

ارزیابی رفتار غیراشباع خاک لس گرگان در مکش‌های متوسط تحت شرایط تراکم سه‌محوری ناهمسان

سید محسن حائری* (استاد)

بهنام سعدالله‌زاده (دانشجوی دکتری)

سامان سلیمانی بروجردی (دکتری)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۳ (۱۱-۱۰-۱۴۰۳)
دوره ۳۰، شماره ۲، صص. ۱۱۱-۱۰۱ (پژوهشی)

هدف پژوهش حاضر، بررسی تأثیر تنش برشی اولیه در رفتار هیدرومکانیکی خاک لس گرگان در مکش‌های متوسط تحت شرایط تراکم همسان و ناهمسان با استفاده از دستگاه سه‌محوری غیراشباع تمام اتوماتیک ارتقاء یافته در آزمایشگاه مکانیک خاک پیشرفته‌ی دانشگاه صنعتی شریف است. در پژوهش حاضر، مجموعه‌ی آزمایش‌های سه‌محوری بر روی نمونه‌های بازسازی شده از خاک لس گرگان تحت مسیر «تنش خالص میانگین ثابت - مکش ساختاری کاهش» و در مکش‌های ساختاری متوسط شامل 300° و 400° کیلو پاسکال و تحت نسبت‌های تنش برشی صفر، ۱ و ۲ به صورت کنترل تنش انجام شده است. در انتهای هر آزمایش، جهت بررسی رفتار برشی، آزمایش برش سه‌محوری به صورت کنترل کرنش انجام شده است. نتایج به دست آمده از آزمایش‌های ترشدگی نشان می‌دهند که با افزایش تنش برشی اولیه تحت تنش خالص میانگین ثابت، میزان کاهش حجم نمونه افزایش یافته است. نتایج آزمایش‌های مقاومت برشی نیز نشان می‌دهند که برای نمونه‌هایی که در مرحله‌ی ترشدگی تحت مکش ساختاری و تنش خالص میانگین یکسان بوده‌اند، با افزایش تنش برشی اولیه، مقدار مقاومت برشی کاهش یافته است.

واژگان کلیدی: خاک لس، رفتار هیدرومکانیکی، تنش برشی اولیه، نمونه‌ی بازسازی شده، دستگاه سه‌محوری غیراشباع.

smhaeri@sharif.edu
behnam.sadollahzadeh@sharif.edu
saman.soleymani1369@sharif.edu

۱. مقدمه و تاریخچه‌ی پژوهش

خاک‌های فروریزی در گروه خاک‌های با ساختار باز و کم‌ثبات و با چگالی نسبتاً کم شناخته می‌شوند. در بین خاک‌های فروریزی، نهشته‌های لسی جزء شناخته شده‌ترین نوع هستند. ترفاقی^۱ و همکاران (۱۹۹۶)، لس را به عنوان نهشته‌های بادرفتی تعریف کردند، که ساختار آن عمدتاً از ذرات لای به همراه مقداری رس و یا ماسه تشکیل شده است. ذرات لای و یا ماسه توسط باندهای رسی و یا کلسیتی در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند و ساختاری باز را تشکیل می‌دهند، که در حالت خشک پایدار هستند.^۱ از ویژگی‌های مهندسی خاک لس می‌توان به وجود حفره‌های بزرگ در ساختار، درصد رطوبت طبیعی پائین، چگالی نسبتاً کم و چسبندگی ناچیز اشاره کرد. خاک‌های لس در شرایط طبیعی و در حالت غیراشباع، به واسطه‌ی داشتن پیوندهای قوی بین دانه‌ی، مقاومت برشی نسبتاً بالایی دارند؛ اما طی ترشدن، سست‌تر

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۲۶/۴/۱۴۰۳، اصلاحیه ۲۷/۴/۱۴۰۳، پذیرش ۳/۸/۱۴۰۳.

و فروریزش خاک شود. از اواخر دهه‌ی ۱۹۶۰ میلادی تاکنون، پژوهشگران بسیاری به رفتار خاک‌های فروریزی به خصوص لس توجه داشته‌اند. با توسعه‌ی مکانیک خاک‌های غیراشباع، بیشتر مطالعات اخیر مربوط به بررسی آزمایشگاهی رفتار خاک‌های فروریزی

استناد به این مقاله:

حائری، سید محسن، سعدالله‌زاده، بهنام و سلیمانی بروجردی، سامان. ۱۴۰۳. ارزیابی رفتار غیراشباع خاک لس گرگان در مکش‌های متوسط تحت شرایط تراکم سه‌محوری ناهمسان. مهندسی عمران شریف، ۴۰(۲)، صص. ۱۱۱-۱۰۱. DOI:10.24200/J30.2023.62479.3228

تحت شرایط K_0 با استفاده از دستگاه تحکیم یک‌بعدی غیراشباع و همچنین شرایط تراکم همسان با استفاده از دستگاه سه‌محوری غیراشباع بوده است.^[۱۴-۱۶] با وجود این، تاکنون در مطالعات اندکی به تأثیر تنش برشی اولیه (شرایط تنش ناهمسان) در رفتار هیدرومکانیکی خاک‌های فروریزی با استفاده از دستگاه سه‌محوری غیراشباع پرداخته شده است.

از مدت‌ها قبل، نیز برخی پژوهشگران به پیش‌بینی و مدل‌سازی اثر ناهمسانی در رفتار خاک‌ها پرداخته‌اند. اولین بار کاساگرانده و کارلیو^۲ (۱۹۹۴)، ناهمسانی در خاک را از منظر تاریخچه‌ی شکل‌گیری خاک به دو نوع ناهمسانی ذاتی^۳ و ناهمسانی القایی^۴ تقسیم کردند و دریافتند که ناهمسانی ذاتی در طی فرآیند رسوب‌گذاری ذرات و ناهمسانی القایی به دلیل تنش‌ها و کرنش‌های اعمال شده به خاک پس از مرحله‌ی شکل‌گیری ایجاد می‌شود.^[۱۵] سوای و دلوز^۵ (۱۹۹۶)، از نخستین پژوهشگرانی بودند که به بررسی آزمایشگاهی رفتار مکانیکی نمونه‌های غیراشباع با بافت ناهمسان پرداختند و نشان دادند که برای خاک‌های غیراشباع با بافت ناهمسان، سطح تسلیم در شرایط مکش ثابت در صفحه‌ی $q - p_n$ به صورت یک بیضی مایل است.^[۱۶] همچنین دیلاوچیا و رومرو^۶ (۲۰۱۳) به شواهدی از مایل بودن سطح تسلیم خاک در صفحه‌ی $q - p'$ دست یافتند.^[۱۷] سیاواکومار^۷ و همکاران (۲۰۱۰)، در بررسی تأثیر ناهمسانی القایی ناشی از تراکم استاتیکی در رفتار خاک کائولین غیراشباع دریافتند که ناهمسانی اولیه‌ی نمونه در موقعیت و شیب خط تراکم نرمال، شکل و سائز سطح تسلیم و نیز موقعیت خط حالت بحرانی تأثیر می‌گذارد.^[۱۸] ژان^۸ و همکاران (۲۰۱۴)، یک پژوهش آزمایشگاهی برای بررسی رفتار یک خاک متورم‌شونده‌ی غیراشباع در مسیر ترشدگی تحت شرایط تنش ناهمسان انجام دادند و دریافتند که برای نمونه‌های بازسازی شده و دست‌نخورده، یک مکش ساختاری آستانه وجود دارد، که در مقادیر کمتر از آن با کاهش مکش ساختاری، کرنش محوری نمونه به‌طور قابل ملاحظه‌ی افزایش پیدا می‌کند. همچنین ایشان به این نتیجه رسیدند که این مکش ساختاری آستانه متناظر با شروع تسلیم نمونه است و با افزایش نسبت تنش برشی، مقدار مکش تسلیم افزایش پیدا می‌کند.^[۱۹] ژو^۹ و همکاران (۲۰۱۴)، مکانیزم گسیختگی یک شیب خاکی لسی در اثر ترشدگی را مطالعه کردند و نشان دادند که رفتار نگهداشت آب - خاک لس وابسته به نسبت تنش برشی و سطح تنش هم‌جانبه است.^[۲۰] بوان فیل^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۶)، با انجام آزمایش‌های سه‌محوری غیراشباع تحت مسیرهای تنش مختلف به بررسی تأثیر ناهمسانی اولیه‌ی ناشی از تراکم استاتیکی در رفتار نمونه‌های خاک لای رس‌دار غیراشباع پرداختند و به این نتیجه رسیدند که در آزمایش‌های تراکم همسان تحت مکش ثابت، کرنش‌های برشی قابل توجهی در نمونه‌ها ایجاد شده است، که ناشی از ناهمسانی اولیه‌ی القاء شده در اثر تراکم استاتیکی نمونه است.^[۲۱] نتایج پژوهش‌های اخیر انجام شده در مورد بررسی تأثیر ناهمسانی در رفتار نمونه‌هایی از خاک‌های متورم‌شونده‌ی غیراشباع،^[۲۲] و خاک‌های فروریزی غیراشباع،^[۲۳] نشان می‌دهند که رفتار تغییرشکل نمونه‌ها تحت شرایط تنش ناهمسان به صورت ترکیبی از کرنش‌های حجمی و برشی است. در نهایت، به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که رفتار هیدرومکانیکی خاک‌های غیراشباع متأثر از مسیر تنش، سطح تنش هم‌جانبه، نسبت تنش برشی و مکش ساختاری است.

