

تأثیر مکش‌بافتی بر رفتار مکانیکی خاک ماسه‌ای مخلوط با لای و رسی در تنش‌های محصور کننده مؤثر کم

محمد ملکی^{۱*}، میثم بیات^۲، علی میرزایی^۳

- ۱- دانشیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا همدان
- ۲- کارشناس ارشد عمران خاک و پی، گروه عمران، دانشگاه بوعلی سینا همدان
- ۳- دانشجوی دکترای عمران خاک و پی، گروه عمران، دانشگاه تربیت مدرس تهران

Maleki_mmm@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۲/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۹/۰۷

چکیده- مطالعات آزمایشگاهی کمی در مورد رفتار مکانیکی خاک‌های غیراشباع، به دلیل زمان‌گیر بودن و مشکلات آن به‌خصوص اندازه‌گیری مکش‌بافتی و تغییر حجم وجود دارد.

در این مقاله به بررسی رفتار مکانیکی یک خاک ماسه لای دار مخلوط با ریزدانه رسی (کائولینیت) درحالت اشباع و غیراشباع، در تنش‌های محصور کننده مؤثر کم (۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ کیلو پاسکال)، پرداخته می‌شود. برای انجام آزمایش‌های غیراشباع از دستگاه سه محوری- که به این منظور ساخته شده- استفاده شده است. دستگاه مورد استفاده قادر به کنترل و اندازه‌گیری تغییر حجم، فشار هوای حفره‌ای و آب حفره‌ای به‌صورت مجزا است. آزمایش‌های سه محوری غیراشباع روی نمونه‌هایی با مکش‌بافتی اولیه ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ کیلو پاسکال و تنش‌های تحکیمی مؤثر مشابهی، یعنی ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ کیلو پاسکال، تحت مسیر سهم حوری تحکیم یافته با مقدار آب ثابت انجام شده‌اند.

با استفاده از نتایج آزمایش‌ها تأثیر دانسیته نسبی، تنش تحکیمی و مکش‌بافتی بر رفتار آتساعی، مقاومت برشی، مسیرهای تنش و پارامترهای حالت بحرانی خاک مطالعه شده، بررسی شده است. برپایه نتایج به‌دست آمده، مکش‌بافتی نقش مهمی در رفتار مکانیکی خاک مطالعه شده داشته است، برای مثال افزایش مکش‌بافتی همانند دانسیته نسبی و تنش محصور کننده باعث افزایش غیرخطی مقاومت برشی نمونه‌ها شده است. همچنین خطوط حالت بحرانی ارائه شده برای نمونه‌های اشباع و غیراشباع نشان‌دهنده تغییر موقعیت این خطوط برای نمونه‌های غیراشباع به‌واسطه تغییر مکش‌بافتی نمونه‌هاست و با یک دانسیته معین، افزایش مکش‌بافتی باعث افزایش عرض از مبدأ خط حالت بحرانی می‌شود. با این حال این خطوط در حالت غیر اشباع تقریباً موازی یکدیگرند.

واژگان کلیدی: مکش‌بافتی، خاک غیراشباع، دانسیته، مقاومت برشی، تنش محصور کننده.

۱- مقدمه

معمولی خاک‌های سطحی غیر اشباع^۱ هستند. رفتار این خاک‌ها تابعی از درجه اشباع است، به‌طوری که با افزایش

بیش تر طرح‌های عمرانی در نزدیکی سطح طبیعی زمین و بالاتر از سطح سفره آبریز زمینی اجرا می‌شوند. به طور

اشباع، تعریف متغیرهای حالت تنش که مبین رفتار آن‌ها باشد، امری اجتناب‌ناپذیر و در عین حال دشوار است [۱۳]. در طول سه دهه گذشته، به‌کارگیری دو متغیر حالت تنش به شکل‌های مختلف برای بیان رفتار مکانیکی خاک‌ها در حالت غیر اشباع رواج یافته است [۱۴؛ ۱۵؛ ۱۶؛ ۱۷؛ ۱۸]. از بین آن‌ها می‌توان به جفت متغیر تنش خالص و مکش اشاره کرد. تنش خالص به‌صورت تفاوت تنش کل و فشار هوای حفره‌ای تعریف می‌شود؛ یعنی: $\sigma_{ij} - \delta_{ij} u_a$ و مکش به‌صورت تفاوت فشار هوای حفره‌ای و فشار آب حفره‌ای بیان می‌شود؛ یعنی: $u_a - u_w$.

این دو متغیر در تعریف مفهوم تنش مؤثر و توسعه مدل‌های رفتاری برای خاک‌های غیر اشباع به‌وسیله محققان مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۸؛ ۱۹]. مطالعات مروری در تحقیق حاضر نشان می‌دهد که علی‌رغم کارهای آزمایشگاهی قابل توجه در زمینه رفتار خاک‌های غیر اشباع، عوامل متعدد تأثیرگذار در رفتار از یک طرف و محدودیت، پراکندگی و گاهی اوقات اختلاف قابل توجه در نتایج و نظرات محققان نشان می‌دهد که موضوع‌های گوناگونی در این زمینه قابل تعریف هستند. مطالعه تجربی روی این جنبه‌های رفتاری منجر به توسعه مدل‌های رفتاری دقیق‌تر برای طرح و تحلیل سازه‌ها در مهندسی ژئوتکنیک خواهد شد.

مطالعه آثار مکش بافتی بر رفتار تنش - تغییر شکل ماسه‌های مخلوط با ریزدانه به‌خصوص در شرایط زهکشی نشده از موضوعات مهمی است که توجه کم‌تری به آن شده است.

در این مقاله با انجام یک مجموعه آزمایش سه محوری در شرایط اشباع و غیر اشباع روی نمونه‌های ماسه لای‌دار در دو دانسیته مختلف، آثار مکش بافتی و تنش محصور کننده روی رفتار مکانیکی این خاک بررسی شده است. آزمایش‌های اشباع به‌صورت تحکیم یافته زهکشی نشده و

درجه اشباع، مقاومت و سختی آن‌ها کاهش پیدا می‌کند. مطالعات تجربی برای بیان رفتار خاک‌های غیر اشباع از چند دهه گذشته مورد توجه بوده است. به این منظور عوامل مختلفی چون تأثیر مکش بافتی^۱ در مقاومت برشی و رفتار تغییر حجمی خاک با استفاده از تجهیزاتی که قادر به اندازه‌گیری مکش بافتی و تغییرات حجم نمونه طی بارگذاری است، بررسی شده است.

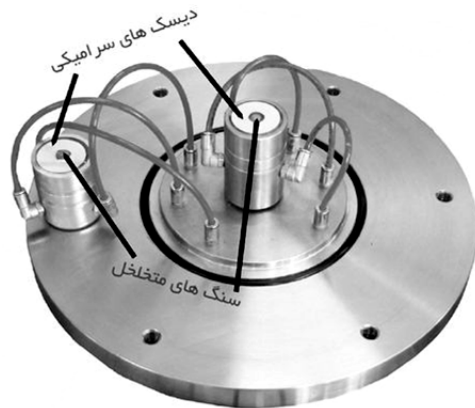
در مکانیک خاک کلاسیک، خاک‌ها به‌طور عمده به صورت کاملاً خشک یا اشباع در نظر گرفته می‌شوند. اگر چه بسیاری از مسائل مربوط به ژئوتکنیک شامل نواحی غیر اشباعی است که در آن منافذ بین ذرات خاک از هر دوی هوا و آب پر شده است، با این همه در مکانیک خاک کلاسیک خاک به‌صورت کاملاً اشباع یا کاملاً خشک در نظر گرفته می‌شود. نکته حایز اهمیت این است که نتایج آزمایش‌های محققان مختلف در این زمینه اختلاف رفتاری چشمگیری را بین نمونه‌های خاکی غیر اشباع (با درجه‌های اشباع مختلف) و این نمونه‌ها در شرایط کاملاً اشباع نشان داده است [۱؛ ۲؛ ۳؛ ۴؛ ۵؛ ۶؛ ۷].

