر روی خاک مورد مطالعه انجام شده است. در شکل ۴، نمودار تراکم استاندارد خاک ترسیم شده است.



شکل ۲. نمودارهای مشخصه آب - خاک برای خاک‌های مختلف.^[۸]

رفتار مکانیکی خاک در حالت اشباع - آزمایش‌های

سه محوری

برای مطالعه‌ی رفتار مکانیکی خاک مورد مطالعه در حالت اشباع کامل مجموعه‌ی از آزمایش‌های سه محوری در دو حالت تحکیم یافته - زهکشی شده و تحکیم یافته - زهکشی نشده در دو گروه مختلف در تنش‌های تحکیمی مؤثر ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوباسکال انجام شده‌اند. مشخصات این گروه‌ها با توجه به سمت خشک منحنی تراکم با انرژی کمتر انتخاب شده‌اند. در جدول ۳، مشخصات فیزیکی نمونه‌های خاک در گروه‌های مختلف آورده شده است. مطابق جدول ۳ مشاهده می‌شود که نمونه‌های خاک گروه اول دارای درجه‌ی اشباع و تراکم نسبی کمتری نسبت به نمونه‌های خاک گروه دوم هستند.^[۷]

نمونه‌های خاک به شکل استوانه‌ی با قطر ۴٫۹۵ و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر در ۸ لایه‌ی یکسان با ضخامت ۱٫۲۵ سانتی‌متر بازسازی شده‌اند. این نمونه‌ها در تراکم‌های نسبی و درصد رطوبت مختلف در داخل یک قالب متراکم شده‌اند و سپس با ابزار مخصوص در آوردن نمونه از داخل قالب خارج شده‌اند.^[۷] بعد از اشباع کامل نمونه‌های خاک، فشار همه‌جانبه‌ی وارد بر نمونه با توجه به فشار آب و مقدار تنش تحکیمی مؤثر افزایش داده شده است. با توجه به نوع آزمایش‌های سه محوری در این تحقیق در مرحله‌ی تحکیم، اضافه فشارهای آب حفره‌ی در طول تحکیم زهکشی شده‌اند. با گذشت زمان حجم آب خروجی از داخل نمونه‌های خاک در یک مقدار معین ثابت شده است. این زمان به نوع خاک، تنش‌های تحکیمی مؤثر و میزان تراکم نمونه‌ها وابسته است و برای اغلب نمونه‌های خاک مورد مطالعه در این تحقیق بین ۴-۸ ساعت به طول می‌انجامد.^[۷]

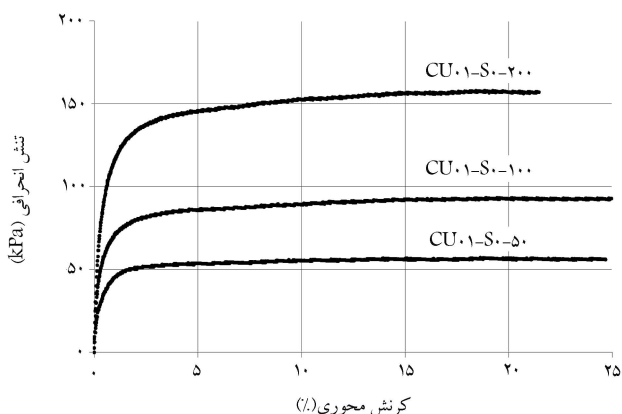
با اتمام تحکیم نمونه‌های خاک، بارهای انحرافی به صورت قائم بر آن‌ها وارد شده‌اند. در این مرحله در آزمایش‌های تحکیم یافته - زهکشی شده امکان زهکشی آب حفره‌ی درون خاک وجود داشته است و در آزمایش‌های تحکیم یافته - زهکشی نشده در انتهای مرحله‌ی تحکیم، شیرهای مجاری بالا و پایین نمونه بسته شده و امکان زهکشی آب حفره‌ی وجود نداشته است. نرخ سرعت بارگذاری قائم با توجه به نوع آزمایش و مدت زمان تحکیم انتخاب شده است. با توجه به مشخصات خاک مورد مطالعه از نرخ سرعت ۰٫۵ میلی‌متر بر دقیقه برای اعمال بارهای قائم در آزمایش‌های زهکشی نشده و از نرخ کرنش ۰٫۵ میلی‌متر بر دقیقه در آزمایش‌های زهکشی شده استفاده شده است.^[۷]

در آزمایش‌های زهکشی نشده، با توجه به عدم امکان زهکشی اضافه‌ی فشارهای حفره‌ی ایجاد شده در نمونه‌ی خاک به واسطه‌ی اعمال بارهای قائم، تغییر حجم نمونه‌ی خاک ثابت است. در آزمایش‌های زهکشی شده، به واسطه‌ی زائل شدن اضافه‌ی فشارهای حفره‌ی ایجاد شده به واسطه‌ی بارگذاری، حجم نمونه‌ی خاک تغییر کرده است. بارگذاری نمونه‌های خاک تا رسیدن نمونه‌ها به گسیختگی کامل ادامه داده شده‌اند. در این وضعیت مقادیر تنش‌های انحرافی قائم و فشار آب حفره‌ی به سمت یک مقدار ثابت حرکت کرده است.^[۷]

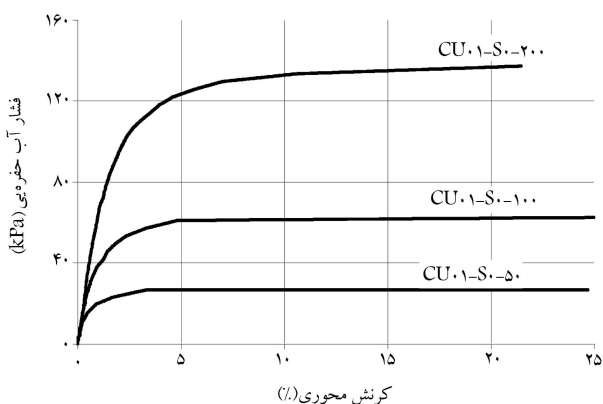
در شکل‌های ۵ تا ۸، نمودارهای تغییرات تنش انحرافی قائم، q ، و فشار آب حفره‌ی، Δu ، در برابر کرنش‌های محوری، ε ، در آزمایش‌های تحکیم یافته - زهکشی نشده برای گروه‌های مختلف آورده شده است.^[۷]

در شکل‌های ۹ تا ۱۲، نیز نمودارهای تغییرات تنش انحرافی قائم، q ، و کرنش‌های حجمی، $\Delta \varepsilon_v$ ، در برابر کرنش‌های محوری، ε ، در آزمایش‌های تحکیم یافته - زهکشی شده برای گروه‌های مختلف آورده شده است.^[۷]

مطابق نتایج مشاهده می‌شود که در آزمایش‌های زهکشی نشده شیب نمودار تغییرات تنش انحرافی قائم در محدوده‌ی کرنش‌های ۱۵ تا ۲۵ درصد افقی شده و خاک به مقاومت نهایی خود رسیده است. در شکل‌های ۹ و ۱۱ نمودار تغییرات q به ترتیب برای گروه‌های اول و دوم در آزمایش‌های زهکشی شده نشان داده شده است. با دقت در این تصاویر مشاهده می‌شود که شیب این نمودارها در محدوده‌ی کرنش‌های ۲۰ تا ۲۴ درصد افقی شده است و نمونه‌های خاک گسیخته شده‌اند. با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌های سه محوری اشباع در دو حالت



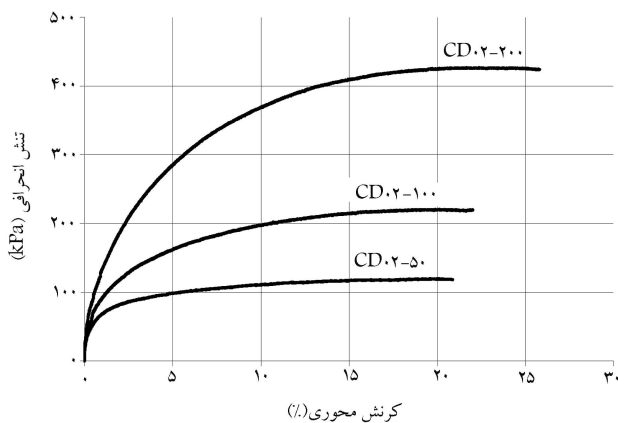
شکل ۵. نمودار $q - \varepsilon$ در آزمایش‌های زهکشی نشده - گروه اول ($R_c = 84.42\%$).



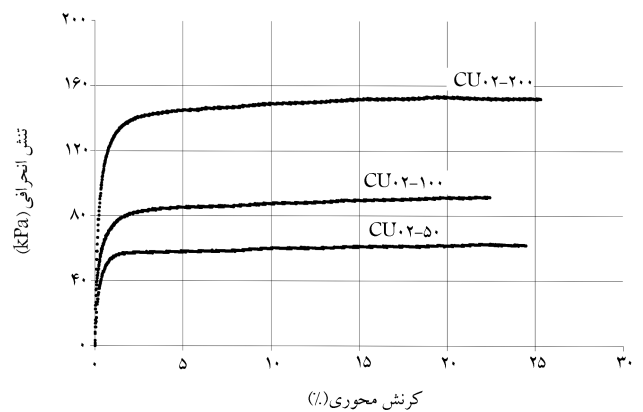
شکل ۶. نمودار $\Delta u - \varepsilon$ در آزمایش‌های زهکشی نشده - گروه اول ($R_c = 84.42\%$).