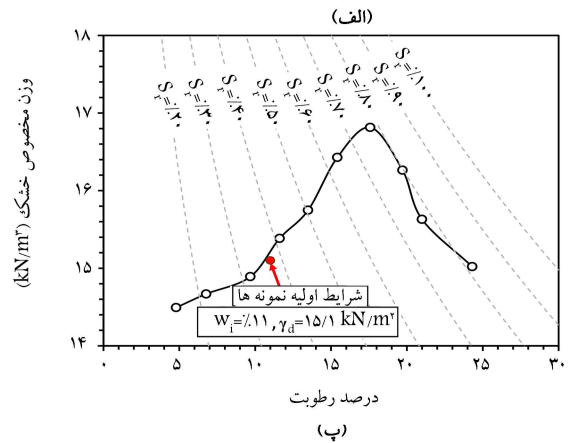
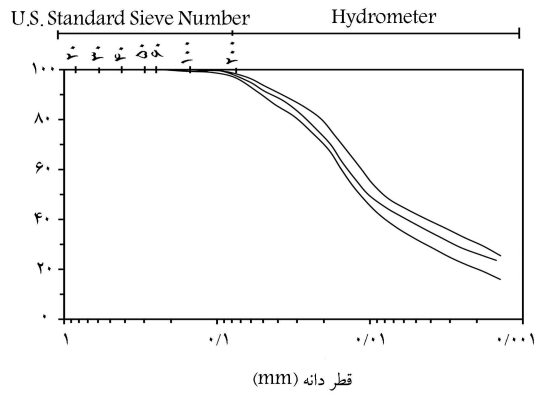
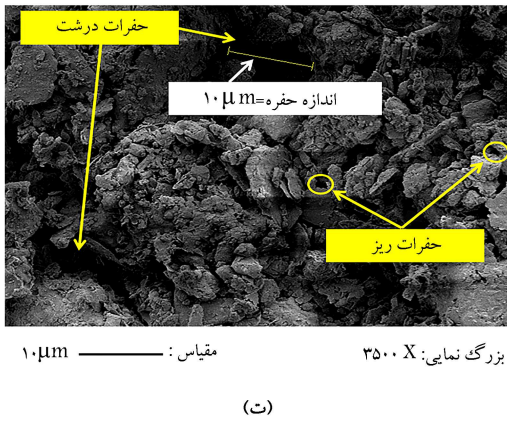
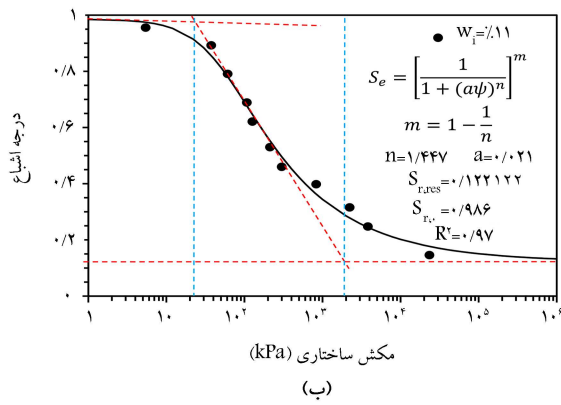
اگرچه با گذشت زمان، گستره‌ی مطالعات انجام شده بر رفتار خاک‌های فروریزی وسیع‌تر شده است؛ اما با این حال، رفتار هیدرومکانیکی خاک‌های فروریزی غیراشباع تحت تأثیر ناهمسانی القایی (وجود تنش برشی اولیه) در دستگاه سه‌محوری غیراشباع به‌ندرت بررسی شده است. لذا در پژوهش حاضر با تمرکز بر بررسی اثر تنش برشی اولیه در رفتار هیدرومکانیکی نمونه‌های بازسازی شده از خاک لس گرگان، تعدادی آزمایش‌های سه‌محوری غیراشباع در مکش‌های ساختاری متوسط شامل ۳۰۰

و ۴۰۰ کیلوپاسکال و در مسیر بارگذاری «تنش خالص میانگین ثابت - مکش ساختاری کاهشی» و با نسبت‌های تنش برشی صفر، ۱ و ۲ به صورت کنترل تنش انجام شده است. همچنین به منظور بررسی رفتار مقاومت برشی، در انتهای هر کدام از آزمایش‌ها، نمونه‌ها در شرایط مکش ساختاری ثابت تحت برش سه‌محوری به صورت کنترل کرنش قرار گرفته‌اند.

۲. مشخصات فیزیکی خاک مطالعه‌شده و روش

آماده‌سازی نمونه‌ها

خاک مطالعه‌شده در پژوهش حاضر، لس گرگان بوده است، که از تپه‌های هزارپیچ واقع در شهر گرگان تهیه شده است. لس گرگان در ناحیه‌ی شمال شرق ایران و بخشی از کمربند لس اوراسیایی است، که از شمال غرب اروپا کشیده شده است و تا آسیای مرکزی و چین ادامه دارد. لس‌های مذکور منشأ بادرفتی^{۱۱} دارند و سطح وسیعی را به شکل تپه‌هایی از جنس لای در منطقه‌ی مذکور تشکیل داده‌اند.^[۲۵] مطابق مطالعات پیشین انجام شده، خاک لس در گروه خاک‌های با قابلیت فروریزش شدید قرار دارد.^[۲۶] در شکل (۱ - الف)، پوش منحنی دانه‌بندی خاک لس مطالعه‌شده مطابق استاندارد ASTM D ۶۳-۴۲۲ (PL) مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، خاک لس تقریباً از ۴٪ ماسه و حدود ۹۶٪ ریزدانه شامل لای و رس تشکیل شده است، که از این مقدار حدود ۲۱ تا ۲۹ درصد آن را ذرات رس (با در نظر گرفتن درصد ذرات با ابعاد کوچک‌تر از ۲ میکرومتر) و باقی آن را ذرات لای تشکیل داده‌اند. مطابق استاندارد ASTM D ۴۳۱۸-۸۷ (LL)، حد خمیری (PL) و نشان خمیری (PI) خاک مذکور به ترتیب ۳۲/۲، ۲۵/۱ و ۷/۱ درصد به دست آمده است. بدین ترتیب خاک لس گرگان براساس سیستم طبقه‌بندی متحد (۲۴۸۸ ASTM D) از نوع «ML» و به عبارتی «خاک لای با خاصیت خمیری کم» است. طبق استاندارد ASTM D ۸۵۴-۹۲، چگالی ویژه دانه‌های جامد (Gs) خاک لس گرگان برابر با ۲/۷۲ به دست آمده است.^[۲۸] به منظور تعیین منحنی نگهداشت آب - خاک، آزمایش کاغذ صافی تماسی روی نمونه‌های بازسازی شده از خاک لس مطابق استاندارد ASTM ۵۲۹۸-۰۳ انجام و مطابق شکل (۱ - ب) از مدل تحلیلی سه پارامتری ونگنوختن^{۱۲} برای برازش بر داده‌های آزمایشگاهی استفاده شده است.^[۳۰] به منظور تهیه‌ی نمونه‌ها، خاک عبور داده شده از الک شماره‌ی ۱۰۰ به مدت ۲۴ ساعت درون گرم‌خانه کاملاً خشک شده است. در مرحله‌ی بعد، مقدار مشخصی از خاک خشک‌شده، توزین و براساس درصد رطوبت اولیه‌ی مورد نظر (۱۱٪) با مقدار مشخصی آب مقطر کاملاً مخلوط و به مدت ۲۴ ساعت درون کیسه‌های پلاستیکی هواست قرار داده شد تا توزیع رطوبت در سرتاسر خاک یکنواخت شود. در پژوهش حاضر، از نمونه‌های استوانه‌ی با قطر ۳/۸ سانتی‌متر، ارتفاع ۷/۶ سانتی‌متر و با وزن مخصوص خشک ۱۵/۱ کیلو نیوتن بر مترمکعب (مشابه شرایط طبیعی در محل) استفاده شده است. نمونه‌ها به صورت بازسازی شده و در قالب مخصوص با استفاده از دستگاه تراکم استاتیکی ساخته شده‌اند. مشخصات فیزیکی اولیه‌ی نمونه‌های آزمایشی در جدول ۱ ارائه شده است. به منظور ساخت نمونه‌های همگن با چگالی خشک نسبتاً یکسان در ارتفاع نمونه، از روش تراکم کاهش‌یافته^{۱۳} پیشنهادی توسط آلد^{۱۴} برای ساخت نمونه‌ها استفاده شده است.^[۳۱] در روش تراکم کاهش‌یافته، لایه‌های زیرین خاک در تراکمی کمتر از تراکم هدف ریخته و کوبیده می‌شوند و کوبش لایه‌های بالایی موجب تراکم و رسیدن لایه‌های زیرین به تراکم هدف خواهد شد. در پژوهش حاضر، نمونه‌های بازسازی شده در سه لایه متراکم



شکل ۱. الف) پوش منحنی دانه بندی لس گرگان؛ ب) منحنی نگهداشت آب - خاک نمونه های بازسازی شده لس گرگان؛ پ) منحنی تراکم استاندارد لس گرگان؛ ت) تصویر گرفته شده از نمونه ی بازسازی شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگ نمایی ۳۵۰۰ برابر. [۲۸]

گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی (SEM) از نمونه های بازسازی شده قبل از شروع آزمایش مشاهده می شود؛ که مطابق آن، نمونه های بازسازی شده ی خاک لس گرگان ساختاری متخلخل و متشکل از حفره های ریز و درشت دارند، که باعث بروز رفتار فروریزشی در مسیر ترشدگی تحت بارگذاری اعمالی می شود.