از آغاز ارائه اصل تنش مؤثر به‌وسیله ترزاقی در سال ۱۹۳۶، تاکنون مطالعات زیادی روی رفتار مکانیکی خاک‌ها در شرایط اشباع انجام شد که منجر به ارائه مفاهیمی مانند حالت بحرانی و مدل‌های رفتاری مختلف شده است [۸، ۹، ۱۰ و ۱۱]. برپایه این مطالعات و مفاهیم می‌توان نتیجه‌گیری کرد که رفتار مکانیکی انواع خاک‌ها در شرایط اشباع تا حد زیادی شناخته شده است.

منافذ خاک‌ها در حالت غیر اشباع با سه فاز آب، هوا و برهم‌کنش آن‌ها شناخته می‌شوند. به دلیل فاز اضافه شده هوا در این گونه خاک‌ها، به‌کارگیری یک متغیر به‌عنوان تنش مؤثر جوابگو نیست. به این ترتیب برای خاک‌های غیر

1- Matric suction

خاک مورد نظر تحت مطالعه قرار گرفته است. جزئیات داخلی سلول سه محوری (پایه بالا و پایین) در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱) جزئیات پایه های بالا و پایین در سلول سه محوری غیراشباع

مزیت عمده این دستگاه نسبت به دستگاه های مشابه کنترل فشار هوا و آب حفره ای از بالا و پایین نمونه به طور هم زمان است. این جریان دو طرفه از آب باعث همگنی بهتر نمونه و کاهش قابل ملاحظه در زمان آزمایش ها می شود. با استفاده از سیستم دو جداره در این سلول، امکان اندازه گیری تغییر حجم کل و تغییر حجم آب حفره ای وجود دارد. همان طور که در شکل (۱) دیده می شود، دو عدد دیسک سرامیکی^۲ با مقدار هوای ورودی ۵۰۰ کیلوپاسکال، ضخامت ۳/۵ میلی متر و نفوذپذیری $10^{-5} \times 1/65$ سانتی متر بر ثانیه، درون پایه و کلاهک با استفاده از چسب، چسبانده شده است. این دیسک ها امکان اندازه گیری و کنترل فشار و جریان آب حفره ای نمونه را در اختیار قرار می دهند. در وسط این دیسک های سرامیکی با جایگذاری سنگ های متخلخل کوچکی جریان و فشار هوای حفره ای کنترل می شود. برای جلوگیری از ایجاد خطا در اندازه گیری فشار آب حفره ای و تغییر حجم مربوط به آن، با استفاده از شیرهای مخصوص این کار (DAVI) که برای اولین بار به وسیله فردلانند

آزمایش های غیراشباع به صورت آزمایش با مقدار آب ثابت انجام شده است. یکی از وجوه مشخصه این آزمایش ها انتخاب تنش محصور کننده کم متناسب با بیش تر طرح های عملی مهندسی است.

در این مطالعه تأکید ویژه ای هم بر رفتار تغییر حجمی مصالح مورد آزمایش با هدف تدقیق در انتخاب تابع پتانسیل خمیری در قانون جریان مدل های رفتاری خاک های غیر اشباع صورت گرفته است. در انتها مسیرهای مختلف تنش و موقعیت خط حالت بحرانی در مختصات تنش انحرافی برحسب تنش خالص ترسیم و بررسی شده است.

۲- دستگاه استفاده شده برای آزمایش های غیر اشباع

یکی از معمول ترین دستگاه های استفاده شده به وسیله محققان برای ارزیابی رفتار مکانیکی خاک ها، دستگاه سه محوری است. برای خاک های غیر اشباع این دستگاه نیازمند توسعه است. در واقع لازم است مکش بافتی و تغییر حجم به نحو مقتضی کنترل شود [۲۰]. به طور معمول، مکش بافتی در نمونه های غیر اشباع در دستگاه سه محوری با استفاده از روش جابه جایی محوری کنترل و اندازه گیری می شود.

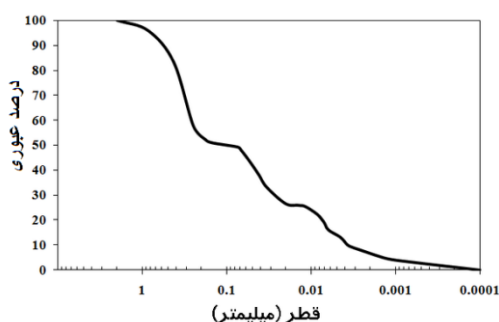
در این روش، فشار هوای حفره ای با مقادیر بیش تر از فشار اتمسفر برای بالا بردن فشار آب حفره ای و رساندن آن به مقادیر مثبت به کار می رود. با این کار، امکان بروز پدیده کاویتاسیون در سیستم اندازه گیری مکش بافتی از بین می رود [۲۱].

در این مطالعه آزمایشگاهی، با استفاده از دستگاه سه محوری موجود در آزمایشگاه تحقیقاتی دینامیک خاک دانشگاه بوعلی سینا که به وسیله شرکت ویرا ابزار آزما (با طراحی و ساخت سلول و پانل غیراشباع) برای بررسی رفتار خاک های غیر اشباع توسعه داده شده است، رفتار

2- Ceramic disks

1- Axis translation technique

کائولینیت است.



شکل (۲) منحنی دانه‌بندی خاک استفاده شده در آزمایش‌ها

در این مطالعه از روش کوبش مرطوب برای ساخت نمونه‌ها استفاده شده است، به طوری که نمونه‌ها با هفت لایه به ضخامت یک سانتی‌متر درون قالب فلزی کوبیده شده‌اند و در نهایت نمونه‌ای با ارتفاع ۷ سانتی‌متر و قطر ۳/۸ سانتی‌متر به دست آمده است. این نسبت دو به یک برای کوچک کردن اثر کمانش و تأثیر پایه‌های بالا و پایین است. در روش تراکم استاتیکی استفاده شده، لایه‌هایی از خاک سست با وزن و رطوبتی معین با فشار تدریجی و آرام به وسیله یک پیستون تا رسیدن به لایه‌ای به ضخامت ۱ سانتی‌متری متراکم شده‌اند. از طرف دیگر در تمامی نمونه‌های ساخته شده مقدار رطوبت اولیه یکسان بوده است، به طوری که تمامی نمونه‌ها با ترشده‌گی و بدون انجام عمل خشک کردن به مقدار مکش اولیه مورد نظر رسیده‌اند. این امر تأثیر رفتار هیسترسیس در نمونه‌ها را از بین می‌برد.

۳-۲- آزمایش‌های سه محوری اشباع

در این تحقیق، تمامی آزمایش‌های اشباع در حالت تحکیم یافته زهکشی نشده انجام شده است. این آزمایش‌ها با دستگاه سه محوری تمام اتوماتیک GCTS ساخت کشور کانادا مستقر در آزمایشگاه تحقیقاتی دینامیک خاک دانشگاه بوعلی سینا انجام شده است. برای آزمایش‌های

راه‌اردمو در سال ۱۹۹۳ معرفی شد، استفاده شده است [۲۱]. به طوری که به صورت دوره‌ای در طول مراحل آزمایش، حباب‌های هوای محبوس شده در زیر دیسک‌ها با استفاده از این شیرها و ایجاد یک جریان ملایمی از آب در زیر دیسک‌ها خارج می‌شود.