جدول ۳. مشخصات فیزیکی نمونه‌های خاک گروه‌های اول و دوم.^[۷]

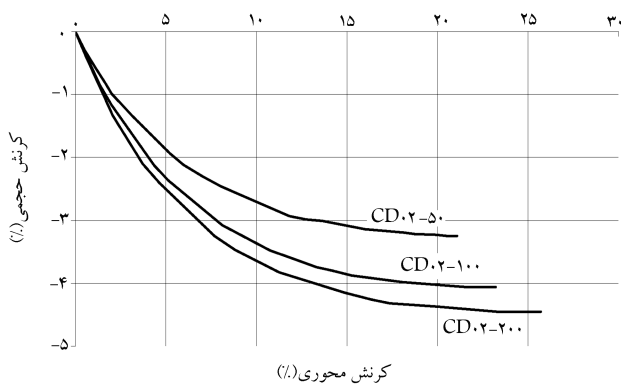
گروه دوم	گروه اول	
۱٫۷۵۰	۱٫۶۹۶	$\gamma_d (t/m^3)$
۱٫۹۱۸	۱٫۸۳۲	$\gamma_w (t/m^3)$
۲٫۰۹۹	۲٫۰۵۸	$\gamma_{sat} (t/m^3)$
۸۷٫۱۱	۸۴٫۴۲	$\%R_c$
۹٫۶	۸	$\%w$
۰٫۵۱	۰٫۵۶	e
۰٫۳۳	۰٫۳۶	n
۵۰	۳۹٫۳۶	$\%S_r$
۴٫۹۵	۴٫۹۵	$D (cm)$
۱۰	۱۰	$H (cm)$



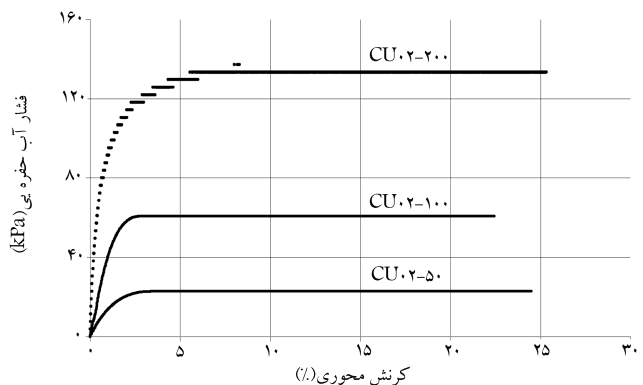
شکل ۱۱. نمودار $\epsilon - q$ در آزمایش‌های زهکشی شده - گروه دوم ($R_c = \%87/11$).



شکل ۷. نمودار $\epsilon - q$ در آزمایش‌های زهکشی نشده - گروه دوم ($R_c = \%87/11$).



شکل ۱۲. نمودار $\epsilon - \Delta \epsilon_v$ در آزمایش‌های زهکشی شده - گروه دوم ($R_c = \%87/11$).

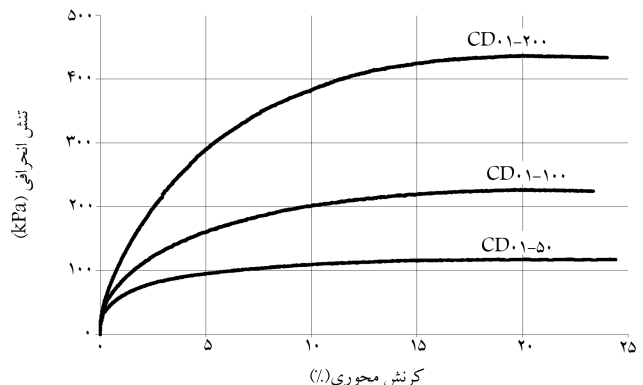


شکل ۸. نمودار $\epsilon - \Delta u$ در آزمایش‌های زهکشی نشده - گروه دوم ($R_c = \%87/11$).

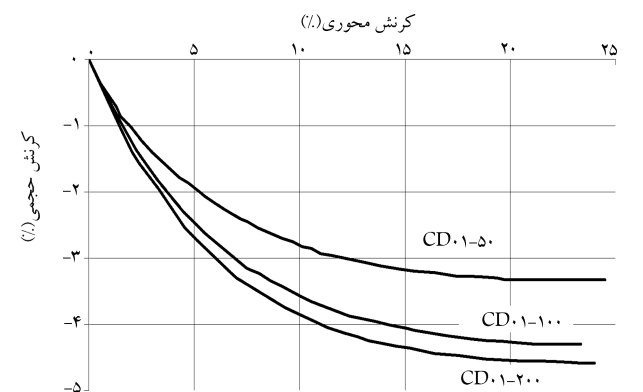
زهکشی شده و زهکشی نشده مشاهده می‌شود که در یک تراکم نسبی ثابت، افزایش تنش‌های تحکیمی مؤثر وارد بر خاک باعث افزایش مقاومت نهایی خاک شده است.

همچنین در یک مقدار ثابت تنش‌های همه جانبه مؤثر، افزایش تراکم نسبی نیز باعث افزایش مقدار نهایی مقاومت خاک شده است. در جدول ۴، مقادیر نهایی تنش‌های مؤثر همه جانبه، p' ، و تنش انحرافی قائم، q' ، مربوط به آزمایش‌های سه محوری اشباع در دو حالت تحکیم یافته - زهکشی شده و تحکیم یافته - زهکشی نشده آورده شده‌اند. بر پایه‌ی نتایج به دست آمده از آزمایش‌های سه محوری در حالت اشباع مشاهده می‌شود که افزایش تراکم نسبی نمونه‌های گروه دوم به میزان ۳٪ تأثیر چندانی بر روی مقاومت نهایی خاک در حالت اشباع کامل نخواهد داشت. با دقت بیشتر در جدول ۴ مشاهده می‌شود که در تنش تحکیمی ۵۰ کیلو پاسکال مقادیر نهایی تنش انحرافی قائم نمونه‌های خاک گروه اول به میزان اندکی از مقادیر متناظر نمونه‌های خاک گروه دوم بیشتر است و با افزایش مقادیر تنش‌های تحکیمی رفتار دو گروه در لحظه‌ی گسیختگی مشابه یکدیگر و مقاومت نهایی نمونه‌ها به هم نزدیک است. این امر به واسطه‌ی تراکم کمتر نمونه‌های گروه اول است که باعث تمایل به کاهش حجم بیشتر نسبت به نمونه‌های گروه دوم در مرحله‌ی تحکیم است و شدت این امر با افزایش تنش‌های تحکیمی، افزایش می‌یابد و در تنش‌های تحکیمی ۲۰۰ کیلو پاسکال، مقاومت نهایی نمونه‌های گروه اول به میزان چند کیلو پاسکال از نمونه‌های گروه دوم بیشتر است.^[۷]

بر پایه‌ی نتایج به دست آمده، پارامترهای گسیختگی موهر - کولمب در دو حالت



شکل ۹. نمودار $\epsilon - q$ در آزمایش‌های زهکشی شده - گروه اول ($R_c = \%84/42$).

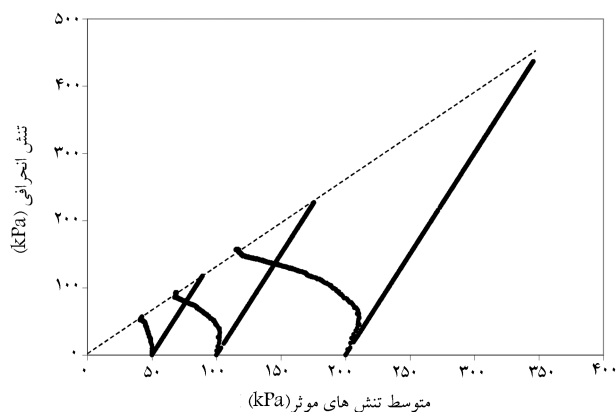


شکل ۱۰. نمودار $\epsilon - \Delta \epsilon_v$ در آزمایش‌های زهکشی شده - گروه اول ($R_c = \%84/42$).

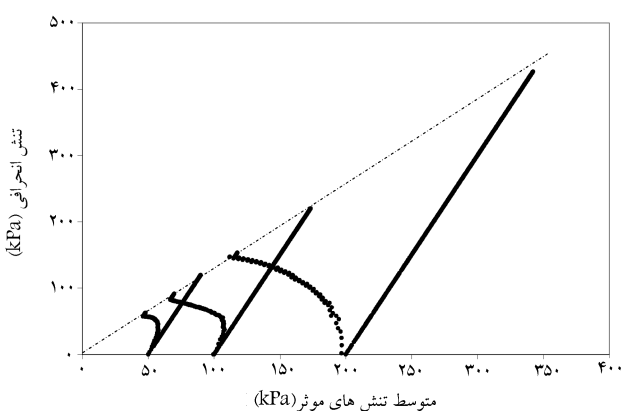
جدول ۴. مقادیر نهایی تنش‌های مؤثر همه‌جانبه، p' ، و تنش انحرافی قائم، q' ، مربوط به آزمایش‌های سه‌محوری اشباع. [۷]

p'			q'			ECP (kpa)*
۲۰۰	۱۰	۵۰	۲۰۰	۱۰۰	۵۰	
۱۱۵,۱۰	۶۶,۶۰	۴۱,۹۸	۱۵۶,۶۰	۹۳	۵۶,۰۴	CU۰۱
۱۱۱,۹۰	۶۹,۸۰	۴۷,۷۰	۱۴۷,۲۶	۹۱,۴۰	۶۱,۸۵	CU۰۲
۳۴۵	۱۷۴,۷۶	۸۹,۱	۴۳۵	۲۲۴,۳۰	۱۱۷,۳	CD۰۱
۳۴۲,۱۴	۱۷۳,۲۵	۸۹,۴۴	۴۲۶,۹۵	۲۱۹,۷۵	۱۱۸,۳۲	CD۰۲

* تنش تحکیمی مؤثر



شکل ۱۳. مسیرهای تنش در آزمایش‌های سه‌محوری اشباع - گروه اول.



شکل ۱۴. مسیرهای تنش در آزمایش‌های سه‌محوری اشباع - گروه دوم.

فشار آب حفره‌یی نمونه‌ها مثبت است و مسیرهای تنش در سمت چپ خطوط مربوط به مسیرهای تنش حالت زهکشی شده واقع شده‌اند. [۷]

رفتار مکانیکی خاک در حالت غیر اشباع

کلیات

برای مطالعه‌ی تأثیر مکش بافتی، درجه‌ی اشباع و تراکم نسبی بر روی رفتار مکانیکی خاک در حالت غیراشباع مجموعه‌ی آزمایش‌های سه‌محوری غیراشباع بر روی خاک مورد مطالعه در این تحقیق انجام گرفته است. این آزمایش‌ها شامل ۱۲ آزمایش سه‌محوری از نوع تحکیم‌یافته با مقدار آب ثابت (CW) هستند که بر روی نمونه‌های خاک گروه‌های اول و دوم با استفاده از یک دستگاه سه‌محوری مختص آزمایش‌های غیراشباع انجام شده است.