۳. دستگاه و تجهیزات آزمایش

به منظور انجام آزمایش های سه محوری غیراشباع تحت شرایط تنش همسان و ناهمسان از یک دستگاه سه محوری ارتقاء یافته در دانشگاه صنعتی شریف با قابلیت کنترل مکش ساختاری و همچنین قابلیت بارگذاری به صورت کنترل کرنش و تنش استفاده شده است؛ که سه تنظیم کننده ی برقی فشار دارد، که از یک کمپرسور با ظرفیت اسمی ۱۵ بار تغذیه می شود. تنظیم کننده ها به همراه دو سامانه ی تبدیل فشار هوا به آب، وظیفه ی تأمین فشار همه جانبه، فشار هوای حفره یی و فشار آب حفره یی را دارند. همچنین جهت اعمال تنش برشی اولیه از یک جک برقی استفاده شده است. مقادیر تغییر حجم نمونه، تغییر حجم آب حفره یی، تغییر شکل قائم و نیروی محوری در طول آزمایش توسط دو دستگاه اندازه گیری تغییر حجم اتوماتیک، یک حسگر نیرو و یک حسگر تغییر مکان سنچ اندازه گیری شده اند. کلیه ی تنظیم کننده های برقی، جک برقی و حسگرهای دستگاه به یک واحد فرانت، کنترل و ثبت داده با قابلیت ثبت یک داده در هر ۳ ثانیه متصل بوده و بدین ترتیب قابلیت اعمال مسیرهای تنش مختلف و ثبت داده های خروجی به صورت تمام اتوماتیک فراهم شده است. در دستگاه اخیر،

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی نمونه ها. [۲۸]

مقدار	مشخصه ی خاک
ML	نوع خاک
۶۷-۷۵	مقدار لای (%)
۲۱-۲۹	مقدار رس (%)
۴	مقدار ماسه (%)
۳۲٫۲	حد روانی (%)
۲۵٫۱	حد خمیری (%)
۷٫۱	اندیس خمیری (%)
۲٫۷۲	چگالی ویژه ی دانه های جامد (Gs)
۱۵٫۱	وزن مخصوص خشک (کیلو نیوتن بر مترمربع)
۰٫۸	نسبت تخلخل اولیه
۱۱	درصد رطوبت اولیه (%)

و با توجه به توصیه ی لد بر ایجاد نمونه های شل با پتانسیل فروریزش بالاتر، مقدار پارامتر درصد کاهش تراکم (Un) در لایه ی اول برابر با ۱۵٪ در نظر گرفته شده است. همچنین منحنی تراکم خاک آزمایشی مطابق پراکتور استاندارد در شکل (۱ - پ) مشاهده می شود؛ که مطابق آن، شرایط اولیه ی نمونه ها در ناحیه ی خشک منحنی تراکم قرار گرفته است. نتایج پژوهش های انجام شده توسط برخی پژوهشگران، [۴-۹۶] بر روی نمونه های بازسازی شده نیز نشان می دهد که نمونه های متراکم شده در بخش خشک منحنی تراکم، ساختاری فروریزشی دارند. همچنین در شکل (۱ - ت)، تصویر

جدول ۲. مشخصات و برنامه‌ی آزمایش‌های ترشدگی و برش.

مرحله‌ی برش	مرحله‌ی ترشدگی						گروه و شماره‌ی آزمایش
	نرخ جابجایی محوری ($\mu\text{m}/\text{min}$)	η	p_n (kPa)	q (kPa)	ψ_f (kPa)	ψ_i (kPa)	
گروه اول	۵	۰	۱۰۰	۰	۴۰۰	۷۵۰	۱
		۱		۲۰۰			۲
		۲		۰			۳
گروه دوم	۵	۰	۱۰۰	۰	۳۰۰	۷۵۰	۴
		۱		۲۰۰			۵
		۲		۰			۶

و تعریف نسبت به یکدیگرند. متغیرهای k و η مطابق روابط ۴ و ۵ تعریف شده‌اند:

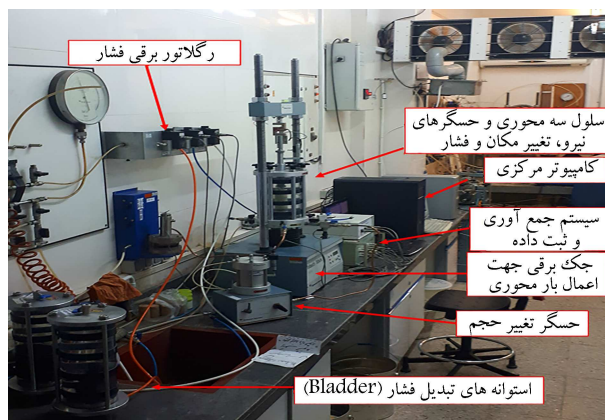
$$k = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{q}{p_n} \quad (5)$$

۵. برنامه‌ی آزمایش‌ها و روند انجام آنها

به منظور بررسی رفتار هیدرومکانیکی نمونه‌های بازسازی شده از خاک لس گرگان، مجموعه‌ی از آزمایش‌های سه‌محوری غیراشباع تحت مسیر «تنش خالص میانگین ثابت - مکش ساختاری کاهش» در محدوده‌ی مکش‌های متوسط و تحت تنش‌های برشی اولیه‌ی متفاوت و به صورت کنترل تنش انجام شده است. در انتهای هر آزمایش نیز جهت بررسی رفتار برشی، آزمایش برش سه‌محوری کنترل کرنش با نرخ جابجایی محوری ۵ میکرومتر بر ثانیه انجام شده است. این نرخ جابجایی براساس مطالعات قبلی انجام شده بر روی خاک لس گرگان [۹۸]، و به منظور اطمینان از ایجاد شرایط زهکشی شده‌ی کامل و ثابت ماندن مکش ساختاری در طول مرحله‌ی برش انتخاب شده است. برنامه‌ی آزمایش‌های انجام شده در جدول ۲ ارائه شده است؛ که در آن، برای مرحله‌ی ترشدگی مقادیر رطوبت اولیه‌ی نمونه (W_i)، مکش ساختاری اولیه (ψ_i)، مکش ساختاری هدف (ψ_f)، تنش تفاضلی (q)، تنش خالص میانگین (p_n) و نسبت تنش برشی (η) اختصاص یافته‌اند.

مطابق جدول ۲، در گروه اول آزمایش‌ها، نمونه‌هایی با وزن مخصوص خشک اولیه‌ی ۱۵/۱ کیلوپاسکال بر مترمکعب و رطوبت اولیه‌ی ۱۱٪ (متناظر درجه‌ی اشباع ۳۷/۴٪ و مکش ساختاری ۷۵۰ کیلوپاسکال)، تحت تنش خالص میانگین ۱۰۰ کیلوپاسکال با نسبت‌های تنش برشی $\eta = 0$ ، $\eta = 1$ و $\eta = 2$ با طی کردن مسیر ترشدگی از مکش ساختاری اولیه‌ی ۷۵۰ کیلوپاسکال در مکش ساختاری هدف ۴۰۰ کیلوپاسکال به تعادل رسیده‌اند. در گروه دوم، نمونه‌ها با شرایط اولیه‌ی مشابه با گروه اول و تحت تنش‌های اعمالی مشابه با طی کردن مسیر ترشدگی از مکش ساختاری اولیه‌ی ۷۵۰ کیلوپاسکال، در مکش‌های ساختاری هدف ۴۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال به تعادل رسیده‌اند. مسیر تنش آزمایش‌های انجام شده در فضای سه‌بعدی $\psi - p_n - q$ در شکل ۳ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، در گام اول با اعمال تراکم همسان و یا ناهمسان تحت مکش ساختاری اولیه (۷۵۰ کیلوپاسکال)، نمونه تحت مقادیر موردنظر تنش خالص میانگین و تنش برشی اولیه و سپس تحت مقادیر ثابت تنش خالص میانگین و تنش برشی اولیه، نمونه تا مکش ساختاری موردنظر (۳۰۰ یا ۴۰۰ کیلوپاسکال) در معرض ترشدگی قرار گرفته است. پس از اتمام مرحله‌ی ترشدگی، تمامی نمونه‌ها تحت مکش ساختاری ثابت و به صورت کنترل کرنش با نرخ



شکل ۲. نمایی از دستگاه سه‌محوری غیراشباع ارتقاء یافته [۲۹، ۲۸]

به منظور کنترل مکش ساختاری از روش انتقال محور ۱۶ استفاده می‌شود. [۳۲] برای این منظور از یک دیسک سرامیکی متخلخل (HAE) با فشار ورودی هوای ۵ بار استفاده شده است. در شکل ۲، نمایی کامل از دستگاه سه‌محوری غیراشباع تمام اتوماتیک آزمایشگاه مکانیک خاک پیشرفته‌ی دانشگاه صنعتی شریف مشاهده می‌شود. [۲۹، ۲۸]