۳-۱- برنامه و روند آزمایش‌ها

۳-۱-۱- جزئیات آزمایش‌ها

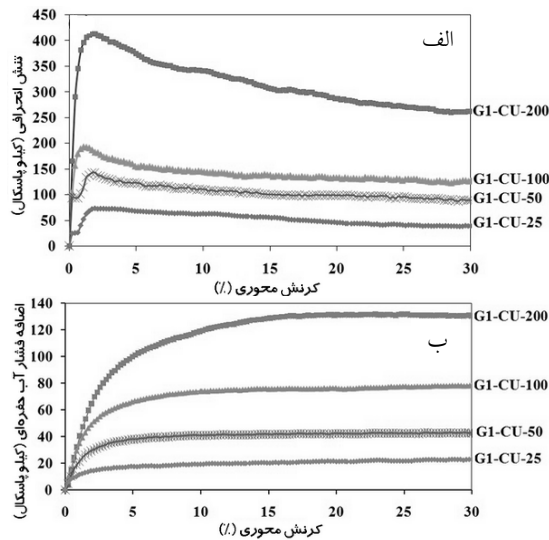
در این کار آزمایشگاهی، دو گروه آزمایش سه محوری در شرایط اشباع و غیر اشباع برای شناسایی آثار دانسیته، مکش بافتی و تنش محصور کننده روی رفتار خاک ماسه لای‌دار در شرایط غیر اشباع انجام شد. نامگذاری نمونه‌ها براساس مشخصات اولیه صورت گرفت، برای مثال G1-S 25-100 نشانگر نمونه گروه اول با مکش بافتی اولیه ۲۵ کیلو پاسکال و تنش محصور کننده خالص ۱۰۰ کیلو پاسکال است. مشخصات اولیه نمونه‌های آزمایش شده هر دو گروه در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱) خصوصیات فیزیکی نمونه‌های آزمایش شده

	گروه (۱)	گروه (۲)
γ_{wet} (KN/m ³)	۱۹/۱۱	۱۷/۲۴
γ_{dry} (KN/m ³)	۱۷/۹۴	۱۶/۲۶
(S _r) _{initial} (%)	۳۷/۷۳	۲۶/۲۶
E	۰/۴۶	۰/۶۱
G _s	۲/۶۷	۲/۶۷
(ω) _{initial} (%)	۶/۵	۶

همان طور که در این جدول دیده می‌شود، تفاوت عمده نمونه‌ها در این دو گروه، دانسیته اولیه آن‌ها است. منحنی دانه‌بندی مربوط به خاک استفاده شده در این تحقیق در شکل ۲ نشان داده شده است. خاک استفاده شده شامل ۵۱ درصد ماسه، ۲۰ درصد سیلت و ۲۹ درصد

پایان مرحله ترشدگی - که بسته به مکش‌بافتی مورد نظر چندین روز طول می‌کشد - زمانی است که نمونه به مکش‌بافتی مورد نظر رسیده است و دیگر تمایلی به جذب آب ندارد. با بستن شیرهای آب حفره‌ای و ثابت ماندن فشار آب حفره‌ای برای حداقل یک ساعت می‌توان از اتمام این مرحله اطمینان حاصل کرد. سپس نمونه‌ها با اعمال تنش محصور کننده مورد نظر (۲۵، ۵۰ یا ۱۰۰ کیلو پاسکال) تحکیم پیدا می‌کنند. رخ دادن لغزش‌های شيروانی‌ها در نزدیکی سطح زمین یکی از علت‌های انتخاب تنش‌های محصور کننده کم بوده است. پس از این مرحله، در نهایت نمونه‌ها با سرعت آهسته ۰/۰۲ میلی‌متر بر دقیقه بارگذاری می‌شود. این نرخ پایین بارگذاری به دلیل ایجاد حالت تعادل بین فشار آب حفره‌ای نمونه و فشار آب حفره‌ای زیر دیسک‌ها است. مرحله بارگذاری برای هر نمونه تقریباً ۲۵ ساعت زمان برده است و در طول مرحله بارگذاری تغییرات فشار آب حفره‌ای و حجم کل نمونه به‌طور مستمر اندازه‌گیری می‌شود. در واقع با توجه به نوع آزمایش، در این مرحله فقط اجازه زهکشی به هوای حفره‌ای داده می‌شود و فشار آب حفره‌ای (یا مکش‌بافتی) در طول آزمایش تغییر می‌کند.



شکل (۳) نتایج آزمایش‌های اشباع گروه اول؛ الف- نمودار تنش -

کرنش؛ ب- نمودار فشار آب حفره‌ای در مقابل کرنش محوری

اشباع، قبل از بارگذاری، باید نمونه‌ها با انجام روند اشباع‌سازی به درجه اشباع حداقل ۰/۹۵ رسانده شوند [۲۲]. برای رسیدن به این هدف، پس از اندازه‌گیری ابعاد نمونه، نخست از داخل نمونه گاز دی‌اکسید کربن عبور داده و پس از آن حداقل سه ساعت از نمونه آب عبور داده می‌شود. در نهایت با استفاده از پس فشاری حدود ۳۰۰ کیلو پاسکال، نمونه‌ها به‌طور کامل اشباع خواهند شد.

پس از انجام روند اشباع‌سازی، با اعمال تنش محصور کننده مؤثر (۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ کیلو پاسکال)، نمونه‌ها در تنش تحکیمی قرار داده می‌شوند. معیار پایان مرحله تحکیم، زایل شدن اضافه فشار آب حفره‌ای در نمونه است.

۳-۳- آزمایش‌های سه محوری غیر اشباع

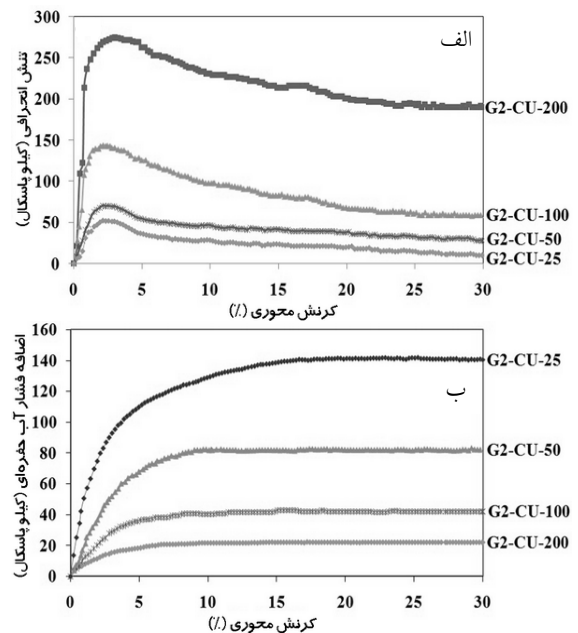
برای آزمایش‌ها در حالت غیر اشباع، نمونه‌های آزمایشی در بین دو عدد غشا قرار داده می‌شود که در بین دو لایه غشا برای جلوگیری از محبوس شدن حباب‌های هوا از لایه نازکی از گریس سیلیکون^۱ استفاده شده است [۲۳]. پس از جایگذاری نمونه در سلول و بستن سلول دو جداره، با اعمال فشار هوای حفره‌ای تا ۲۵۰ کیلو پاسکال از روش جابه‌جایی محوری استفاده شده است. در زمان اعمال این فشار هوای حفره‌ای، فشار درون سلول هم افزایش پیدا می‌کند، به طوری که بین فشار سلول و فشار هوای درون نمونه اختلاف ۱۰ کیلو پاسکال فشار ثابت نگه داشته می‌شود. پس از این مرحله با توجه به مکش‌بافتی مورد نظر (۲۵، ۵۰ یا ۱۰۰ کیلو پاسکال)، فشار آب حفره‌ای نمونه نسبت به فشار هوای حفره‌ای ثابت ۲۵۰ کیلو پاسکال تنظیم شده و مرحله ترشدگی^۲ آغاز می‌شود. رسیدن به مقادیر مکش‌های بافتی مورد نظر با عمل ترشدگی در مقایسه با عمل خشک کردن، علت انتخاب مقادیر پایین مکش‌بافتی در این تحقیق بوده است.