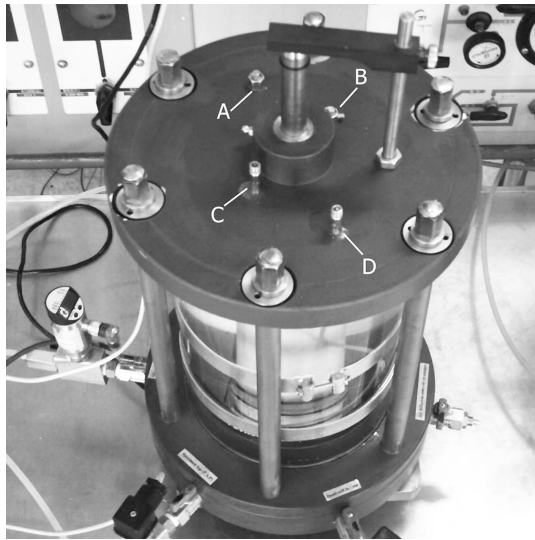
در آزمایش‌های تحکیم‌یافته با مقدار آب ثابت (CW) در مرحله‌ی اعمال تنش‌های تحکیمی امکان زهکشی فازهای آب و هوای حفره‌یی وجود داشته است و در مرحله‌ی بارگذاری قائم فقط هوای حفره‌یی زهکشی شده و آب حفره‌یی در حالت زهکشی نشده قرار دارد. طراحی و ساخت این دستگاه در دانشگاه تربیت مدرس انجام شده است. آزمایش‌های سه‌محوری غیر اشباع گروه اول (CW^o۱) در دو حالت مکش بافتی اولیه ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال (S1۵۰ و S1۰۰) در تنش‌های همه‌جانبه‌ی ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال انجام شده است. آزمایش‌های سه‌محوری غیراشباع گروه دوم (CW^o۲) نیز در دو حالت مکش بافتی اولیه ۳۰

جدول ۵. پارامترهای گسیختگی موهر-کولمب. [۷]

آزمایش‌های سه‌محوری زهکشی شده		آزمایش‌های سه‌محوری زهکشی نشده		c' (kpa)
گروه ۲	گروه ۱	گروه ۲	گروه ۱	
۴,۲۸	۳,۳۳	۱,۰۳	۰	
۳۰,۴۳	۳۰,۹۸	۳۱,۶۰	۳۴	φ' (deg)
-	-	۱۳,۴۵	۹,۱۴	c_{cu} (kpa)
-	-	۱۲,۹	۱۴,۷	φ_{cu} (deg)

زهکشی شده و زهکشی نشده محاسبه شده‌اند. در جدول ۵ این مقادیر آورده شده‌اند. مطابق این نتایج مشاهده می‌شود که مقادیر زاویه‌ی اصطکاک داخلی و چسبندگی مؤثر در آزمایش‌های سه‌محوری گروه‌های اول و دوم تقریباً با یکدیگر برابر هستند و روند تغییرات این مقادیر مشابه روند تغییرات تنش انحرافی قائم در لحظه‌ی گسیختگی است. با در نظر گرفتن تأثیر فشارهای آب حفره‌یی در آزمایش‌های زهکشی نشده نیز می‌توان پارامترهای گسیختگی حالت زهکشی شده‌ی خاک را محاسبه کرد. این مقادیر نیز در جدول ۵ آورده شده‌اند. مشاهده می‌شود که مقادیر به دست آمده برای پارامترهای مؤثر گسیختگی موهر - کولمب از آزمایش‌های زهکشی شده و زهکشی نشده تقریباً با یکدیگر برابر هستند. [۷] در طول اعمال بارهای قائم در آزمایش‌های سه‌محوری زهکشی نشده اضافه فشارهای آب حفره‌یی به وجود آمده است و باعث تغییر فشار آب حفره‌یی نمونه‌ی خاک شده‌اند. در شکل‌های ۶ و ۸، تغییرات فشار آب حفره‌یی در آزمایش‌های سه‌محوری زهکشی نشده به ترتیب برای گروه‌های اول و دوم ترسیم شده است. مطابق این تصاویر مشاهده می‌شود که در یک مقدار ثابت تراکم نسبی، افزایش تنش‌های همه‌جانبه‌ی مؤثر بر خاک باعث افزایش مقدار اضافه‌ی فشارهای حفره‌یی به وجود آمده در مرحله‌ی اعمال بارهای قائم شده است. [۷]

در شکل‌های ۱۰ و ۱۲ نمودار تغییرات کرنش‌های حجمی در طول اعمال بارگذاری قائم در آزمایش‌های زهکشی شده گروه‌های اول و دوم نشان داده شده است. مطابق این نتایج مشاهده می‌شود که به واسطه‌ی اعمال بارهای قائم، نمونه‌ی خاک دچار کاهش حجم می‌شود و در آن کرنش‌های حجمی منفی به وجود می‌آید. این رفتار کاهش حجمی خاک در حالت زهکشی شده با رفتار افزایشی فشار آب حفره‌یی در حالت زهکشی نشده سازگار است. [۷]



شکل ۱۶. سلول دو جداره‌ی غیراشباع. [۷]

بدستال پایین (محل قرارگیری نمونه‌ی خاک) هستند. بدنه‌ی بالا و پایینی سلول با ۶ میله‌ی رابط به یکدیگر متصل می‌شوند. برای بالا بردن ایمنی و مقاومت محفظه‌ی خارجی در فشارهای همه‌جانبه‌ی بالا، شیشه‌ی خارجی سلول با ۳ تسمه‌ی فولادی پیش تنیده مسلح شده است. مقدار نیروی کششی درون تسمه‌ها را می‌توان با استفاده از پیچ‌های تعبیه‌شده بر روی تسمه‌ها تغییر داد. [۷] تابلوی دستگاه برای کنترل و اعمال فشار و اندازه‌گیری تغییر حجم فازهای آب و هوای حفره‌ی استفاده می‌شود.

در شکل ۱۵، تابلوی کنترل و بارگذاری نشان داده شده است. یکی از مهم‌ترین بخش‌های تابلو، دستگاه سیستم اعمال فشار و اندازه‌گیری آب حفره‌ی نمونه‌ی خاک است. از جمله ویژگی‌های این دستگاه نمایش جزئیات آزمایش بر روی نمایش‌گر LCD تابلوی کنترل است. این نمایش‌گر در بخش بالای تابلوی کنترل قرار دارد و مقادیر فشار همه‌جانبه، نیرو، کرنش محوری قائم و مکش بافتی درون خاک را در طول آزمایش نشان می‌دهد. با استفاده از نرم‌افزار کنترل و ثبت اطلاعات می‌توان نمایش‌گر LCD را روشن و یا خاموش کرد.

یکی از مهم‌ترین بخش‌های دستگاه سیستم پردازش و ثبت اطلاعات است که با استفاده از آن مقادیر نیروهای قائم، کرنش‌های محوری، فشار آب حفره‌ی، فشار هوای حفره‌ی و فشار همه‌جانبه در طول آزمایش ثبت و پردازش می‌شوند. در شکل ۱۵، شمای کلی سیستم ثبت و پردازش نشان داده شده است. [۷]

آزمایش‌های سه‌محوری

به‌طورکلی آزمایش‌های سه‌محوری غیراشباع شامل ۵ مرحله است: [۱۱]، [۷]

۱. آماده‌سازی دستگاه قبل از شروع آزمایش؛
۲. بازسازی نمونه‌ی خاک و راه اندازی دستگاه؛
۳. اعمال روش جابجایی محوری و ترشدن خاک؛
۴. تحکیم؛
۵. بارگذاری قائم و گسیختگی.

آماده‌سازی دستگاه

قبل از شروع انجام آزمایش بایستی دیسک سرامیکی متخلخل واقع در بدنه‌ی پایین سلول کاملاً اشباع شود. لذا بایستی سلول داخلی تا ارتفاع ۳ الی ۴ سانتی‌متر بالای

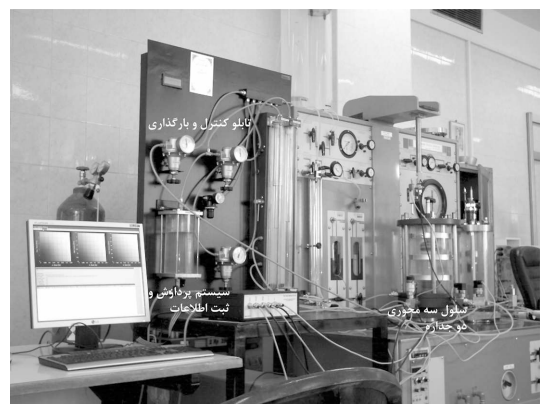
و ۱۰۰ کیلوپاسکال (S۳۰ و S۱۰۰) در تنش‌های همه‌جانبه‌ی ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال انجام شده است. برای مطالعه‌ی رفتار خاک در درجات اشباع پایین و درجات اشباع بالا آزمایش‌های سه‌محوری به‌ترتیب در مقدارهای مکش بافتی ۱۵۰ و ۳۰ کیلوپاسکال انجام شده‌اند. برای مطالعه‌ی تأثیر تراکم نسبی در مقادیر ثابت مکش بافتی آزمایش‌های سه‌محوری در مکش بافتی ۱۰۰ کیلوپاسکال انجام شده‌اند. در ادامه‌ی مطالب، ابتدا به معرفی بخش‌های مختلف دستگاه سه‌محوری غیراشباع پرداخته و سپس روند انجام آزمایش‌های غیراشباع CW بر روی خاک مورد مطالعه تشریح شده‌اند. [۷]

دستگاه سه‌محوری غیر اشباع

این دستگاه به‌طورکلی شامل سه بخش است: ۱. سلول ۲ جداره‌ی سه‌محوری غیراشباع؛ ۲. تابلو کنترل و بارگذاری؛ ۳. سیستم پردازش و ثبت اطلاعات. در شکل ۱۵، شمای کلی دستگاه و بخش‌های مختلف آن نشان داده شده است. تمامی اجزاء این دستگاه با استفاده از امکانات صنعت داخل کشور طراحی و ساخته شده است و فقط قطعات خارجی آن، حس‌گرهای به‌کار رفته در بخش ابزار دقیق و دیسک سرامیکی متخلخل هستند.