۴. معرفی متغیرهای تنش و نسبت تنش

در پژوهش حاضر، متغیرهای اصلی تنش در خاک مطابق روابط ۱ الی ۳ تعریف شده‌اند:

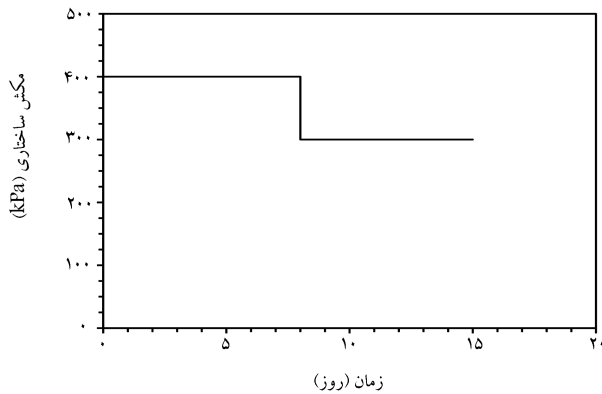
$$p_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} - u_a \quad (1)$$

$$\psi = u_a - u_w \quad (2)$$

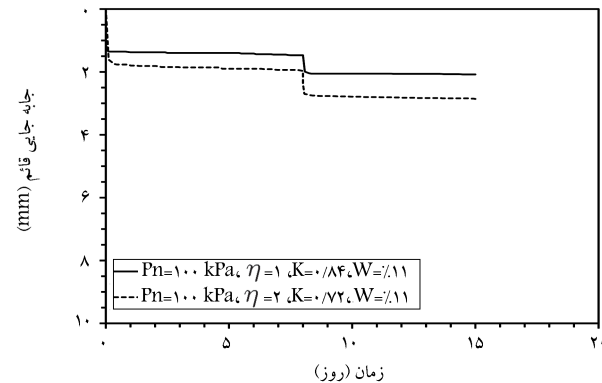
$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (3)$$

که در آنها، p_n تنش خالص میانگین، σ_1 و σ_2 تنش‌های اصلی و u_a و u_w به ترتیب فشار هوا و آب حفره‌ی هستند. متغیرهای ψ و q نیز به ترتیب معرف مکش ساختاری و تنش تفاضلی هستند.

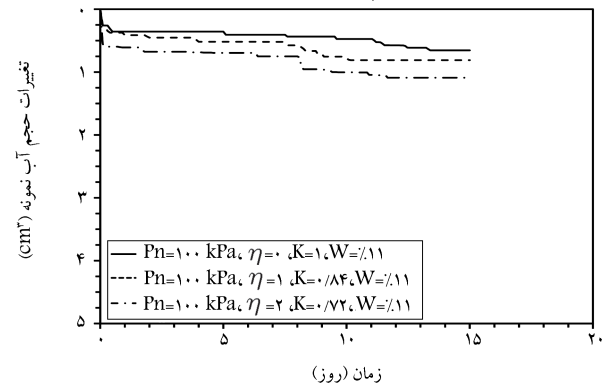
در پژوهش حاضر، نسبت تنش‌های اعمالی به نمونه در شرایط ناهمسان با دو متغیر نسبت تنش‌های اصلی (k) و نسبت تنش‌های برشی (η) بیان شده است. متغیرهای k و η هر دو بیان‌کننده‌ی نسبت تنش هستند و از نظر ریاضی قابل تبدیل



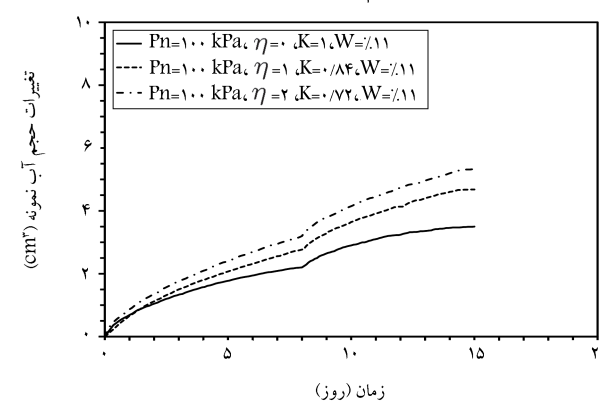
الف) تغییرات مکش اعمالی بر حسب زمان؛



ب) تغییر شکل قائم نمونه بر حسب زمان؛

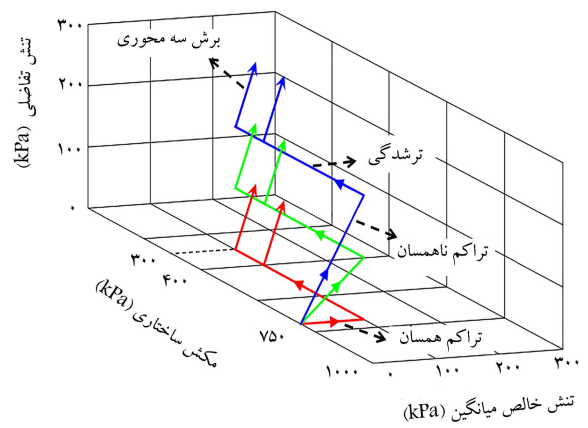


پ) تغییرات حجم نمونه بر حسب زمان؛



ت) تغییرات حجم آب نمونه بر حسب زمان.

شکل ۴. نتایج آزمایش‌های ترشدگی.



شکل ۳. مسیر تنش‌های اعمالی در فضای $q - p - \psi$.

جابجایی قائم ثابت ۵ میکرومتر بر دقیقه و تا کرنش محوری ۲۰ الی ۲۵ درصد تحت برش قرار گرفته‌اند. این تذکر لازم است که با توجه به نتایج مطالعات پیشین صورت‌گرفته بر روی رفتار برشی خاک لس گرگان،^[۹] این محدوده از نسبت‌های تنش برشی به‌گونه‌ای در نظر گرفته شده است که نمونه در مراحل ابتدایی مرحله‌ی ترشدگی (محدوده‌ی مکش‌های متوسط به بالا) به گسیختگی نرسد تا بتوان اثر تنش برشی اولیه را در رفتار نمونه‌ها در هر دو مسیر: ۱. ترشدگی و ۲. برش سه‌محوری، تا رسیدن به حالت بحرانی بررسی کرد.

۶. نتایج آزمایش‌ها

در بخش کنونی، نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های سه‌محوری غیراشباع با تمرکز بر ارزیابی اثر نسبت‌های تنش برشی (تنش‌های برشی اولیه) و همچنین اثر مکش ساختاری در رفتار هیدرومکانیکی نمونه‌های بازسازی‌شده از خاک لس گرگان بررسی شده است.

۱.۶. اثر نسبت تنش و مکش ساختاری در رفتار تراکمی

برای ارزیابی اثر تنش برشی اولیه در رفتار ترشدگی نمونه‌های بازسازی‌شده‌ی خاک لس گرگان، آزمایش‌های ذکرشده در جدول ۲ انجام شده است؛ که مطابق آنجا، نرخ تغییرات حجم نمونه و حجم آب حفره‌یی به ترتیب کمتر از ۰/۱ و ۰/۱۴ سانتی‌مترمکعب در روز به‌عنوان معیار رسیدن به تعادل هیدرومکانیکی در مکش ساختاری اعمال شده در نظر گرفته شده است.^[۷] این تذکر لازم است که با توجه به در نظر گرفتن یک معیار تعادل هیدرومکانیکی یکسان برای تمام آزمایش‌ها در همه‌ی گام‌های ترشدگی، خطاهای اندازه‌گیری تغییر حجم ناشی از عوامل مختلفی، مانند: تغییر حجم خزشی سلول سه‌محوری و تبخیر آب حفره‌یی برای تمام آزمایش‌ها به‌طور یکسان در نظر گرفته شده است، بنابراین زمان در تحلیل نتایج آزمایش‌ها تأثیری نداشته است. منحنی‌های تغییرات حجم نمونه و حجم آب حفره‌یی بر حسب زمان به ترتیب در شکل‌های (۴ - پ و ۴ - ت) مشاهده می‌شوند؛ که در آنها به‌طور قراردادی، کاهش حجم نمونه و مقدار آب جذب‌شده با علامت مثبت در نظر گرفته شده است. همچنین شایان ذکر است که به‌علت شباهت نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های ترشدگی گروه اول با نتایج به‌دست‌آمده از گام اول آزمایش‌های ترشدگی گروه دوم تحت مکش ساختاری هدف ۴۰۰ کیلوپاسکال (تأییدی بر تکرارپذیری آزمایش‌های انجام‌شده) فقط نتایج آزمایش‌های ترشدگی گروه دوم ارائه شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که

زمان تعادل برای نمونه های بازسازی شده در مسیر ترشدگی و برای رسیدن از مکش ساختاری اولیه 75° کیلو پاسکال به مکش ساختاری هدف 400 کیلو پاسکال، حدوداً 8 روز و برای رسیدن از مکش ساختاری 400 کیلو پاسکال به 300 کیلو پاسکال، حدوداً 7 روز بوده است.