1- Silicon grease
2- Wetting process

با دقت در نتایج مشاهده می‌شود که افزایش یکسان در مکش بافتی و تنش محصور کننده، باعث افزایش یکسانی در مقاومت برشی نمونه‌ها نمی‌شود، بلکه تنش محصور کننده تأثیر بیش‌تری نسبت به مکش بافتی روی مقاومت برشی نمونه‌ها دارد. هم‌چنین برای هر یک از مقادیر مکش بافتی و تنش همه جانبه، نمونه‌های گروه ۱ به دلیل دانسیته بالاتر مقاومت بیش‌تری نسبت به نمونه‌های گروه ۲ از خود نشان داده‌اند. مقادیر نهایی متغیرها در تمامی نمونه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

۲-۴- رفتار تغییر حجمی نمونه‌ها

تغییر حجم نمونه‌ها در طول مرحله برش نسبت به کرنش محوری در قسمت (b) از شکل‌های ۵ تا ۱۰ نشان داده شده است (در این شکل‌ها، اتساع به صورت مثبت در نظر گرفته شده است). همان‌طور که در این شکل‌ها و جدول ۲ دیده می‌شود، در آزمایش‌های گروه اول تمامی نمونه‌های غیراشباع رفتار اتساعی از خود نشان داده‌اند. با کمی دقت در داده‌های جدول ۲ دیده می‌شود که در آزمایش‌های این گروه، نمونه‌ها با مکش بافتی اولیه ۵۰ کیلو پاسکال برای یک مقدار خاص از تنش محصور کننده، بیش‌ترین اتساع را از خود نشان داده است (در هر سه سطح از تنش محصور کننده). این در حالی است که در آزمایش‌های گروه دوم، نمونه‌ها رفتار تغییر حجمی متنوع‌تری از خود نشان داده‌اند. هم‌چنین در این گروه از آزمایش‌ها، نمونه‌ها با مکش بافتی اولیه ۱۰۰ کیلو پاسکال، بیش‌ترین اتساع یا کم‌ترین مقدار تراکم در طول مرحله بارگذاری را از خود نشان داده است. از طرف دیگر در هر دو گروه از آزمایش‌ها، افزایش تنش محصور کننده باعث کاهش اتساع و یا افزایش تمایل به تراکم در نمونه‌ها در هر یک سطح خاصی از مکش بافتی خاص شده است.



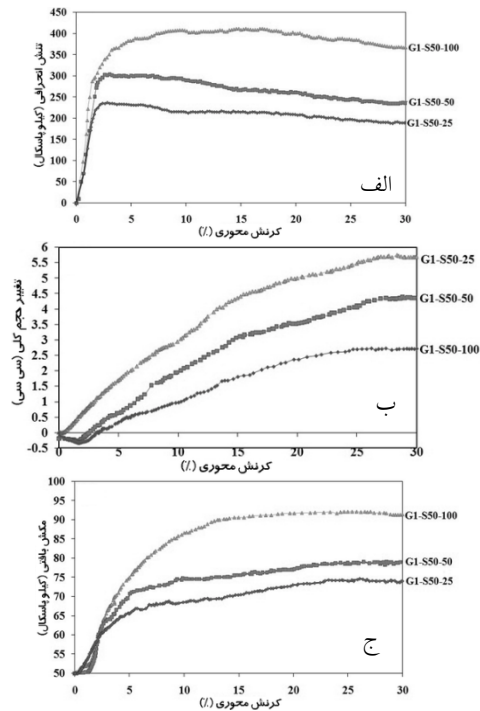
شکل (۴) نتایج آزمایش‌های اشباع‌های گروه دوم؛ الف- نمودار تنش-کرنش؛ ب- نمودار فشار آب حفره‌ای در مقابل کرنش محوری

۴- نتایج و بحث

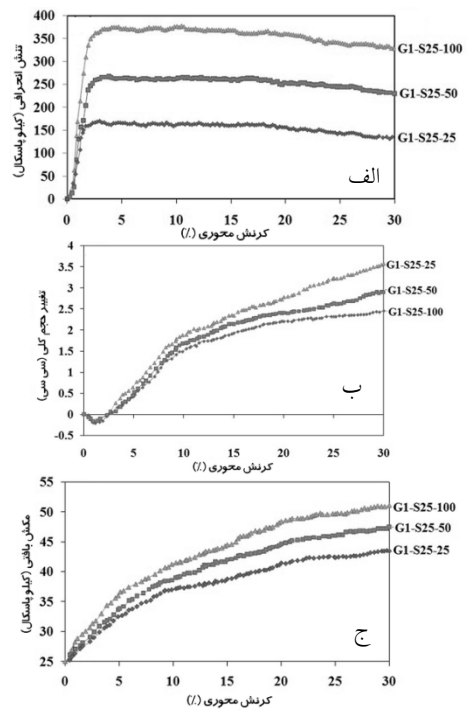
۴-۱- مقاومت برشی نمونه‌ها

در شکل‌های ۳ و ۴ تغییرات تنش انحرافی و فشار آب حفره‌ای در مقابل کرنش محوری برای نمونه‌های اشباع و هم‌چنین شکل‌های ۵ الی ۱۰، تغییرات تنش انحرافی، حجم کل و مکش بافتی را در مقابل کرنش محوری در طول مرحله بارگذاری برای نمونه‌های غیر اشباع نشان می‌دهند.

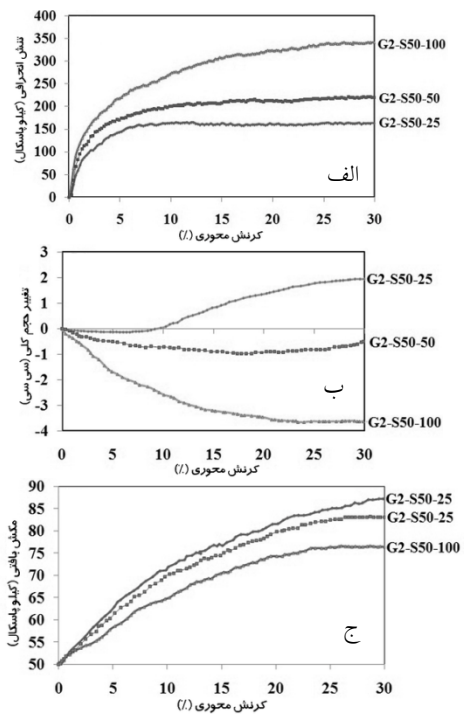
بر اساس نتایج به دست آمده- که به صورت خلاصه در جدول ۲ ارائه شده است- برای یک دانسیته و مکش بافتی اولیه مشخص، تنش انحرافی نمونه‌ها با افزایش تنش محصور کننده افزایش پیدا کرده است (بخش (a) از شکل‌های ۳ تا ۱۰). هم‌چنین برای تنش‌های محصور کننده یکسان، مقاومت برشی نمونه‌های غیر اشباع بیش‌تر از نمونه‌های اشباع است و به طور کلی در هر یک از دو گروه از آزمایش‌ها، نمونه با مکش بافتی بیش‌تر مقاومت برشی بیش‌تری از خود نشان داده است.