بخش‌های مختلف دستگاه به‌گونه‌ی طراحی و ساخته شده‌اند که قابلیت انجام آزمایش‌های مختلف سه‌محوری غیراشباع و SWRC را داشته باشد. سیستم ثبت اطلاعات دستگاه قادر به پردازش و ثبت داده‌ها با دقت داده‌برداری ۰/۱ ثانیه است. برای کنترل و پردازش داده‌ها یک نرم‌افزار مختص آزمایش‌های سه‌محوری غیراشباع و SWRC طراحی شده است. دستگاه سه‌محوری ساخته شده قابلیت استفاده از روش جابجایی محوری را دارد و با استفاده از سلول دوجداره‌ی غیراشباع تغییر حجم کل و آب حفره‌ی خاک در طول آزمایش مستقلاً اندازه‌گیری می‌شوند. با استفاده از این دستگاه می‌توان رفتار تغییر حجم خاک را در چرخه‌های مختلف تر و خشک‌شدگی و اعمال فشارهای همه‌جانبه بررسی کرد. [۷]

سلول دستگاه دو محفظه‌ی داخلی و خارجی دارد تا بتوان تغییر حجم کل نمونه‌ی خاک را در طول آزمایش اندازه‌گیری کرد. با توجه به آن‌که فشار درون محفظه‌های داخلی و خارجی سلول همواره با هم برابر است، این امر باعث جلوگیری از تغییر حجم جداره‌ی شیشه‌ی محفظه‌ی داخلی می‌شود. در شکل ۱۶، شمای کلی سلول سه‌محوری غیراشباع نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۶، سلول شامل دو قسمت بدنه‌ی پایین و بالا است. بدنه‌ی بالایی سلول شامل محفظه‌ی خارجی و میله‌ی بارگذاری و بدنه‌ی پایین شامل مجاری ورودی و خروجی به محفظه‌ی داخلی و



شکل ۱۵. شمای کلی دستگاه سه‌محوری غیراشباع. [۷]

دیسک سرامیکی از آب بدون هوا پُر شود و فشار هوای سلول داخلی به میزان ۶۰۰ کیلوپاسکال (بیشتر از عدد عبوری هوای دیسک سرامیکی) رسانده شود. برای اشباع کامل دیسک سرامیکی، این مرحله بایستی تا ۲۴ ساعت ادامه یابد. بعد از گذشت ۲۴ ساعت، فشار هوای درون سلول داخلی را به مقدار فشار اتمسفر کاهش می‌دهند و سپس یک جریان آب با فشار ۵۰ کیلوپاسکال به مدت ۲ دقیقه در محفظه‌ی زیرین برقرار می‌کنند تا هرگونه حباب‌های هوای به‌جامانده در محفظه‌ی زیرین و مجاری متصل به آن خارج شوند. سپس آب درون سلول داخلی تخلیه می‌شود. آب جمع‌شده بر روی دیسک سرامیکی بایستی تا زمان تعبیه‌ی نمونه‌ی خاک بر روی آن باقی بماند تا دیسک سرامیکی از حالت اشباع خارج نشود. همچنین بایستی پورت‌های مضاعف تغییر حجم کل و آب حفره‌ی نمونه‌ی خاک و مجاری متصل به آن‌ها از آب بدون هوا پُر شوند. برای تهیه‌ی آب بدون هوا بهتر است که آب معمولی شهری به مدت ۴۸ ساعت تحت اثر فشار خلاء ۸۵ کیلوپاسکال قرار بگیرد.

تراکم نمونه‌ها - راه‌اندازی دستگاه

بعد از آماده‌سازی دستگاه برای شروع آزمایش بایستی نمونه‌ی خاک بازسازی شود. با استفاده از این دستگاه می‌توان بر روی نمونه‌های با قطر ۵۰ میلی‌متر آزمایش‌های مختلف سه‌محوری غیراشباع را انجام داد. نمونه‌های خاک مورد مطالعه با توجه به مشخصات گروه‌های اول و دوم و با توجه به روش تشریح‌شده در بخش‌های قبل ساخته می‌شوند. بعد از ساختن نمونه، غشاء لاستیکی بر روی آن کشیده می‌شود. با توجه به وجود فشار هوای حفره‌ی در آزمایش‌های غیراشباع امکان نفوذ هوا از طریق غشاء به محفظه‌ی سلول وجود دارد و برای جلوگیری از این پدیده از دو غشاء لاستیکی استفاده می‌شود و فضای بین دو غشاء با لایه‌ی نازکی از گریس سیلیکون آغشته می‌شود تا مانع نفوذ هوا از طریق نمونه‌ی خاک به محفظه‌ی سلول شود. قبل از قراردادن نمونه‌ی خاک بر روی دیسک سرامیکی متخلخل، آب جمع‌شده بر روی سطح دیسک را برمی‌دارند و سپس نمونه‌ی خاک بر روی آن قرار داده می‌شود. در خاک‌های دانه‌ی و غیرچسبیده بهتر است از یک لایه‌ی نازک خمیر کائولینیت اشباع بین نمونه و دیسک سرامیکی استفاده شود. تماس بین نمونه‌ی خاک و دیسک سرامیکی بایستی به‌نحو مطلوبی برقرار شود تا بتوان مکش بافتی درون خاک را اندازه‌گیری و یا کنترل کرد. با تعبیه نمونه خاک بین پدستال پایین و کلاهک بالایی سلول و متصل نمودن بدنه بالای سلول به بدنه پایین آن، فضای درون سلول‌های داخلی و خارجی از آب پر می‌شود. سلول داخلی دستگاه بایستی با استفاده از آب بدون هوا پُر شود و نباید هیچ‌گونه حباب هوایی درون آن باقی بماند.^[۷]

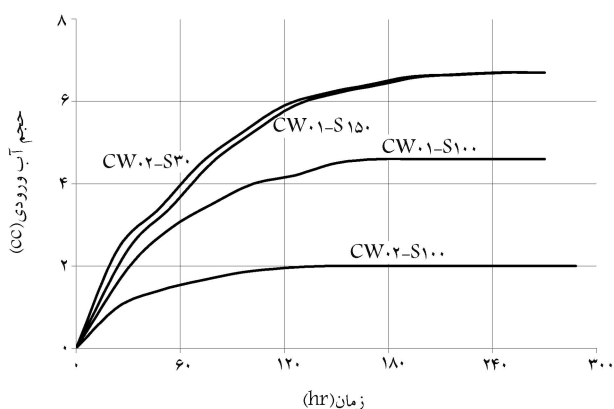
روش جابجایی محوری - تر شدن خاک

بعد از قراردادن نمونه‌ی خاک درون دستگاه و پُرکردن سلول‌های داخلی و خارجی با استفاده از روش جابجایی محوری مکش بافتی اولیه، نمونه‌ی خاک با اعمال فشار آب و ترکردن به یک مقدار معلوم رسانده شده است. برای این امر کافی است تا فشارهای آب و هوای حفره‌ی خاک متناظر با مقدار مکش بافتی مفروض بر روی مقادیر معین تنظیم شوند. اما نکته‌ی قابل توجه آن است که مقدار فشار همه‌جانبه‌ی وارد بر نمونه همواره باید برابر فشار هوای حفره‌ی باشد تا از گسیختگی نمونه‌ی خاک در طول مرحله‌ی اعمال روش جابجایی محوری جلوگیری شود. در صورتی که فشار هوای حفره‌ی نمونه‌ی خاک از فشار همه‌جانبه‌ی وارد بر آن بیشتر شود باعث بادشدن غشاء لاستیکی خواهد شد. به‌طور مشابه در صورتی که فشارهای همه‌جانبه‌ی وارد بر نمونه‌ی خاک در مرحله‌ی اعمال روش جابجایی از فشار هوای حفره‌ی بیشتر شود باعث کاهش حجم نمونه و تحکیم آن خواهد شد. در این مرحله با استفاده از روش جابجایی محوری مکش بافتی خاک با ترکردن نمونه به مقادیر ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰

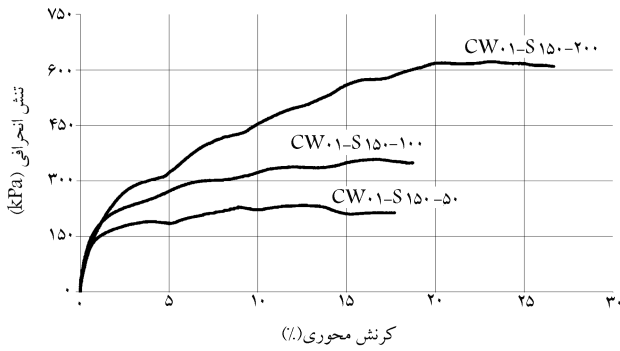
کیلو پاسکال رسانده شده‌اند. مثلاً برای ایجاد مکش بافتی ۱۰۰ کیلو پاسکال در نمونه‌های خاک با اعمال فشار هوایی معادل ۳۰۰ کیلوپاسکال فشار هوای حفره‌ی خاک از مقدار فشار صفر (اتمسفریک) به مقدار ۳۰۰ کیلوپاسکال افزایش داده شده و متناظر با آن فشار آب درون محفظه‌ی زیرین دیسک سرامیک و پورت متصل به آن به مقدار ۲۰۰ کیلوپاسکال رسانده شده است. در نتیجه مقدار مکش بافتی نمونه‌ی خاک برابر تفاضل فشارهای هوا و آب حفره‌ی و برابر ۱۰۰ کیلوپاسکال خواهد بود. با توجه به آن‌که مکش بافتی اولیه‌ی خاک مقداری بیشتر از ۱۵۰ کیلوپاسکال دارد؛ در نتیجه، یک جریان آب از سمت محفظه‌ی زیرین دیسک به درون نمونه‌ی خاک برقرار شده است. با ورود جریان آب از طریق دیسک سرامیکی به نمونه‌ی خاک درصد رطوبت و درجه‌ی اشباع آن افزایش و تا زمان رسیدن خاک به حالت تعادل ادامه می‌یابد که اصطلاحاً به این فرآیند، مرحله‌ی ترشدن خاک اطلاق می‌شود. در طول مرحله‌ی ترشدن، حجم آب ورودی به نمونه‌ی خاک تا زمان رسیدن نمونه‌ی خاک به مکش بافتی موردنظر اندازه‌گیری شده است. با گذشت زمان، روند ورود آب به نمونه‌ی خاک کاهش می‌یابد و بعد از مدتی (بین ۸ الی ۱۰ روز) دیگر، آبی وارد نمونه‌ی خاک نخواهد شد. در این حالت اصطلاحاً خاک به حالت تعادل می‌رسد و مکش بافتی آن به مقدار دلخواه رسیده است. زمان رسیدن خاک به حالت تعادل به عوامل متعددی همچون نفوذپذیری خاک غیراشباع، مکش بافتی اولیه، شرایط تراکم، درصد رطوبت اولیه‌ی نمونه‌ی خاک و ضخامت دیسک سرامیکی متخلخل بستگی دارد و معمولاً بین ۴ الی ۱۲ روز به طول می‌انجامد. با رسیدن خاک به حالت تعادل مقادیر درصد رطوبت، درجه‌ی اشباع، حجم آب و هوای نمونه و وزن مخصوص آن تغییر می‌کند. در شکل ۱۷، نمودار ترشدن نمونه‌های خاک برای گروه‌های اول و دوم متناظر با مکش بافتی ۳۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال با توجه به حجم آب ورودی به نمونه بر حسب زمان ترسیم شده است مطابق شکل ۱۷ مشاهده می‌شود که حجم آب ورودی به نمونه‌های گروه‌های $CW_{0.2-S_{30}}$ و $CW_{0.1-S_{150}}$ مرحله‌ی ترشدن تقریباً یکسان است. نمونه‌های گروه $CW_{0.1-S_{150}}$ دارای نسبت تخلخل بیشتری نسبت نمونه‌های گروه $CW_{0.2-S_{25}}$ است و با وجود آن‌که نمونه‌های گروه $CW_{0.1-S_{150}}$ به مکش بافتی اولیه ۱۵۰ کیلوپاسکال رسانیده شده‌اند، به واسطه‌ی بیشتر بودن فضای حفره‌های حجم آب ورودی به این نمونه‌ها با حجم آب ورودی به نمونه‌های گروه $CW_{0.2-S_{30}}$ تقریباً یکسان است.^[۷]

تحکیم

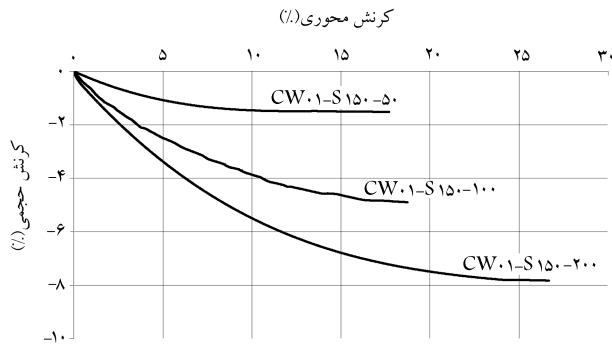
با رسیدن نمونه‌ی خاک به حالت تعادل مقدار تنش‌های همه‌جانبه وارد بر نمونه‌ی خاک به اندازه‌ی تنش تحکیمی مؤثر افزایش داده شده‌اند. در این مرحله بر حسب



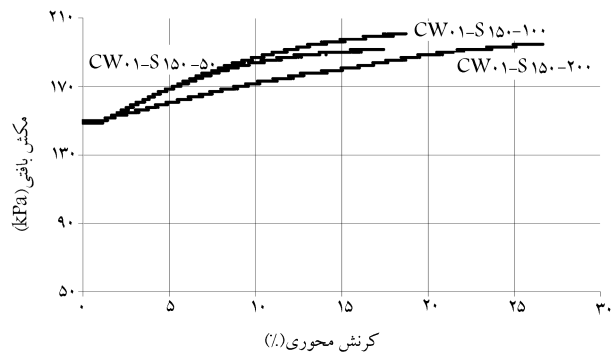
شکل ۱۷. نمودار ترشدن نمونه‌های خاک برای گروه‌های اول و دوم.



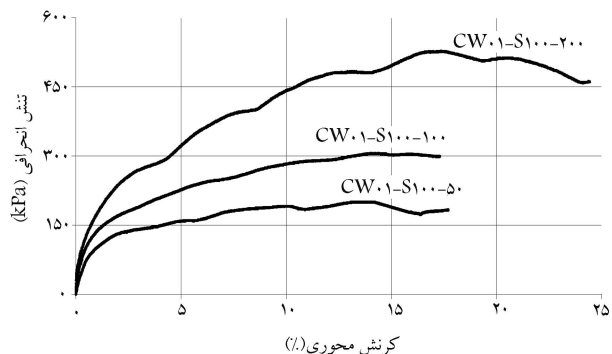
شکل ۱۸. نمودار تغییرات $\epsilon - q$ در آزمایش‌های غیر اشباع - گروه اول - مکش بافتی اولیه ۱۵۰ کیلو پاسکال.



شکل ۱۹. نمودار تغییرات $\epsilon - \epsilon_v$ در آزمایش‌های غیر اشباع - گروه اول - مکش بافتی اولیه ۱۵۰ کیلو پاسکال.



شکل ۲۰. نمودار تغییرات $\epsilon - s$ در آزمایش‌های غیر اشباع - گروه اول - مکش بافتی اولیه ۱۵۰ کیلو پاسکال.



شکل ۲۱. نمودار تغییرات $\epsilon - q$ در آزمایش‌های غیر اشباع - گروه اول - مکش بافتی اولیه ۱۰۰ کیلو پاسکال.

نوع آزمایش می‌توان شرایط زهکشی آب و هوای حفره‌ی نمونه‌ی خاک را تعیین کرد. با توجه به نوع آزمایش‌های مفروض در این تحقیق، در مرحله‌ی تحکیم امکان زائل شدن اضافی فشارهای آب و هوای حفره‌ی وجود داشته است. به واسطه‌ی زائل شدن اضافی فشارهای حفره‌ی، حجم آب و هوای حفره‌ی نمونه‌ی خاک کاهش می‌یابد و بایستی تغییر حجم آب و هوای حفره‌ی نمونه‌ی خاک در طول این مرحله متناوباً اندازه‌گیری شوند. با توجه به آنکه فشار هوای حفره‌ی بیشتر از فشار آب حفره‌ی است، عمده‌ی تغییر حجم کل نمونه‌ی خاک شامل تغییر حجم هوای حفره‌ی است و تغییر حجم فاز آب حفره‌ی بسیار کوچک (تقریباً برابر صفر) است. با گذشت زمان (حدود ۲۴ ساعت) و زائل شدن تمامی اضافی فشارهای حفره‌ی تغییر حجم نمونه‌ی خاک ثابت شده و نمونه‌ی خاک کاملاً تحکیم یافته است. [۷۵]

بارگذاری قائم

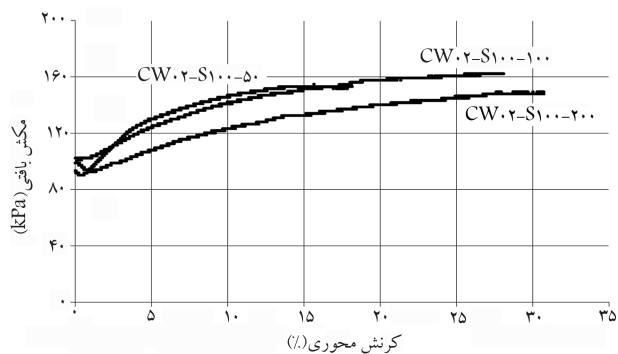
با اتمام مرحله‌ی تحکیم، بارگذاری نمونه‌ی خاک تا رسیدن آن به حالت گسیختگی آغاز شده است. در این مرحله نیز مشابه مرحله‌ی تحکیم شرایط زهکشی فازهای آب و هوای حفره‌ی به نوع آزمایش بستگی دارد. با توجه به آنکه آزمایش مفروض از نوع CW است، در این مرحله فقط اجزای زهکشی به فاز هوای حفره‌ی داده می‌شود و آب حفره‌ی درون نمونه‌ی خاک به صورت زهکشی نشده است. در نتیجه در طول اعمال بارهای انحرافی، مقدار فشار هوای حفره‌ی ثابت است و بسته به رفتار نمونه‌ی خاک فشار آب حفره‌ی تغییر می‌کند.

نرخ کرنش بارگذاری قائم نمونه‌ی خاک در آزمایش‌های CW بهتر است از مقدار ۱/۰ میلی‌متر بر دقیقه کمتر انتخاب شود. در این آزمایش‌ها از نرخ کرنش ۰/۰۹ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شده است. متداول است که نرخ کرنش آزمایش‌های غیر اشباع در حالت کاملاً زهکشی شده ۰/۱ برابر نرخ کرنش آزمایش‌های CW انتخاب شود. [۷۶] با توجه به آنکه امکان زهکشی هوای نمونه در طول مرحله‌ی بارگذاری قائم وجود دارد، نمونه‌ی خاک دچار تغییر حجم می‌شود و مقادیر مکش بافتی، درجه‌ی اشباع و نسبت تخلخل تغییر خواهند کرد تا آنکه نمونه‌ی خاک به حالت گسیختگی برسد. مدت زمان لازم برای رسیدن نمونه‌ی خاک به حالت گسیختگی معمولاً بین ۴۰ تا ۵۴ ساعت بوده است. [۷۷]

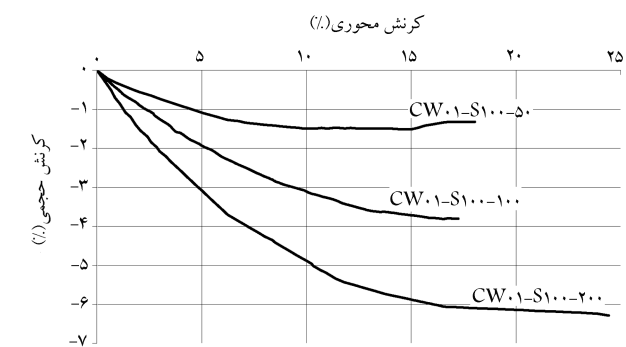
گسیختگی خاک

بعد از اتمام مرحله‌ی تحکیم، بارهای قائم بر نمونه‌ی خاک تا رسیدن به حالت گسیختگی کامل وارد شده‌اند. در طول بارگذاری قائم امکان زهکشی هوای حفره‌ی وجود دارد و آب حفره‌ی خاک در حالت زهکشی نشده قرار گرفته و بسته به شرایط آزمایش و نمونه‌ها، فشار آب حفره‌ی درون خاک در طول بارگذاری تغییر کرده است. به دلیل ثابت بودن فشار هوای حفره‌ی و تغییر کردن فشار آب حفره‌ی، مکش بافتی خاک نیز تغییر کرده است.