در منحنی های مربوط به تغییرات حجم و همچنین جابجایی قائم نمونه ها (شکل های ۴ - ب و ۴ - پ) مشاهده می شود که تحت شرایط مکش ساختاری و تنش خالص میانگین ثابت، با افزایش نسبت های تنش برشی از صفر تا 2 ، به دلیل افزایش تنش برشی اولیه، نمونه ها کاهش حجم بیشتری از خود نشان داده اند. همچنین در منحنی های مذکور پرش هایی دیده می شود که بیانگر فروریزش های ایجاد شده در ساختار خاک لیس است. با توجه به جدول ۱، خاک لیس گران به طور متوسط، 25% رس دارد. تمایل بالای ذرات رس به جذب آب و نیز کاهش تدریجی تنش مؤثر اعمالی به نمونه در طی فرایند ترشدگی موجب بروز اندکی تورم در نمونه ها می شود. از طرف دیگر، در اثر افزایش درجه اشباع نمونه (کاهش مکش ساختاری)، پیوندهای بین دانه ای سست شده و تحت تنش خالص میانگین اعمال شده به نمونه، کاهش حجم یا فروریزش در ساختار خاک رخ داده است. در محدوده مکش های متوسط، نرخ وقوع فروریزش در ساختار خاک بیشتر از نرخ تورم ایجاد شده ناشی از کاهش تنش مؤثر و رفتار تورمی ذرات رس بوده است، بنابراین در منحنی های تغییر حجم، رفتار فروریزشی مشاهده می شود. این تذکر لازم است از آنجائی که نمونه های بازسازی شده با رطوبت اولیه 11% و در بخش خشک منحنی پراکتور متراکم شده اند، لذا ساختاری متخلخل و متشکل از حفره های ریز و درشت دارند (شکل ۱ - ت). بدین ترتیب، در اثر اعمال تنش های خارجی، ابتدا حفره های درشت متراکم شده و با افزایش سطح تنش، نوبت به حفره های ریزتر رسیده است.

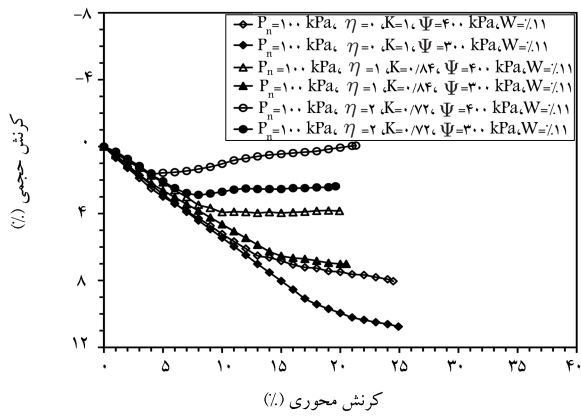
در منحنی های مربوط به تغییر حجم آب حفره ای در طی فرایند ترشدگی (شکل ۴ - ت) مشاهده می شود که در کلیه آزمایش ها، به دلیل کاهش مکش ساختاری ناشی از فرایند ترشدگی، نمونه شروع به جذب آب کرده و حجم آب حفره ای افزایش یافته است. همچنین نتایج آزمایش ها نشان می دهند که با افزایش تنش برشی اولیه (افزایش η) تحت تنش خالص میانگین ثابت، مقادیر آب جذب شده توسط نمونه افزایش یافته است. به نظر می رسد که این رفتار به این دلیل است که در محدوده مکش های ساختاری متوسط که در پژوهش حاضر بررسی شده است، بیشتر حفره های درشت موجود در ساختار خاک دچار ترشدگی نشده و جذب آب غالباً توسط حفره های ریز خاک صورت گرفته است. با شروع فرایند ترشدگی و جذب آب توسط نمونه، تورم ذرات رس از یک سو و اعمال تنش برشی اولیه از سوی دیگر موجب شده است که اندازه ی بخشی از حفره های موجود در ساختار اولیه ی خاک (حالتی که مکش متناظر ترشدگی آنها اندکی کمتر از مکش اعمالی به نمونه است) به اندازه یی کاهش یابد که مکش متناظر ترشدگی حفره های موجود از مکش اعمالی به نمونه فراتر رود. این امر به همراه تمایل بالای جذب آب ذرات رس موجب افزایش تمایل نمونه به جذب آب شده است. با این حال، در محدوده مکش های متوسط و تحت تنش خالص میانگین در نظر گرفته شده در پژوهش حاضر، نیروهای بین دانه ای کاملاً از بین نرفته و میزان کاهش حجم حفره های خاک و به دنبال آن کاهش ظرفیت جذب آب هنوز به اندازه یی نشده است که تمایل به افزایش جذب آب نمونه (ناشی از تمایل جذب آب ذرات رس و نیز افزایش مکش ساختاری داخلی نمونه به دنبال کاهش اندازه ی بخشی از حفره ها در اثر رفتار تورمی ذرات رس و اعمال تنش برشی اولیه) را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین، با افزایش تنش برشی اولیه، میزان جذب آب نمونه افزایش پیدا کرده است.

۲.۶. اثر نسبت تنش و مکش ساختاری در رفتار برشی

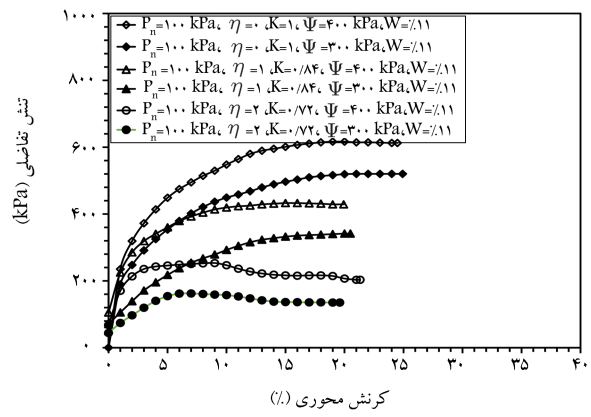
پس از اتمام مرحله ی ترشدگی، کلیه نمونه ها تحت شرایط مکش ساختاری ثابت و به صورت کنترل کرنش با نرخ جابجایی قائم ثابت 5 میکرومتر بر دقیقه تحت برش سه محوری قرار گرفتند.

نتایج حاصل آزمایش های برش سه محوری در شکل ۵ مشاهده می شوند؛ که در آن، متغیرهای W_i و p_n به ترتیب بیانگر رطوبت اولیه و تنش خالص میانگین نمونه ها در مرحله ی ماقبل برش (مرحله ی ترشدگی) است. از آنجائی که نمونه های آزمایشی در طول مسیر ترشدگی تحت مسیرهای تنش هیدرومکانیکی متفاوتی قرار گرفته اند (شکل ۳)، شرایط هیدرومکانیکی آنها (نسبت تخلخل، درجه اشباع، مکش ساختاری، تنش هم جانبی خالص و تنش برشی اولیه) در آغاز مرحله ی برش متفاوت است (جدول ۲ و شکل ۳). لذا با توجه به تأثیر شرایط هیدرومکانیکی نمونه در شروع مرحله ی برش در رفتار برشی، نمونه های آزمایشی رفتار برشی متفاوتی را نشان داده اند (شکل های ۵ - الف و ۵ - ب). همان طور که مشاهده می شود، در نمونه هایی که در مرحله ی ترشدگی تحت تنش خالص میانگین و تنش برشی اولیه (با نسبت تنش) مشابه بوده اند، مقدار تنش تقاضی قابل تحمل توسط نمونه در مرحله ی برش با افزایش مکش ساختاری، افزایش یافته است، چرا که نمونه های با مکش ساختاری بیشتر، پیوندهای بین ذرات قوی تر و در نتیجه ساختار مستحکم تری داشته و مقاومت بیشتری از خود نشان داده اند. همچنین تحت شرایط مکش ساختاری یکسان، با افزایش نسبت های تنش برشی و یا به عبارتی افزایش تنش برشی اولیه در مرحله ی ترشدگی، مقدار تنش تقاضی قابل تحمل توسط نمونه در مرحله ی برش کاهش یافته است. این رفتار بدین خاطر است که به علت اعمال تنش برشی اولیه، نمونه بخشی از مقاومت برشی خود را در مرحله ی ترشدگی از دست داده و بنابراین تنش برشی کمتری را در مرحله ی برش تحمل کرده است. تغییرات پیشینه ی تنش تقاضی قابل تحمل توسط نمونه ها در مرحله ی برش بر حسب نسبت های تنش برشی در مرحله ی ماقبل برش و برای مقادیر مختلف مکش ساختاری در شکل (۶ - الف) مشاهده می شود.