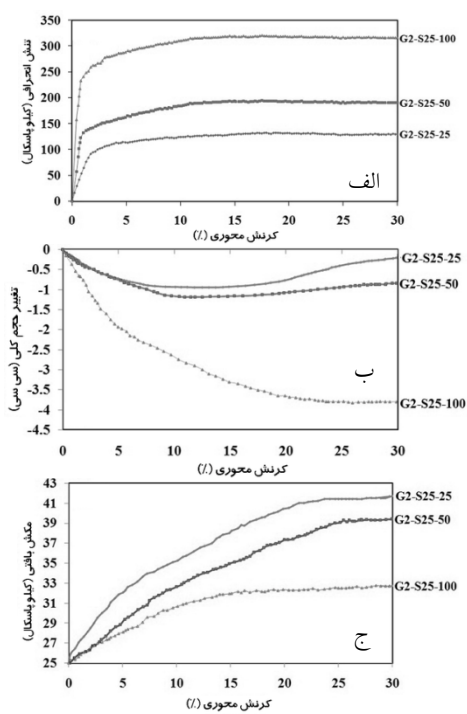
شکل (۷) نتایج آزمایش‌های غیر اشیاع گروه اول، مکش بافتی ۱۰۰ kPa؛ تغییرات الف- تنش؛ ب- تغییر حجم کل؛ ج- مکش، در مقابل کرنش محوری



شکل (۵) نتایج آزمایش‌های غیر اشیاع گروه اول، مکش بافتی ۲۵ kPa؛ تغییرات الف- تنش؛ ب- تغییر حجم کل؛ ج- مکش، در مقابل کرنش محوری



شکل (۸) نتایج آزمایش‌های غیر اشیاع گروه دوم، مکش بافتی ۲۵ kPa؛ تغییرات الف- تنش؛ ب- تغییر حجم کل؛ ج- مکش، در مقابل کرنش محوری



شکل (۶) نتایج آزمایش‌های غیر اشیاع گروه اول، مکش بافتی ۵۰ kPa؛ تغییرات الف- تنش؛ ب- تغییر حجم کل؛ ج- مکش، در مقابل کرنش محوری

جدول (۲) مقادیر نهایی متغیرها بعد از مرحله برش

آزمایش	$(kPa)q_{Max}$	$*(\Delta V/V)$	$*(\Delta S/S)$
G1-S 25-25	۱۶۹/۸	۴/۷۷	۷۴
G1-S 25-50	۲۶۸	۳/۸۷	۹۰
G1-S 25-100	۳۷۸/۰۲	۳/۲۸	۱۰۶
G1-S 50-25	۲۳۷/۶	۷/۵۹	۴۸
G1-S 50-50	۳۰۴/۵	۵/۸۹	۵۷
G1-S 50-100	۴۱۱	۳/۶۳	۸۲/۸
G1-S 100-25	۲۹۸/۵	۵/۲۹	۱۸/۳
G1-S 100-50	۳۶۶	۴/۵۶	۲۱/۲
G1-S 100-100	۵۲۷	۳/۴۸	۲۵/۲
G2-S 25-25	۱۳۳	-۰/۲۷	۶۶/۸
G2-S 25-50	۱۹۵/۱	-۱/۱۲	۴۸/۸
G2-S 25-100	۳۲۰/۶	-۵/۰۸	۳۱/۲
G2-S 50-25	۱۶۴/۷	۲/۵۸	۷۴/۴
G2-S 50-50	۲۲۰/۶	-۰/۶۷	۶۶
G2-S 50-100	۳۴۰/۶	-۴/۸۵	۵۲/۸
G2-S 100-25	۲۸۱	۴/۲۲	۲۵
G2-S 100-50	۲۷۱/۳	۱/۲۱	۱۷/۹
G2-S 100-100	۳۸۲/۳	-۴/۲۸	۱۴/۱

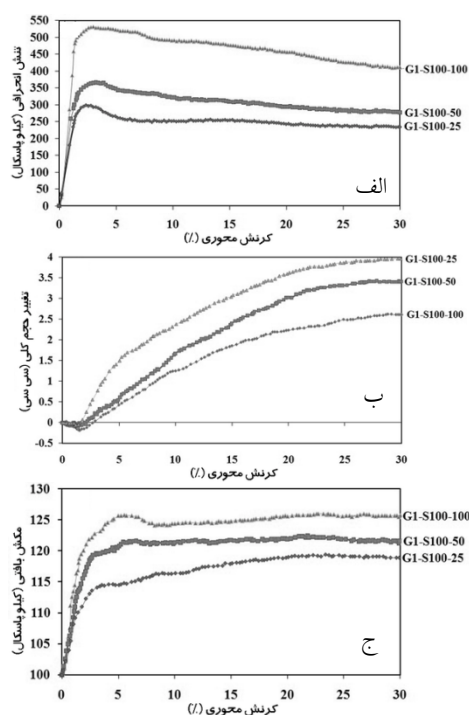
* تغییران نسبی مکش بافتی (نسبت تغییر کل مکش بافتی در انتهای آزمایش به مکش بافتی اولیه نمونه)

** تغییرات نسبی تغییر حجم کل (نسبت تغییر حجم کل در انتهای آزمایش به حجم اولیه قبل از مرحله برش)

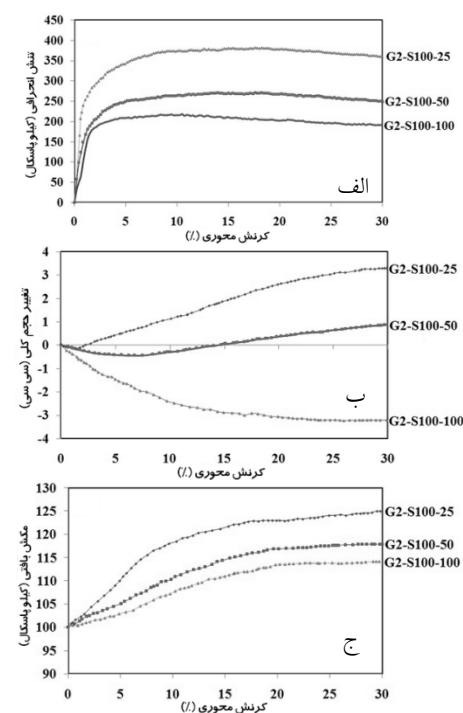
۳-۴- تغییر فشار آب حفره‌ای یا مکش بافتی

در این بخش، تغییرات فشار آب حفره‌ای در نمونه‌های اشباع و مکش بافتی در نمونه‌های غیر اشباع بررسی می‌شود. نتایج آزمایش‌ها نشان دهنده ثابت شدن تغییرات این متغیرها در انتهای مرحله برش است.