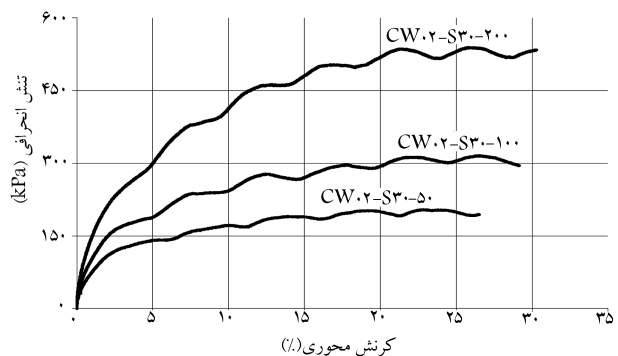
در شکل‌های ۱۸ الی ۲۳، نمودار تغییرات تنش انحرافی قائم (q)، مکش بافتی (s) و کرنش‌های حجمی (ϵ_v) بر حسب تغییرات کرنش‌های محوری (ϵ) به ترتیب برای نمونه‌های خاک گروه اول در مقادیر مکش بافتی ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال آورده شده‌اند. در شکل‌های ۲۴ الی ۲۹، نیز نمودار تغییرات تنش انحرافی قائم، مکش بافتی و کرنش‌های حجمی بر حسب تغییرات کرنش‌های محوری به ترتیب برای نمونه‌های خاک گروه دوم در مقادیر مکش بافتی ۱۰۰ و ۳۰ کیلو پاسکال آورده شده‌اند. مطابق این شکل‌ها مشاهده می‌شود که شیب نمودار تغییرات q در محدوده‌ی کرنش‌های ۱۷ تا ۲۵ درصد تقریباً افقی شده و نمونه‌های خاک کاملاً گسیخته شده‌اند.



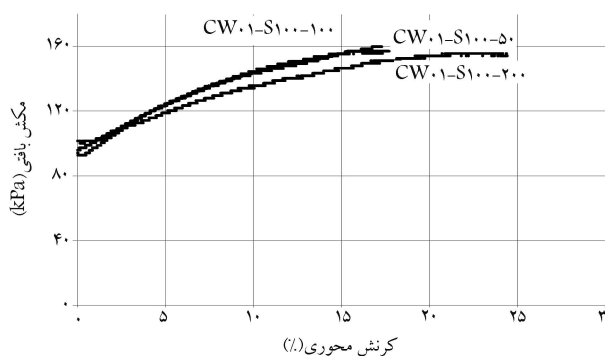
شکل ۲۶. نمودار تغییرات $s - \varepsilon$ در آزمایش‌های غیراشباع - گروه دوم - مکش بافتی اولیه ۱۰۰ کیلو پاسکال.



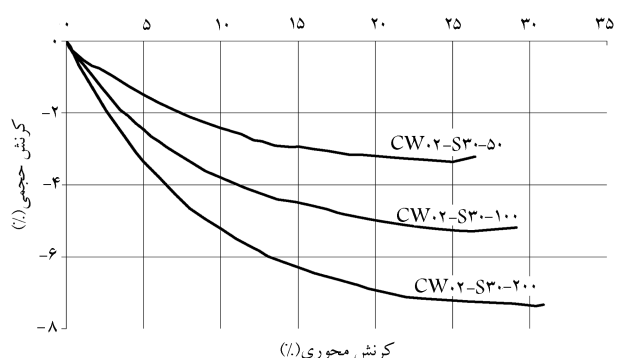
شکل ۲۲. نمودار تغییرات $\varepsilon - \varepsilon_v$ در آزمایش‌های غیراشباع - گروه اول - مکش بافتی اولیه ۱۰۰ کیلو پاسکال.



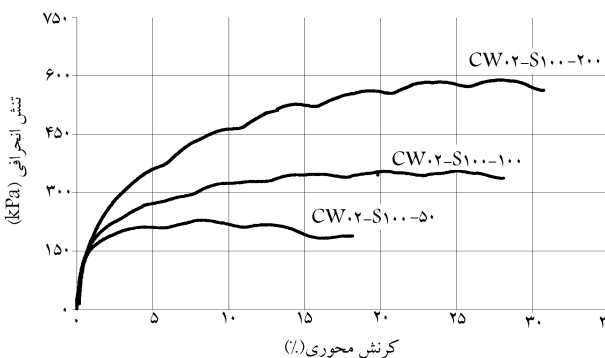
شکل ۲۷. نمودار تغییرات $q - \varepsilon$ در آزمایش‌های غیراشباع - گروه دوم - مکش بافتی اولیه ۳۰ کیلو پاسکال.



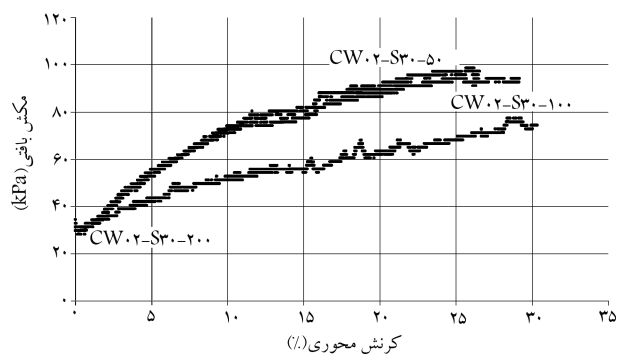
شکل ۲۳. نمودار تغییرات $s - \varepsilon$ در آزمایش‌های غیراشباع - گروه اول - مکش بافتی اولیه ۱۰۰ کیلو پاسکال.



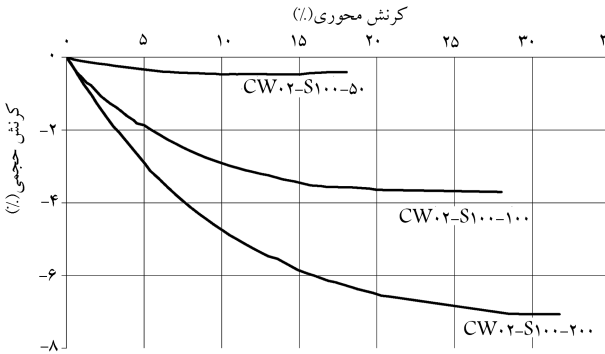
شکل ۲۸. نمودار تغییرات $\varepsilon - \varepsilon_v$ در آزمایش‌های غیراشباع - گروه دوم - مکش بافتی اولیه ۳۰ کیلو پاسکال.



شکل ۲۴. نمودار تغییرات $q - \varepsilon$ در آزمایش‌های غیراشباع - گروه دوم - مکش بافتی اولیه ۱۰۰ کیلو پاسکال.



شکل ۲۹. نمودار تغییرات $s - \varepsilon$ در آزمایش‌های غیراشباع - گروه دوم - مکش بافتی اولیه ۳۰ کیلو پاسکال.



شکل ۲۵. نمودار تغییرات $\varepsilon - \varepsilon_v$ در آزمایش‌های غیراشباع - گروه دوم - مکش بافتی اولیه ۱۰۰ کیلو پاسکال.

جدول ۶. مقادیر متغیرهای حالت تنش و مشخصات فازی نمونه‌های خاک متناظر با بیشترین تنش انحرافی قائم در آزمایش‌های سه‌محوری غیر اشباع.

آزمایش	γ_{wet}	S_r	$u_a - u_w$	e	V_a	$p - u_a$	q
CW ^۰ ۱-S15 ^۰ -5 ^۰	۱,۸۹	۴۵,۸۷	۱۸۶,۸۲	۰,۵۳۰	۳۵,۱۹۴	۱۲۸,۱۲	۲۳۲,۹۸
CW ^۰ ۱-S15 ^۰ -۱۰۰	۱,۹۷	۵۲,۲	۱۹۹,۰۸	۰,۵۰	۲۷,۳۰	۲۲۰	۳۵۶
CW ^۰ ۱-S15 ^۰ -۲۰۰	۲,۰۷۲	۶۱,۹۰	۱۹۱,۴۲	۰,۳۹۶	۱۸,۵۳۴	۴۰۷	۶۱۶
CW ^۰ ۱-S1۰۰-5 ^۰	۱,۹۰۵	۴۹,۵۱	۱۵۲,۴۷	۰,۵۲۶	۳۲,۶۵۴	۱۱۲,۹۹	۱۹۹,۹۷
CW ^۰ ۱-S1۰۰-۱۰۰	۱,۹۶۳	۵۳,۷۴	۱۵۳,۷۳	۰,۴۸۰	۲۷,۲۹	۱۹۳	۳۰۰
CW ^۰ ۱-S1۰۰-۲۰۰	۲,۰۶۳	۶۲,۹۴	۱۵۱,۰۱	۰,۴۰۷	۱۸,۵۶۴	۳۷۷	۵۲۴
CW ^۰ ۲-S1۰۰-5 ^۰	۱,۹۴۹	۵۴,۸۱	۱۴۲,۴۲	۰,۴۹۴	۲۸,۴۴۹	۱۲۴	۲۲۵
CW ^۰ ۲-S1۰۰-۱۰۰	۲,۰۳	۶۳,۰۳	۱۶۰,۶۹	۰,۴۳۳	۲۰,۴۱۸	۲۱۷	۳۵۳
CW ^۰ ۲-S1۰۰-۲۰۰	۲,۱۳۷	۷۳,۸۱	۱۴۷,۸۹	۰,۳۶۳	۱۸,۱۹۹	۳۹۷	۵۸۶
CW ^۰ ۲-S۳۰-5 ^۰	۲,۰۵	۷۰,۱۹	۹۵,۶۷	۰,۴۳۸	۱۶,۶۵۹	۱۲۶,۵۲	۲۰۳,۶۹
CW ^۰ ۲-S۳۰-۱۰۰	۲,۱۰۶	۷۵,۹۷	۹۲,۶۵	۰,۳۹۷	۱۲,۱۴۹	۲۰۵,۳۸	۳۱۵,۳۱
CW ^۰ ۲-S۳۰-۲۰۰	۲,۲۲	۹۴,۲۲	۶۹,۷۵	۰,۳۲۹	۲,۴۳	۳۷۹,۹۴	۵۳۸,۲۹