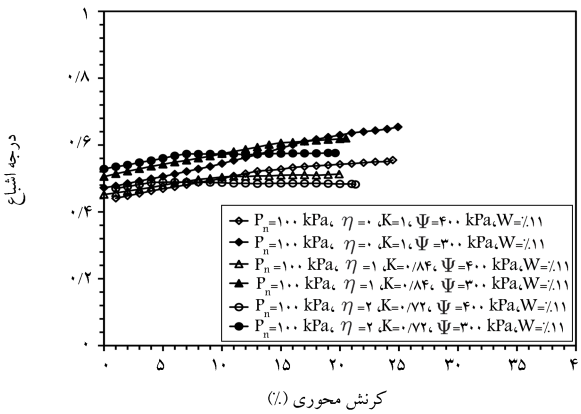
مطابق شکل (۵ - الف)، در آزمایش هایی که نمونه ها در مرحله ی ترشدگی تحت نسبت تنش برشی صفر (شرایط تنش همسان) و یا نسبت تنش برشی 1 (شرایط تنش ناهمسان) بوده اند، رفتار مقاومت برشی نمونه ها، سخت شونده و مشابه رفتار خاک های رسی عادی تحکیم یافته و یا خاک های ماسه یی شل است. تغییر حجم نمونه های مذکور در مرحله ی برش (شکل ۵ - ب) نیز تأییدکننده ی چنین رفتاری است. از طرفی، در آزمایش هایی که نمونه ها در مرحله ی ترشدگی تحت نسبت تنش برشی 2 قرار داشته اند، رفتار مقاومت برشی (شکل ۵ - الف) مابین حالت های سخت شونده و نرم شونده بوده و این نمونه ها در شروع مرحله ی برش، ابتدا دچار کاهش حجم و سپس دچار انبساط شده اند (شکل ۵ - ب). این رفتار نیز مشابه رفتار خاک های رسی پیش تحکیم یافته و یا خاک های ماسه یی متراکم تحت تنش های هم جانبی کم است، که دلیل آن در نسبت تنش های مختلف شرایط تنش متفاوت نمونه ها در مرحله ی ترشدگی است، به گونه یی که نمونه های با نسبت تنش برشی 2 نسبت به سایر نمونه ها تحت کمترین تنش خالص هم جانبی قرار داشته اند. اعمال تنش خالص هم جانبی پایین در کنار مکش ساختاری نسبتاً بالا، موجب تفاوت رفتار مقاومت برشی و تغییر حجم نمونه های تحت نسبت تنش برشی 2 در مقایسه با سایر نمونه ها شده است. در شکل (۶ - ب)، تغییرات کرنش حجمی متناظر حالت بحرانی بر حسب نسبت های تنش برشی در مرحله ی ماقبل برش برای مقادیر مختلف مکش ساختاری ارائه شده است.



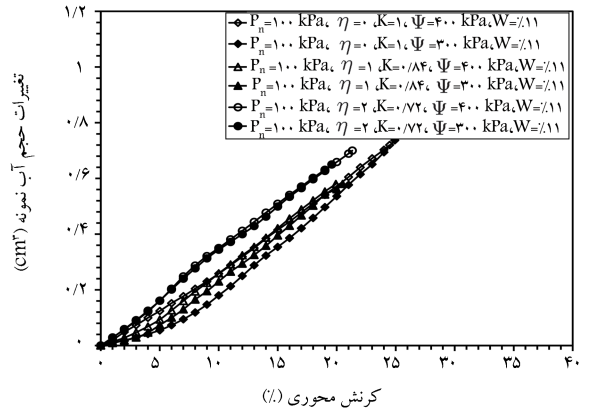
الف) تغییرات تنش تقاضایی بر حسب کرنش محوری؟



ب) تغییرات تنش تقاضایی بر حسب کرنش محوری؟

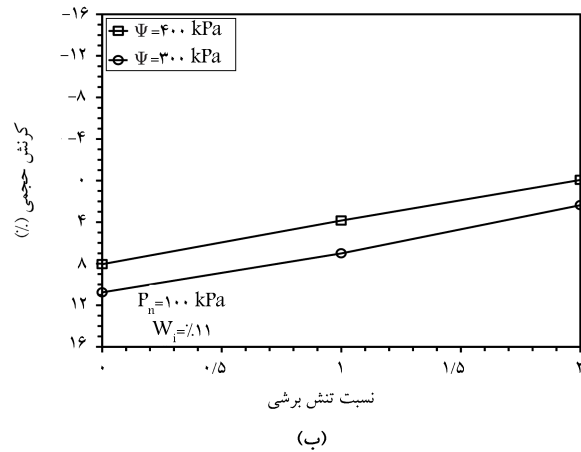


ج) تغییرات درجه انبساط بر حسب کرنش محوری.

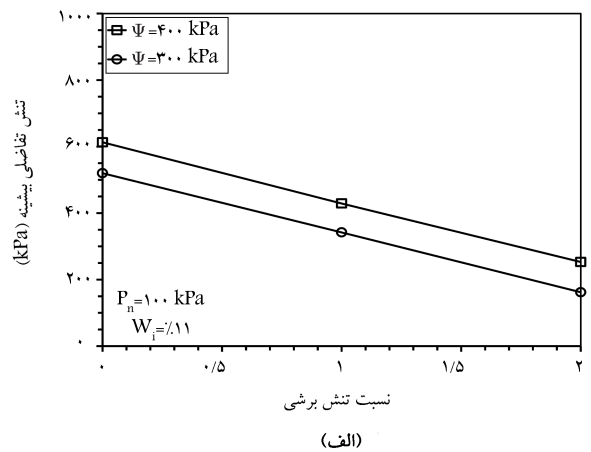


د) تغییرات حجم آب نمونه بر حسب کرنش محوری؟

شکل ۵. نتایج آزمایش‌های برش سه‌محوری.



الف) تغییرات تنش تقاضایی بیشینه (kPa)



ب) تغییرات درجه انبساط بر حسب کرنش محوری.

شکل ۶. الف) تغییرات تنش تقاضایی بیشینه در مرحله‌ی برش با نسبت تنش برشی (η) در مرحله‌ی ترشدگی؛ ب) تغییرات کرنش حجمی متناظر حالت بحرانی با نسبت تنش برشی (η) در مرحله‌ی ترشدگی.

دیگر، باعث کاهش حجم حفره‌ها و در نتیجه افزایش مکش ساختاری داخلی خاک شده و این تفاوت ایجادشده بین مکش ساختاری اعمالی و مکش ساختاری داخلی نمونه به همراه تمایل بالای جذب آب بخش رسی ساختار خاک، موجب تمایل نمونه به جذب آب شده است. در حالتی که نمونه رفتار انبساطی از خود نشان می‌دهد، انبساط نمونه موجب کاهش فشار آب حفره‌ی و افزایش مکش ساختاری داخلی نمونه نسبت به مکش اعمالی می‌شود؛ که این امر در کنار تمایل

تغییرات درجه‌ی انبساط بر حسب کرنش محوری نمونه‌ها در مرحله‌ی برش در شکل (۵ - ت) مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، روند تغییرات درجه‌ی انبساط به میزان تغییرات حجم نمونه و حجم آب حفره‌ی در طی برش وابسته است. مطابق با شکل (۵ - پ)، تمامی نمونه‌ها در طول مرحله‌ی برش، جذب آب داشته‌اند؛ زیرا علی‌رغم اعمال مکش ساختاری ثابت و رفتار تراکمی نمونه حین برش، وقوع فروریزش در ساختار خاک از یک سو و تورم ذرات رس در اثر جذب آب از سوی

که در آن، c'_1 چسبندگی ظاهری خاک است و به صورت رابطه ۸ تعریف می‌شود:

$$c'_1 = c' + (u_a - u_w) \tan(\phi^b) \quad (8)$$

با استفاده از نتایج به دست آمده از آزمایش‌های برش سه‌محوری غیراشباع انجام شده در مکش‌های ساختاری ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال و جای‌گذاری نتایج به دست آمده در رابطه ۷، مقادیر متغیرهای مقاومت برشی (c' ، ϕ' و ϕ^b) برای نمونه‌های بازسازی شده‌ی خاک فروریزی لیس گرگان با رطوبت اولیه ۱۱٪ به ترتیب برابر با ۴۷ کیلوپاسکال، ۳۲/۹ درجه و ۱۳/۶ درجه به دست آمده است. همچنین با استفاده از رابطه ۸، مقادیر چسبندگی ظاهری (c'_1) در مکش‌های ساختاری ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب برابر با ۷۷/۱ و ۱۰۱/۲ کیلوپاسکال به دست آمده است، که این امر نشان‌دهنده‌ی افزایش چسبندگی ظاهری با افزایش مکش ساختاری است.