قسمت (b) از شکل‌های ۳ و ۴ تغییرات فشار آب حفره‌ای را در نمونه‌های اشباع برای هر دو گروه نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل ۱ دیده می‌شود، افزایش ناگهانی در آغاز مرحله بارگذاری در فشار آب حفره‌ای

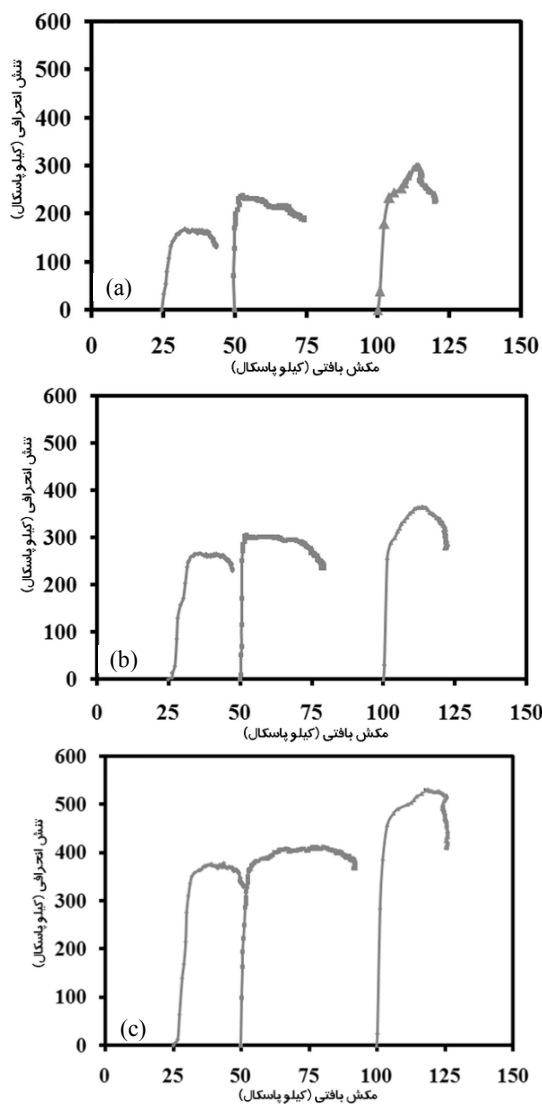


شکل (۹) نتایج آزمایش‌های غیر اشباع گروه دوم، مکش بافتی ۵۰ kPa؛ تغییرات الف- تنش؛ ب- تغییر حجم کل؛ ج- مکش، در مقابل کرنش محوری



شکل (۱۰) نتایج آزمایش‌های غیر اشباع گروه دوم، مکش بافتی ۱۰۰ kPa؛ تغییرات الف- تنش؛ ب- تغییر حجم کل؛ ج- مکش، در مقابل کرنش محوری

است. در واقع این مسئله بیان‌کننده این است که در مقایسه با خاک‌ها در شرایط اشباع، تعریف رابطه‌ای بین تغییر حجم و تغییر فشار آب حفره‌ای (یا مکش‌بافتی) برای خاک‌ها در شرایط غیر اشباع امری دشوار است. با بازنگری روی نتایج دیده می‌شود که تغییرات مکش‌بافتی تحت شرایط آزمایش با مقدار آب ثابت حساسیت بیش‌تری نسبت به دانسیته اولیه نمونه‌ها در مقابل تنش محصور کننده و مکش‌بافتی اولیه دارد.



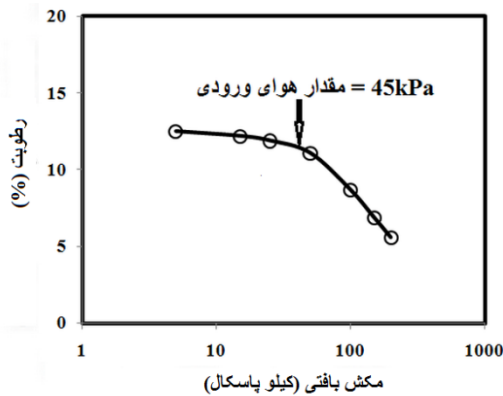
شکل (۱۱) تغییرات مکش‌بافتی در مقابل تنش انحرافی برای آزمایش‌های گروه اول در تنش محصور کننده (a) ۲۵kPa ؛ (b) ۵۰kPa ؛ (c) ۱۰۰kPa

نمونه‌ها رخ داده است. همچنین با افزایش تنش همه جانبه، اضافه فشار آب حفره‌ای در نمونه‌ها افزایش یافته است. بخش (c) از شکل‌های ۵ تا ۱۰ تغییرات مکش‌بافتی در طول مرحله بارگذاری را برای نمونه‌های دو گروه را نشان می‌دهد. در گروه اول و دوم از آزمایش‌ها، در تمامی نمونه‌های غیر اشباع مکش‌بافتی در طول مرحله برش افزایش یافته است. با دقت در نتایج ارائه شده در جدول ۲ دیده می‌شود که برای یک مقدار خاص از تنش همه جانبه، مکش‌بافتی ۲۵ کیلو پاسکال در گروه اول بیش‌ترین تغییرات نسبی را نسبت به دیگر مقادیر مکش‌بافتی اولیه (یعنی ۵۰ و ۱۰۰ کیلو پاسکال) دارد. در حالی که در گروه دوم، تغییرات نسبی مکش‌بافتی نمونه‌ها با مکش‌بافتی اولیه ۵۰ کیلو پاسکال نسبت به دیگر مقادیر مکش‌بافتی اولیه (یعنی ۲۵ و ۱۰۰ کیلو پاسکال) در نمونه‌ها با تنش محصور کننده یکسان بیش‌تر است.

شکل‌های ۱۱ و ۱۲ تغییرات مکش‌بافتی در مقابل تغییرات تنش انحرافی در طول دوره بارگذاری را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل‌ها دیده می‌شود، تغییرات عمده در مکش‌بافتی پس از نقطه شکست (نقطه حداکثر در تنش انحرافی) در بیش‌تر نمونه‌ها رخ می‌دهد.

از طرف دیگر با توجه به مقادیر داده شده در جدول (۲) تغییرات نسبی مکش‌بافتی در هر دو گروه از آزمایش‌ها، وابسته به تنش محصور کننده است و در نمونه‌های گروه اول در یک سطح خاص از مکش‌بافتی، با افزایش تنش محصور کننده تغییر نسبی در مکش‌بافتی در انتهای آزمایش افزایش یافته است، ولی در آزمایش‌های گروه دوم عکس این نتیجه مشاهده شده است؛ به عبارتی دیگر در این گروه از آزمایش‌ها، رابطه عکس بین تغییر نسبی مکش‌بافتی و تنش محصور کننده مشاهده شده است. این در حالی است که تنش محصور کننده در هر دو گروه از آزمایش‌ها رابطه متقابل با کاهش میل به اتساع یا افزایش میل به تراکم داشته

در این مطالعه منحنی مشخصه آب و خاک با استفاده از دستگاه سه محوری برای خاک مطالعه شده تعیین شد که نتیجه در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همان طور که در شکل دیده می‌شود مقدار مکش ورودی هوا معادل ۴۵ کیلو پاسکال به دست آمده است. با داشتن این منحنی و دیگر نتایج حاصل از کار حاضر می‌توان به رفتار خاک مطالعه شده در قالب اصول مکانیک خاک‌های غیراشباع و اعتبار بخشی روابط تجربی موجود پرداخت که در کار مستقل دیگری در حال انجام است.