از جمله پارامترهای مؤثر بر روی روند کاهش حجم نمونه‌ها تنش‌های همه‌جانبه‌ی ویژه‌ی وارد بر خاک است. مطابق نتایج به‌دست آمده مشاهده می‌شود که در یک مقدار ثابت تراکم نسبی و مکش بافتی، افزایش تنش‌های همه‌جانبه‌ی ویژه باعث افزایش تمایل کاهش حجم نمونه‌های خاک شده است. همچنین با دقت بیشتر در نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های S15^۰ و S1۰۰ در گروه اول مشاهده می‌شود که در مقادیر یکسان تنش‌های تحکیمی، نمونه‌های خاک S15^۰ تمایل بیشتری به کاهش حجم دارند. در واقع نمونه‌های خاک S15^۰ دارای درجه‌ی اشباع کمتری نسبت به نمونه‌های S1۰۰ (در گروه اول) است و به دلیل خشک‌تر بودن بافت خاک تمایل بیشتری به کاهش حجم نسبت به نمونه‌های گروه S1۰۰ دارند. به‌طور مشابه این روند در رفتار تغییر حجمی نمونه‌های S1۰۰ و S۳۰ در گروه دوم نیز دیده می‌شود.

همچنین با مقایسه‌ی رفتار تغییر حجمی نمونه‌های S1۰۰ در گروه‌های اول و دوم مشاهده می‌شود که بیشتر بودن تراکم نسبی نمونه‌های CW^۰۲ باعث کمتر شدن روند کاهش حجم این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های خاک گروه CW^۰۱ شده است. به‌واسطه‌ی اعمال بارهای قائم و عدم امکان زهکشی آب حفره‌ی نمونه‌ها، فشار آب حفره‌ی در طول بارگذاری قائم تغییر کرده و این تغییرات باعث تغییر مکش بافتی خاک شده است.

در حالت کلی تغییرات سه متغیر درجه‌ی اشباع، مکش بافتی و نسبت تخلخل (تراکم) به یکدیگر وابسته بوده است و با استفاده از تغییرات این سه متغیر رفتار واقعی ابقاء آب - خاک^۱ معلوم می‌شود.

مقاومت نهایی - پارامترهای گسیختگی

مشابه آزمایش‌های سه‌محوری اشباع در مقادیر ثابت مکش بافتی و تراکم نسبی، افزایش تنش‌های همه‌جانبه‌ی ویژه باعث افزایش مقاومت نهایی خاک در آزمایش‌های سه‌محوری غیر اشباع شده است. با دقت بیشتر در نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های گروه اول و دوم نیز مشاهده می‌شود که با ثابت بودن تراکم نسبی و تنش‌های همه‌جانبه‌ی ویژه‌ی وارد بر نمونه‌ی خاک، افزایش مکش بافتی باعث بیشتر شدن سختی خاک شده

در جدول ۶، مقادیر متغیرهای حالت تنش و مشخصات فازی نمونه‌های خاک در حالت گسیختگی متناظر با بیشترین تنش انحرافی قائم برای آزمایش‌های سه‌محوری غیر اشباع آورده شده است.

تغییرات حجم و فشارهای حفره‌ی

در طول بارگذاری قائم امکان زهکشی هوای حفره‌ی وجود دارد و آب حفره‌ی خاک در حالت زهکشی نشده قرار دارد و بسته به شرایط آزمایش و نمونه‌ها، فشار آب حفره‌ی درون خاک در طول بارگذاری تغییر کرده است. به دلیل ثابت بودن فشار هوای حفره‌ی و تغییر کردن فشار آب حفره‌ی مکش بافتی خاک نیز دچار تغییر شده است. به واسطه‌ی اعمال بارهای قائم و امکان زهکشی هوای حفره‌ی، حجم نمونه‌های خاک در مرحله‌ی بارگذاری دچار تغییر شده است و کرنش‌های حجمی درون خاک به وجود آمده‌اند. نتایج به‌دست آمده حاکی از تمایل نمونه‌ها به از دست دادن هوای حفره‌ی و کاهش حجم کل در طول اعمال بارهای قائم هستند (شکل‌های ۱۹، ۲۲، ۲۵ و ۲۸). مطابق این نتایج روند کاهش حجم به‌صورت نزولی است و با ادامه‌ی بارگذاری تقریباً ثابت شده است و نمونه‌های خاک به حالت گسیختگی رسیده‌اند. به واسطه‌ی کاهش حجم هوای حفره‌ی و ثابت ماندن حجم آب حفره‌ی نمونه‌ها، درجه‌ی اشباع خاک متناوباً افزایش یافته است. همچنین کاهش حجم حفره‌های خاک باعث افزایش تراکم و وزن مخصوص خاک می‌شود و به تدریج خاک متراکم‌تر شده است.

با دقت بیشتر در شکل‌های ۲۰، ۲۳، ۲۶ و ۲۹ مشاهده می‌شود که با اعمال بارگذاری قائم مکش بافتی نمونه‌ها تغییر کرده و با یک نرخ نزولی تا رسیدن خاک به حالت گسیختگی افزایش یافته است.

روند مشاهده‌شده برای افزایش مکش بافتی و درجه‌ی اشباع در حین بارگذاری قائم نیز مشاهده شده است،^{۱۲۱} که به‌طور مشابه در آزمایش‌های CW مقدار مکش بافتی با افزایش درجه‌ی اشباع متناوباً افزایش یافته است. این امر به دلیل متراکم‌تر شدن خاک و کاهش حجم فضای خالی درون حفره‌ها و مجاری اتصال حفره‌ها به یکدیگر است که متعاقباً باعث افزایش مقدار نیروهای موئینگی و مکش بافتی درون خاک می‌شود.

جدول ۷. پارامترهای گسیختگی خاک در حالت غیراشباع.

آزمایش	τ_{max} (kpa)	C (kPa)	c' (kPa)	φ' (deg)	φ^b (deg)
CW ^o ۱-S۱۵ ^o -۵ ^o	۹۷,۴۴	۲۹,۱۶		۳۳,۱۵	۷,۷۳
CW ^o ۱-S۱۵ ^o -۱۰ ^o	۱۴۹,۴۲	۲۲,۴۲	۳,۸۱	۳۴,۶۲	۵,۳۴
CW ^o ۱-S۱۵ ^o -۲۰ ^o	۲۶۰,۲۴	۲۶,۶۰		۳۴,۱۳	۶,۷۹
CW ^o ۱-S۱۰ ^o -۵ ^o	۸۳,۷۴	۳۱,۱۱		۲۹,۵۸	۱۰,۱۵
CW ^o ۱-S۱۰ ^o -۱۰ ^o	۱۲۲,۹۷	۲۳,۷۳	۳,۸۱	۳۱,۳۹	۷,۳۸
CW ^o ۱-S۱۰ ^o -۲۰ ^o	۲۲۱,۴۷	۲۸,۳۱		۳۰,۸۱	۹,۲۱
CW ^o ۲-S۱۰ ^o -۵ ^o	۹۵,۰۳	۲۷,۲۳		۳۳,۸۲	۹,۳۴
CW ^o ۲-S۱۰ ^o -۱۰ ^o	۱۴۸,۶۰	۳۴,۳۷	۳,۸۱	۳۲,۲۲	۱۰,۷۷
CW ^o ۲-S۱۰ ^o -۲۰ ^o	۲۴۷,۱۸	۲۹,۸۴		۳۲,۷۷	۹,۹۸
CW ^o ۲-S۳ ^o -۵ ^o	۹۱,۹۱	۲۷,۰۱		۳۱,۵۰	۱۳,۶۳
CW ^o ۲-S۳ ^o -۱۰ ^o	۱۳۳,۳۱	۲۷,۰۹	۳,۸۱	۳۱,۴۸	۱۴,۱۰
CW ^o ۲-S۳ ^o -۲۰ ^o	۲۲۶,۳۷	۲۷,۰۴		۳۱,۴۸	۱۸,۴۲

پارامتر φ' از آزمایش‌های سه‌محوری غیراشباع در محدوده‌ی ۳^o الی ۳۳ درجه واقع شده‌اند که با مقادیر به‌دست آمده از آزمایش‌های زهکشی‌شده‌ی اشباع (جدول ۵) تقریباً برابر است. با فرض ثابت بودن c' ، مقدار زاویه‌ی اصطکاک φ^b به‌صورت تابعی از مکش بافتی خاک در لحظه‌ی گسیختگی است و برای خاک مورد مطالعه در این تحقیق بین ۵ تا ۱۸ درجه متغیر است.

در جدول ۷، مقادیر نهایی تنش برشی قابل تحمل خاک (τ_{max}) محاسبه‌شده از رابطه‌ی ۵ آورده شده‌اند. با دقت بیشتر در نتایج محاسبه‌شده مشاهده می‌شود که در یک تراکم نسبی و مکش بافتی اولیه ثابت، افزایش تنش‌های تحکیمی همه‌جانبه باعث افزایش مقاومت برشی خاک شده است. مثلاً در گروه اول در مکش بافتی ثابت ۱۵^o کیلوپاسکال (CW^o ۱-S۱۵^o) مقاومت برشی نمونه‌های خاک تحت اثر تنش تحکیمی ۵^o کیلوپاسکال برابر ۹۷/۴۴ کیلوپاسکال بوده است، در حالتی که تنش تحکیمی مؤثر برابر ۲۰^o کیلوپاسکال باشد مقاومت برشی خاک به مقدار ۲۶۰/۲۳ افزایش یافته است. این روند در سایر گروه‌ها نیز دیده می‌شود.