۴.۶. تئوری حالت بحرانی و رویکرد تنش مؤثر

در مطالعات اولیه بر روی رفتار خاک‌های غیراشباع، پژوهشگران مختلفی تلاش کرده‌اند تا با ارائه‌ی مدل‌های رفتاری مختلف بر پایه‌ی تئوری تنش مؤثر بیشاپ σ' ، رفتار خاک‌های غیراشباع را توصیف کنند. با این حال، تعدادی از پژوهشگران مانند جنینگز و برلند (۱۹۶۲)، [۳۵] بیان کرده‌اند که رابطه‌ی تنش مؤثر به تنهایی نمی‌تواند رفتار خاک‌های فروریزی غیراشباع را توجیه کند و اشاره کرده‌اند که بر طبق نظریه‌ی تنش مؤثر، با افزایش درجه‌ی اشباع خاک، مقدار تنش مؤثر کاهش می‌یابد. لذا انتظار می‌رود که خاک رفتار تومری نشان دهد، اما در مورد خاک‌های فروریزی دقیقاً عکس این مطلب اتفاق می‌افتد. در این خصوص، این تذکر لازم است که استدلال آنها در حوزه‌ی تغییر شکل‌های کشسان اعتبار دارد؛ در حالی که پدیده‌ی فروریزش یک تغییر شکل خمیری است، که به دلیل کاهش نیروهای نگهدارنده‌ی بین‌دانه‌ی ریخ می‌دهد. لذا برای مرتبط کردن پارامترهای تنش و کرنش جهت توصیف پدیده‌ی فروریزش باید روابط رفتاری مناسبی استفاده شود و در این رابطه نمی‌توان از اصول مکانیک خاک کلاسیک پیروی کرد. در این راستا، تعدادی از پژوهشگران، مانند قاسم زاده و امیری (۲۰۱۳) و قاسم زاده و همکاران (۲۰۱۷) نشان داده‌اند که با استفاده از یک چارچوب کشسان‌خمیری مناسب می‌توان رفتار پیچیده‌ی خاک‌های غیراشباع مانند پدیده‌ی فروریزش ناشی از ترشدگی را توصیف کرد [۳۷، ۳۶] بیشاپ (۱۹۵۹) با توسعه‌ی معادله‌ی تنش مؤثر کلاسیک ترزاقی به حالت غیراشباع، رابطه‌ی ۹ را برای بیان تنش مؤثر پیشنهاد کرده است: [۳۸]

$$p' = (p - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (9)$$

که در آن، p' تنش مؤثر میانگین، p تنش کل میانگین و χ پارامتر تنش مؤثر هستند. رابطه‌ی ۷ را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۱۰ نوشت:

$$p' = p_n + \chi \cdot \psi \quad (10)$$

یکی از مهم‌ترین مسائل در رابطه‌ی پیشنهادی بیشاپ، نحوه‌ی تعریف پارامتر تنش مؤثر (χ) است. تاکنون روابط متعددی جهت محاسبه‌ی پارامتر تنش مؤثر پیشنهاد شده است، که برخی از آنها تابعی از مکش ساختاری و برخی دیگر تابع درجه‌ی اشباع هستند. یکی از رایج‌ترین روابط، برابر قراردادن پارامتر تنش مؤثر با درجه‌ی اشباع است. [۳۹-۴۱] برخی دیگر از پژوهشگران، به جای درجه‌ی اشباع از پارامتر درجه‌ی اشباع مؤثر استفاده کرده‌اند، [۱۲، ۱۱] که به صورت رابطه‌ی ۱۱ تعریف می‌شود:

$$S_e = \frac{S_r - S_{r, res}}{S_{r,0} - S_{r, res}} \quad (11)$$

بالای جذب آب بخش رسی، منجر به جذب آب توسط نمونه می‌شود و بنابراین همان‌گونه که در شکل (۵-ت) مشاهده می‌شود، در آزمایش‌های ۱، ۲، ۴ و ۵ رفتار تراکمی از یک سو و جذب آب توسط نمونه از سوی دیگر، باعث افزایش تدریجی درجه‌ی اشباع در حین برش شده است. در آزمایش‌های ۳ و ۶ نیز تا زمانی که نمونه در طی برش رفتار تراکمی داشته است، درجه‌ی اشباع خاک افزایش پیدا کرده است، اما با شروع رفتار اتساعی و با وجود تمایل نمونه به جذب آب، افزایش حجم نمونه به اندازه‌ی بی‌بوته است که باعث ایجاد روند کاهش درجه‌ی اشباع شده است.

۳.۶. متغیرهای مقاومت برشی با رویکرد متغیرهای مستقل تنش

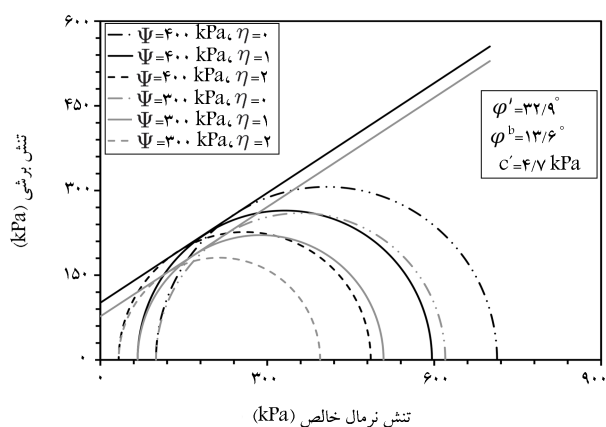
فردلاند و مورگنسترن (۱۹۷۸)، با تعمیم پوش گسیختگی برشی موهر - کلمب، رابطه‌ی ۶ را برای محاسبه‌ی مقاومت برشی در خاک‌های غیر اشباع پیشنهاد کرده‌اند: [۳۳]

$$\tau = c' + (u_a - u_w) \tan(\phi^b) + (\sigma - u_a) \tan(\phi') \quad (6)$$

که در آن، c' چسبندگی در مکش ساختاری و تنش نرمال خالص صفر، ϕ' زاویه‌ی اصطکاک داخلی متناظر با تغییرات تنش نرمال خالص و ϕ^b زاویه‌ی اصطکاک داخلی متناظر با تغییرات مکش ساختاری هستند. رابطه‌ی ۶، در فضای تنش سه‌بعدی ($\tau - \sigma_n - \psi$) به شکل یک رویه است، که تصویر آن در صفحه‌ی ($\tau - \sigma_n$) به صورت یک سری خطوط موازی با زاویه‌ی شیب ϕ' است. عرض از مبدأ این خطوط، یعنی مجموع عبارت‌های اول و دوم سمت راست رابطه‌ی ۶، بیانگر چسبندگی ظاهری c'_1 خاک است، که این مقدار با افزایش مکش ساختاری افزایش می‌یابد. [۳۴] در بخش حاضر، پوش‌های گسیختگی متناظر با مکش‌های ساختاری ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال در صفحه‌ی $\tau - \sigma_n$ بررسی شده است.

مطابق شکل ۷ ملاحظه می‌شود که در یک مکش ساختاری ثابت، با افزایش نسبت تنش برشی (افزایش تنش برشی اولیه)، قطر دایره‌ی موهر یا به عبارتی، مقاومت برشی کاهش یافته است. همچنین برای مقادیر یکسانی از نسبت‌های تنش برشی، با افزایش مکش ساختاری، مقاومت برشی خاک افزایش یافته است. به منظور محاسبه‌ی متغیرهای مقاومت برشی به دست آمده از آزمایش‌های سه‌محوری غیراشباع، معیار گسیختگی موهر - کلمب توسعه یافته را می‌توان بر حسب تنش‌های اصلی خالص به صورت رابطه‌ی ۷ بازنویسی کرد:

$$(\sigma_1 - u_a) = (\sigma_3 - u_a) \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2}\right) + 2c'_1 \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2}\right) \quad (7)$$



شکل ۷. پوش گسیختگی در فضای تنش برشی و تنش نرمال خالص.

با توجه به اینکه خاک لس گرگان به طور متوسط، ۲۵٪ رس دارد، تمایل بالایی ذرات رس به جذب آب و کاهش تدریجی تنش مؤثر اعمالی به نمونه در طی فرآیند ترشدگی موجب تمایل به انبساط نمونه می‌شود. از طرف دیگر، در اثر افزایش درصد رطوبت نمونه (کاهش مکش ساختاری)، پیوندهای بین دانه‌ی سست می‌شود و تحت تنش خالص میانگین اعمال شده به نمونه، کاهش حجم یا فروریزش در ساختار خاک رخ می‌دهد. در محدوده‌ی مکش‌های متوسط، نرخ وقوع فروریزش در ساختار خاک بیشتر از نرخ تورم ایجادشده‌ی ناشی از کاهش تنش مؤثر و رفتار تورمی ذرات رس است، بنابراین در منحنی‌های تغییر حجم رفتار فروریزشی مشاهده می‌شود.

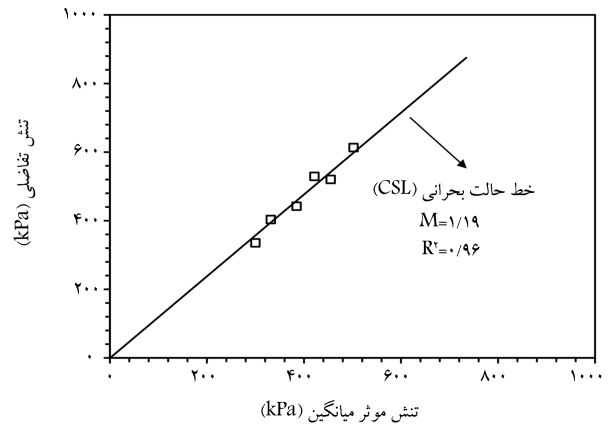
در محدوده‌ی مکش‌های متوسط و تحت تنش خالص میانگین در نظر گرفته شده در پژوهش حاضر، نیروهای بین دانه‌ی کاملاً از بین نرفته و میزان کاهش حجم حفره‌های خاک هنوز به اندازه‌ی نرسیده است که افزایش تمایل جذب آب نمونه را تحت تأثیر قرار دهد؛ بنابراین، با افزایش تنش برشی اولیه، میزان جذب آب نمونه‌ها افزایش پیدا کرده است.