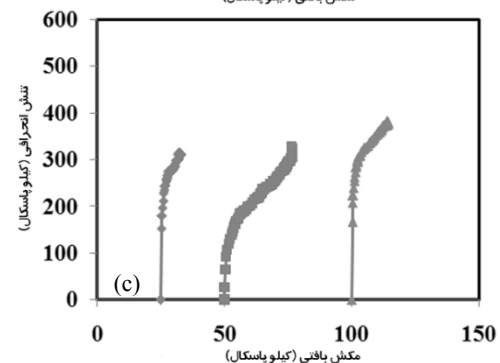
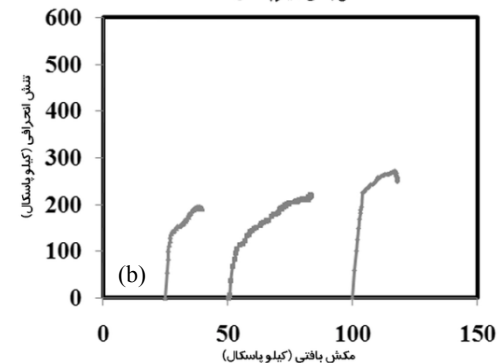
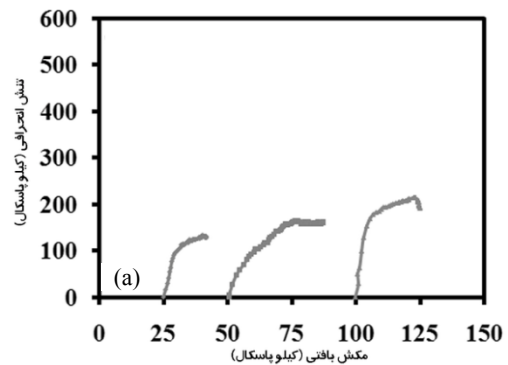
شکل (۱۳) منحنی مشخصه آب و خاک برای خاک مطالعه شده

۴-۵- خطوط حالت بحرانی

مسیرهای تنش برای نمونه‌های اشباع در شکل ۱۴ و هم‌چنین خطوط حالت بحرانی برای نمونه‌های غیر اشباع در فضای $(q:p-u_a)$ در شکل ۱۵ ارائه شده است. تاکنون نویسندگان زیادی، متغیرهای q و $p-u_a$ را به‌عنوان متغیرهای حالت بحرانی برای خاک‌های غیر اشباع پیشنهاد داده‌اند [۲۳؛ ۲۴؛ ۲۵؛ ۲۶]. معادله‌های خطوط حالت بحرانی به‌صورت زیر است:

$$q = M(p - u_a) + q_0 \quad (1)$$

که در این جا، M شیب خط حالت بحرانی و q_0 مقدار عرض از مبدأ آن روی محور q است.

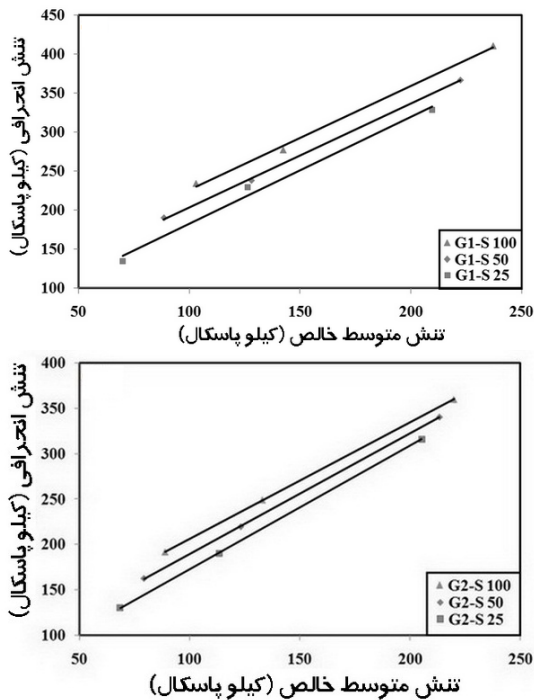


شکل (۱۲) تغییرات مکش بافتی در مقابل تنش انحرافی برای آزمایش‌های گروه اول در تنش محصور کننده (a) ۲۵ kPa ؛ (b) ۵۰ kPa ؛ (c) ۱۰۰ kPa

۴-۴- منحنی مشخصه آب و خاک

از جمله المان‌های اساسی در مکانیک خاک‌های غیراشباع منحنی مشخصه آب و خاک (SWCC) است. این منحنی بیان‌کننده رابطه بین مکش بافتی و درجه اشباع خاک را بیان می‌کند. بسیاری از خواص خاک‌های غیراشباع از جمله مقاومت برشی، رفتار تغییر حجمی، هدایت هیدرولیکی و غیره تابعی از این منحنی هستند.

خط حالت بحرانی است.



شکل (۱۳) خطوط حالت بحرانی نمونه‌های غیر اشباع در فضای $q-p-u_0$ (a) گروه اول آزمایش‌ها؛ (b) گروه دوم آزمایش‌ها

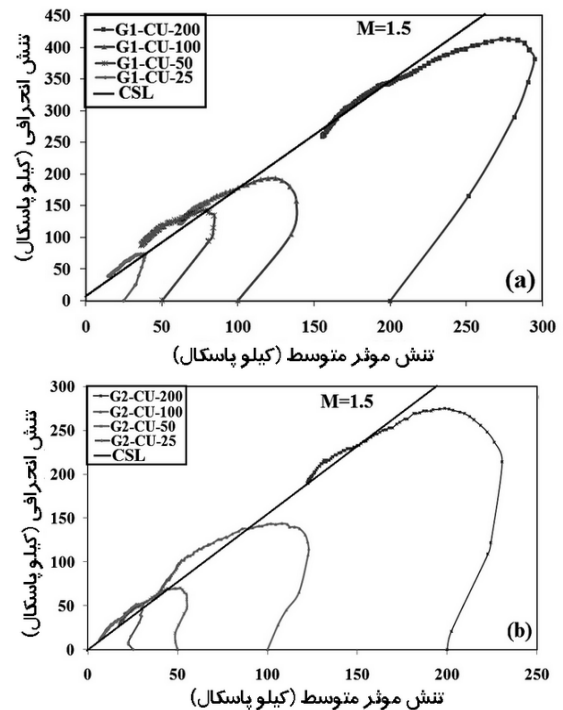
جدول (۳) پارامترهای حالت بحرانی به‌دست آمده از آزمایش‌ها

Matric Suction	G_1		G_2	
	M	q_0	M	q_0
0	۱/۵	۰	۱/۵	۰
25	۱/۳۷	۴۵/۲	۱/۳۵	۳۷/۱
50	۱/۳۳	۷۰/۳	۱/۳۲	۵۷/۴
100	۱/۳۳	۹۲/۷	۱/۲۸	۷۷/۹

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای شناسایی آثار مکش‌بافتی، دانسیته و تنش محصور کننده روی رفتار مکانیکی و حالت بحرانی خاک ماسه‌ای مخلوط با لای و رس، مجموعه‌ای از آزمایش‌های سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده در شرایط اشباع و آزمایش‌های سه محوری با مقدار آب ثابت در شرایط غیر اشباع انجام شده است.

همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، موقعیت خطوط حالت بحرانی تابعی از مقدار مکش‌بافتی در نمونه‌های غیر اشباع است؛ به عبارت دیگر مقدار شیب خط حالت بحرانی (M) و عرض از مبدأ (q_0) تابعی از تغییر مکش است. اگر چه تغییرات مقدار (M) در نمونه‌های غیر اشباع کم است، به‌طوری که می‌توان این خطوط را در حالت غیر اشباع موازی با یکدیگر در نظر گرفت.