از جمله پارامترهای دیگر مؤثر بر روی τ_{max} مکش بافتی است که مطابق نتایج به‌دست آمده با ثابت بودن تنش‌های تحکیمی مؤثر و تراکم نسبی خاک، افزایش مکش بافتی نیز باعث افزایش مقاومت برشی نهایی خاک شده است. مثلاً نمونه‌های خاک گروه اول (CW^o ۱) را در نظر بگیرید. مطابق نتایج به‌دست آمده (جدول ۷) مقدار τ_{max} در نمونه‌ی S۱۵^o در تنش تحکیمی ۲۰^o کیلوپاسکال برابر ۲۶۰/۲۳ بوده است، در صورتی که مقدار τ_{max} در نمونه‌ی S۱۰^o در تنش تحکیمی مشابه برابر ۲۲۱/۴۷ کیلو پاسکال است. این روند در تنش‌های تحکیمی ثابت ۵^o و ۱۰^o کیلوپاسکال نیز مشاهده می‌شود.

افزایش تراکم نسبی خاک نیز بر روی مقدار τ_{max} مؤثر است. با مقایسه‌ی مقادیر به‌دست آمده برای τ_{max} در گروه‌های CW^o ۱-S۱۰^o و CW^o ۲-S۱۰^o در تنش‌های تحکیمی یکسان، مشاهده می‌شود که به دلیل متراکم بودن بافت دانه‌های خاک، نمونه‌های گروه CW^o ۲-S۱۰^o نسبت به نمونه‌های خاک گروه CW^o ۱-S۱۰^o قادر به تحمل نیروهای برشی بیشتری هستند.

و مقاومت نهایی خاک افزایش یافته است. برای نمونه، آزمایش‌های CW^o ۱-S۱۵^o و CW^o ۱-S۱۰^o را در نظر بگیرید. با مقایسه‌ی مقادیر نهایی به‌دست آمده برای q مشاهده می‌شود که در تنش‌های تحکیمی یکسان ۵^o، ۱۰^o و ۲۰^o کیلوپاسکال، نمونه‌های خاک مربوط به گروه S۱۵^o مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌های گروه S۱۰^o دارند. این روند در گروه‌های CW^o ۲-S۱۰^o و CW^o ۲-S۳^o نیز مشاهده می‌شود. از جمله دیگر پارامترهای مؤثر بر روی مقاومت نهایی خاک تراکم نسبی است. با مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌های سه‌محوری گروه‌های CW^o ۱-S۱۰^o و CW^o ۲-S۱۰^o مشاهده می‌شود که با ثابت بودن مکش بافتی و تنش‌های همه‌جانبه‌ی ویژه، بالاتر بودن تراکم نسبی در نمونه‌های گروه CW^o ۲-S۱۰^o باعث افزایش مقاومت نهایی نمونه‌های گروه دوم نسبت به گروه اول شده است.

بر پایه‌ی مقادیر نهایی متغیرهای حالت تنش پارامترهای گسیختگی خاک در حالت غیراشباع محاسبه شده‌اند. پارامترهای رابطه‌ی گسیختگی برشی فردلوند (رابطه‌ی ۵) شامل c' ، φ' و φ^b است که با استفاده از وضعیت نهایی متغیرهای حالت تنش به‌دست می‌آیند. با استفاده از نتایج آزمایشگاهی امکان محاسبه‌ی مقادیر واحد c' و φ^b برای مقادیر مختلف مکش بافتی وجود ندارد. اگرچه شیب خط گسیختگی در یک مکش بافتی معین بیان‌گر مقدار φ' در آن مکش است، اما محل تقاطع این خط به مقدار دو پارامتر c' و φ^b وابسته است. برای تحلیل این‌گونه مسائل متداول است که c' با مقدار به‌دست آمده از آزمایش‌های اشباع برابر در نظر گرفته شود و مقادیر φ' و φ^b برای مقادیر مختلف مکش بافتی محاسبه شوند. در جدول ۷، مقادیر محاسبه‌شده‌ی c' ، φ' و φ^b در آزمایش‌های مختلف آورده شده‌اند. اگرچه رابطه‌ی گسیختگی برشی پیشنهادی فردلوند با فرض رفتار خطی گسیختگی و صرف‌نظر از رفتار واقعی ابقاء آب - خاک پیشنهاد شده است که امر صحیحی نیست. نتایج به‌دست‌آمده توسط سایر پژوهشگران حاکی از تأثیر غیرخطی مکش بافتی بر روی مقاومت برشی خاک‌های غیراشباع دارد.^{[۱۲] [۱۳]}

با دقت بیشتر در نتایج به‌دست آمده مشاهده می‌شود که مقادیر محاسبه شده

نتیجه‌گیری

در این نوشتار به بررسی تأثیر مکش بافتی، درجه‌ی اشباع و تراکم نسبی بر روی رفتار مکانیکی یک نوع خاک ماسه‌یی رُس‌دار پرداخته شد. برای این امر مجموعه‌یی از آزمایش‌های سه محوری در دو حالت کاملاً اشباع و غیراشباع بر روی خاک مورد مطالعه در شرایط مختلف انجام شد.

با توجه به نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های سه محوری اشباع در دو حالت زهکشی شده و زهکشی نشده مشاهده می‌شود که در یک تراکم نسبی ثابت، افزایش تنش‌های تحکیمی مؤثر وارد بر خاک باعث افزایش مقاومت نهایی خاک شده است. همچنین در یک مقدار ثابت تنش‌های همه‌جانبه‌یی مؤثر، افزایش تراکم نسبی نیز باعث افزایش مقدار نهایی مقاومت خاک شده است.

در آزمایش‌های سه محوری غیراشباع در طول بارگذاری قائم امکان زهکشی هوای حفره‌یی وجود داشته و به دلیل عدم زهکشی آب حفره‌یی خاک فشار آب حفره‌یی درون خاک در طول بارگذاری تغییر کرده است. نتایج به‌دست آمده حاکی از تمایل نمونه‌ها به از دست دادن هوای حفره‌یی و کاهش یافتن حجم کل در طول اعمال بارهای قائم هستند که این کاهش حجم باعث افزایش درجه‌ی اشباع، تراکم و وزن مخصوص نمونه‌های خاک شده است.

مطابق نتایج به‌دست آمده مشاهده می‌شود که در یک مقدار ثابت تراکم نسبی و

مکش بافتی، افزایش تنش‌های همه‌جانبه‌یی ویژه باعث افزایش تمایل کاهش حجم نمونه‌های خاک شده است. همچنین کاهش درجه‌ی اشباع و یا افزایش مکش بافتی نیز باعث تمایل بیشتر خاک به کاهش حجم شده است. اگرچه افزایش تراکم نسبی باعث کاهش تمایل نمونه‌ها به کاهش حجم شده است.

مشابه آزمایش‌های سه محوری اشباع در مقادیر ثابت مکش بافتی و تراکم نسبی، افزایش تنش‌های همه‌جانبه‌یی ویژه باعث افزایش مقاومت نهایی و تنش برشی قابل تحمل خاک در آزمایش‌های سه محوری غیراشباع شده است. با دقت بیشتر در نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های گروه اول و دوم نیز مشاهده می‌شود که افزایش مکش بافتی نیز باعث بیشتر شدن سختی خاک شده و مقاومت نهایی و مقاومت برشی خاک افزایش یافته است. با مقایسه نتایج مشاهده می‌شود که با ثابت بودن مکش بافتی و تنش‌های همه‌جانبه‌یی ویژه، بالاتر بودن تراکم نسبی نیز باعث افزایش مقاومت نهایی و تنش برشی قابل تحمل نمونه‌های خاک شده است.

تقدیر و تشکر

این مطالعه در قالب یک پروژه با حمایت مالی دانشگاه تربیت مدرس انجام شده است. در پایان لازم است تا از همکاری‌های معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس تشکر و قدردانی شود.

پانویس

1. soil-water retention behaviour

منابع

1. Coulomb, C.A. "Essai sur application des regles de maxims et minims a quelques problems de statique, relatifs a l'architecture" *Mem. Acad. Royal*, **7**, pp. 343-382 (1776).
2. Coleman, J.D. "Stress / strain relations for partly saturated soils", *Geotechnique*, **12**(12), pp. 31-44 (1962).
3. Matyas, E.L. and Rahakrishna, H.S. "Volume change characteristics of partly saturated soils", *Geotechnique*, **18**, pp. 432-448 (1968).
4. Fredlund D.G.; Morgenstern, N.R. and Widger, R.A. "The shear strength of unsaturated soils", *Canadian geotechnical journal*, **15**(3), pp. 313-321 (1978).
5. Yasrebi, S.S. and Mirzaii, A. "Unsaturated soil mechanics", *Simaye danesh Pub* (2008).
6. Houlby, G.T. "The work input to an unsaturated granular material", *Geotechnique*, **47**(1), pp. 193-196 (1997).
7. Mirzaii, A. "Critical-state behaviour of an unsaturated clayey sand", *M.Sc. thesis*, University of Tarbiat Modares (2008).
8. Zapata, C.E.; Houston, W.N.; Houston, S.L. and Walsh K.D. "Soil-water characteristic curve variation", *Proceeding of Geo-Denver*, Colorado, USA, pp. 84-124 (1999).
9. Head, K.H. "Manual of soil laboratory testing Volume 3 Effective stress tests", *John Wiley and sons* (1997).
10. Wheeler, S.J. "The stress - strain behaviour of soils containing gas bubbles", *PhD thesis*, University of Oxford (1986).
11. Toll, D.G. "The behaviour of unsaturated compacted naturally occurring gravel", *PhD thesis*, Imperial College (1988).
12. Wheeler, S.J. and Sivakumar, V. "An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soils", *Geotechnique*, **45**(1), pp. 35-53 (1995).
13. Vanapalli, S.K.; Fredlund, D.G.; Pufahl, D.E. and Clifton, A.W. "Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction", *Can. Geotech. J.*, **33**, pp. 379-392 (1996).
14. Escario, V. and Saez, J. "The shear strength of partly saturated soils. Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soil", *Góotechnique*, **36**(3), pp. 453-456 (1986).