شکل (۱۴) مسیر تنش نمونه‌های اشباع در فضای (a) گروه اول آزمایش‌ها؛ (b) گروه دوم آزمایش‌ها

هم‌چنین مقادیر ارائه داده شده در جدول ۳ نشان می‌دهد که خطوط حالت بحرانی مربوط به نمونه‌های اشباع از مبدأ مختصات عبور کرده است. هم‌چنین مقایسه خطوط حالت بحرانی در آزمایش‌های اشباع در دو گروه نشان می‌دهد که موقعیت این خط تابعی از دانسیته نسبی نیست. در صورتی که مقادیر ارائه شده برای نمونه‌های غیر اشباع نشان‌دهنده تأثیر دانسیته اولیه نمونه‌ها بر موقعیت

- بر اساس نتایج آزمایش‌ها، نتایج زیر قابل استنتاج است:
- ۱- مکش‌بافتی نقش مهمی را در افزایش مقاومت برشی خاک‌ها از خود نشان می‌دهد، به‌طوری که افزایش مکش‌بافتی باعث افزایش غیرخطی مقاومت شده است.
 - ۲- مقاومت برشی خاک‌ها در حالت‌های اشباع و غیر اشباع با افزایش تنش محصور کننده افزایش پیدا می‌کند. همچنین افزایش مقاومت به دلیل اضافه تنش محصور کننده بیش‌تر از افزایش مقاومت برشی به دلیل افزایش یکسان در مکش‌بافتی است.
 - ۳- مکش‌بافتی اولیه و تنش محصور کننده تأثیر به‌سزایی بر رفتار تغییر حجمی خاک‌ها دارند. رفتار تغییر حجمی خاک‌ها در شرایط غیراشباع حساسیت بیش‌تری نسبت به تنش محصور کننده نسبت به مکش‌بافتی اولیه داشته است. افزایش تنش محصور کننده باعث کاهش میل به اتساع یا افزایش تمایل به کاهش حجم شده و باعث می‌شود نمونه‌ها رفتار انقباضی از خود نشان دهند.
 - ۴- نتایج آزمایش‌ها در حالت غیراشباع نشان می‌دهد، که یک رابطه مشخص بین میزان نسبی تغییرات در مکش‌بافتی و تغییرات حجم (یا تغییر تنش همه‌جانبه) برای دانسیته‌های مختلف وجود ندارد.
 - ۵- نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در خاک‌های اشباع، موقعیت خط حالت بحرانی در فضای $q:p$ مستقل از دانسیته نسبی است. در صورتی که در خاک‌های غیراشباع، موقعیت خط حالت بحرانی در فضای $q:p-u_e$ تابعی از مکش‌بافتی و دانسیته نسبی است.
- ### ۵- مراجع
- [1] Adams, B. A. and Wulfsohn, D.; "Critical state behavior of an agricultural soil"; *Journal of Agricultural Engineering Research*, 70, pp. 345-354, 1998.
- [2] Mirzaii. A., Yasrebi. S.S., Gatmiri. B.; "Mechanical behavior of anunsaturated clayey sand"; *Unsaturated Soils: Advances in Geo-Engineering – Toll et al. Taylor & Francis Group, London*, pp. 453-458, ISBN 978-0-415-47692-8, 2008.
- [3] Chiu, C.F., NG, C.W.W.; "A state-dependent elasto-plastic model for saturated and unsaturated soils"; *Geotechnique*, 53(9), pp. 809-829, 2003.
- [4] Charles, W.W. Ng, M.ASCE, Abraham, C.F., Chiu.; "Laboratory study of loose saturated and Unsaturated Decomposed Granitic Soil"; *Journal of geotechnical and geo-environmental engineering*, 129(6), 2003.
- [5] Rahardjo, H., Ong, B.H., Leong, E.C.; "Shear strength of a compacted residual soil from consolidated drained and constant water content triaxial tests"; *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 41, pp. 421-435, 2004.
- [6] Kayadelen, C., Sivrikaya, O., Taskiran, T., Guneyli, H.; "Critical-state parameters of unsaturated residual clayey soil from Turkey"; *Engineering Geology*, Vol. 94, pp. 1-9, 2007.
- [7] Jotisankasa, A., Coop, M., Ridley, A.; "The mechanical behavior of an unsaturated compacted silty clay"; *Geotechnique*, 59(5), pp. 415-428, 2009.
- [8] Schofield, A.W., Wroth, C.P.; "Critical state soil mechanics"; McGraw Hill, London, 1968.
- [9] Wood, D.M.; "Soil behavior and critical state soil mechanics"; Cambridge University Press, Cambridge, 1991.
- [10] Maatouk, A., Leroueil, S., La, Rochelle, P.; "Yielding and critical state of a collapsible unsaturated silty soil"; *Geotechnique*, 45(13), pp. 465-477, 1995.
- [11] Newson, T.A.; "Validation of a non-associated critical state model"; *Computers and Geotechnics*, 23, pp. 277-287, 1998.
- [12] Terzaghi, K.; "The shear resistance of saturated soils"; *Proceedings for the 1st. International Conference on Soil Mechanics and Foundation*

- [24] Wheeler S.J., and Sivakumar, V.;"An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil"; *Geotechnique*, 45(1): 35-53, 1995
- [25] Rampino, C., Mancuso, C., and Vinale, F.;"Behavior of a compacted silty sand during suction controlled tests"; *In Proceedings of the 2nd International Conference on Unsaturated Soils UNSAT2*, Beijing, China, Vol. 1, pp. 108-113, 1998.
- [26] Adams, B.A., and Wulfsohn, D.;"Variation of the critical-state boundaries of an agriculture soil"; *European Journal of Soil Science*, 48:739-758, 1997.
- Engineering* (Cambridge, MA, 1, pp. 54 - 56, 1936.
- [13] Jennings, J.E., Burland, J.B.;"Limitations to the use of effective stresses partly saturated soils"; *Geotechnique*, 12(2), pp. 125-144, 1962.
- [14] Coleman, J.D.;"Stress-strain relations for partially saturated soils"; *Geotechnique*, 12(4), 348-350, 1962.
- [15] Burland, J.B.; "Some aspects of the mechanical behavior of partly saturated soils"; In Proceedings of the Conference on Moisture equilibrium and moisture changes"; in *Soil Beneath Covered Areas*. Butterworths, Guilford, UK, pp. 270-278, 1965.
- [16] Matyas, E.L., Radhakrishna, H.S.;"Volume change characteristics of partially saturated soils"; *Geotechnique*, , 18(4), pp. 432-448, 1968.
- [17] Brackley, I.J.A.; "Partial collapse in unsaturated expansive clay"; Proc. 5th.Reg. conf.For Africa SMFE, pp. 23-30, 1971.
- [18] Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R.;"Stress state variables for unsaturated soils"; *Canadian Geotechnical Journal*, 16, pp. 121-139, 1977.
- [19] Wheeler, S.J., Sivakumar, V.;"An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil"; *Geotechnique*, 45(1), pp. 35-53,1995.
- [20] Aversa, S., Nicotera, M.V.; "A triaxial and oedometer apparatus for testing unsaturated soils"; *Geotechnical Testing Journal*, 25(1), pp.3-15 , 2002.
- [21] Fredlund, D.G., Rahardjo, H.;"Soil mechanics for unsaturated soils"; Wiley, New York, 1993.
- [22] ASTM, D 854-02.;"Standard test method for specific gravity of soil solids by water pycnometer"; *Annual Book of ASTM Standards*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, pp. 1-7.
- [23] Alonso, E.E., Gens, A., Josa, A.A.;"A constitutive model for partially saturated soils"; *Geotechnique*, 40(3), pp. 405-430, 1990.