نتایج به دست آمده از آزمایش‌های برش بیانگر آن است که برای نمونه‌های تحت شرایط تنشی مشابه در مرحله‌ی ترشدگی، با افزایش مکش ساختاری مقدار تنش تفاضلی قابل تحمل در مرحله‌ی برش افزایش یافته است، که علت آن افزایش قدرت پیوندهای بین ذرات و در نتیجه افزایش استحکام ساختار خاک در مکش ساختاری بالاتر است. همچنین تحت شرایط مکش ساختاری یکسان، با افزایش تنش برشی اولیه در مرحله‌ی ترشدگی، مقدار تنش تفاضلی قابل تحمل توسط نمونه در مرحله‌ی برش کاهش یافته است، که این رفتار به دلیل از دست رفتن بخشی از مقاومت برشی خاک در اثر اعمال تنش برشی اولیه در مرحله‌ی ترشدگی است.

در آزمایش‌های مرحله‌ی ترشدگی تحت نسبت‌های تنش برشی صفر (شرایط تنش همسان) و یا ۱، رفتار برشی نمونه‌ها به صورت سخت‌شونده و مشابه رفتار خاک‌های رسی عادی تحکیم یافته و یا ماسه‌ی شل بوده است. همچنین، در آزمایش‌ها تحت نسبت تنش برشی ۲، رفتار برشی نمونه‌ها، مابین حالت‌های سخت‌شونده و نرم‌شونده و مشابه خاک‌های رسی پیش تحکیم یافته و یا ماسه‌ی متراکم بوده است. علت تفاوت رفتار برشی نمونه‌های تحت نسبت تنش برشی ۲ در مقایسه با سایر نمونه‌ها، میزان تنش خالص هم‌جانبه‌ی کم اعمال شده به آنها در مرحله‌ی ترشدگی است، که در کنار مکش ساختاری نسبتاً بالا باعث بروز این رفتار شده است.

تمامی نمونه‌ها در طول مرحله‌ی برش، جذب آب داشته‌اند؛ زیرا علی‌رغم اعمال مکش ساختاری ثابت در حین برش، در حالتی که نمونه رفتار تراکمی از خود نشان داده است، وقوع فروریزش در ساختار خاک از یک سو و تورم ذرات رس در اثر جذب آب از سوی دیگر، باعث کاهش حجم حفره‌ها و در نتیجه افزایش مکش ساختاری داخلی خاک شده و این تفاوت ایجادشده بین مکش ساختاری اعمالی و مکش ساختاری داخلی نمونه به همراه تمایل بالای جذب آب بخش رسی موجب تمایل نمونه به جذب آب شده است. در حالتی که نمونه رفتار اتساعی از خود نشان داده است، انبساط نمونه کاهش فشار آب حفره‌ی را در پی داشته است، که موجب افزایش مکش ساختاری داخلی نمونه نسبت به مکش اعمالی شده است. لذا، در کنار تمایل بالای جذب آب بخش رسی، منجر به جذب آب توسط نمونه نیز شده است.

نتایج آزمایش‌ها در مرحله‌ی برش با رویکرد متغیرهای مستقل تنش بررسی شده‌اند. بر این اساس، پوش‌های گسیختگی متناظر با مکش‌های ساختاری ۳۰° و



شکل ۸. خط حالت بحرانی در فضای تنش مؤثر (صفحه‌ی $q - p'$).

که در آن، S_r درجه‌ی اشباع، $S_{r,0}$ درجه‌ی اشباع متناظر مکش ساختاری صفر و $S_{r,res}$ درجه‌ی اشباع متناظر حالت باقیمانده 22 است. با توجه به شکل (۱ - ب)، مقادیر $S_{r,0}$ و $S_{r,res}$ در مسیر ترشدگی برای نمونه‌های بازسازی شده‌ی خاک لس گرگان با رطوبت اولیه‌ی ۱۱٪ به ترتیب برابر با ۰٫۹۸۶ و ۰٫۱۲۲ است. در نوشتار حاضر، رابطه‌ی تنش مؤثر مطابق با رابطه‌ی پیشنهادی لو 23 و همکاران (۲۰۱۰) 24 به صورت رابطه‌ی ۱۲ در نظر گرفته شده است:

$$p' = p_n + S_e \cdot \psi \quad (12)$$

با جایگزینی رابطه‌ی ۱۲ به جای رابطه‌ی تنش مؤثر کلاسیک ترازقی، بسیاری از تئوری‌های مکانیک خاک کلاسیک قابل گسترش به حالت غیراشباع هستند. طبق رابطه‌ی در نظر گرفته شده برای تنش مؤثر و براساس تئوری حالت بحرانی، در شکل ۸، نقاط متناظر با حالت بحرانی در فضای تنش مؤثر (صفحه‌ی $q - p'$) ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، خط حالت بحرانی (CSL) 24 با دقت مناسبی بر داده‌ها برازش یافته ($R^2 = 0.96$) و شیب آن برابر با ۱/۱۹ است. با توجه به شیب خط حالت بحرانی، مقدار زاویه‌ی اصطکاک متناظر حالت بحرانی (ϕ'_{cr}) برابر با ۲۹/۸ درجه است.

۷. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، به ارزیابی اثر وجود تنش برشی اولیه (شرایط تنش ناهمسان) در رفتار هیدرومکانیکی نمونه‌های بازسازی شده‌ی خاک لس گرگان در مکش‌های ساختاری متوسط پرداخته شده است. بدین منظور مجموعه‌ی آزمایش‌های سه‌محوری غیراشباع با کنترل مکش و کنترل تنش در مسیر بارگذاری «تنش خالص میانگین ثابت - مکش ساختاری کاهش» تحت نسبت‌های تنش برشی صفر، ۱ و ۲ انجام شده است. در انتهای هر کدام از آزمایش‌ها، نمونه‌ها در شرایط مکش ساختاری ثابت تحت برش سه‌محوری با کنترل کرنش قرار گرفته‌اند.

نتایج به دست آمده از آزمایش‌های ترشدگی در محدوده‌ی مکش‌های متوسط نشان می‌دهند که در کلیه‌ی آزمایش‌ها به دلیل کاهش مکش ساختاری ناشی از فرآیند ترشدگی، نمونه شروع به جذب آب کرده و حجم آب حفره‌ی افزایش یافته است. از طرف دیگر، تحت شرایط مکش ساختاری و تنش خالص میانگین ثابت، با افزایش تنش برشی اولیه، میزان کاهش حجم نمونه‌ها افزایش یافته است و در منحنی‌های تغییر حجم پرش‌هایی مشاهده می‌شود که بیانگر فروریزش‌های ایجادشده در ساختار خاک لس است.

۴۰۰ کیلو پاسکال با رسم دایر موهر بر حسب تنش‌های اصلی خالص $(\sigma_{n1}, \sigma_{n2})$ در صفحه‌ی $\tau - \sigma_n$ ترسیم شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، پوش‌های گسیختگی به صورت خطوط موازی هستند، که نشان‌دهنده‌ی عدم تأثیر مکش ساختاری در زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک در محدوده‌ی مکش‌های متوسط است. همچنین نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که چسبندگی ظاهری خاک با

افزایش مکش ساختاری افزایش یافته است.

نتایج مرحله‌ی برش براساس مفهوم حالت بحرانی و با رویکرد تنش مؤثر نیز بررسی شده است. بر این اساس، خط حالت بحرانی در صفحه‌ی $q - p'$ با دقت خوبی به نقاط متناظر حالت بحرانی برازش داده شده و شیب آن برابر با $1/19$ بوده است.

پانوشتها

1. Terzaghi
2. Casagrande & Carillo
3. Inherent Anisotropy
4. Induced Anisotropy
5. Cui & Delage
6. Della Vecchia & Romero
7. Sivakumar
8. Zhan
9. Zhou
10. Buenfil
11. Aeolian
12. Van Genuchten
13. Under-Compaction
14. Ladd
15. Scanning Electron Microscope
16. Axis Translation
17. High Air Entry
18. Fredlund & Morgenstern
19. Apparent Cohesion
20. Bishop
21. Jennings & Burland
22. Residual State
23. Lu
24. Critical State Line

منابع (References)

1. Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri, G., 1996. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. Third Ed, John Wiley & sons.
2. Jefferson, I. and Rogers, C.D., 2012. Collapsible soils. *Proceedings of ICE Manual of Geotechnical Engineering*. ICE Publishing, London, pp. 391-411. <https://doi.org/pdf/10.1680/moge.57074.0391>.
3. Li, P., Vanapalli, S. and Li, T., 2016. Review of collapse triggering mechanism of collapsible soils due to wetting. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(2), pp. 256-274. <http://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.12.002>.
4. Pereira, J.H. and Fredlund, D.G., 2000. Volume change behavior of collapsible compacted gneiss soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(10), pp. 907-916. [http://doi.org/10.1061/\(asce\)10900241\(2000\)126:10\(907\)](http://doi.org/10.1061/(asce)10900241(2000)126:10(907)).
5. Sun, D.A., Matsuoka, H. and Xu, Y.F., 2004. Collapse behavior of compacted clays in suction-controlled triaxial tests. *Geotechnical Testing Journal*, 27(4), pp. 362-370. <http://doi.org/10.1520/gtj11418>.
6. Jotisankasa, A., 2005. *Collapse Behaviour of a Compacted Silty Clay*. Doctoral Dissertation, University of London.
7. Haeri, S.M., Akbari Garakani, A., Khosravi, A. and Meehan, C.L., 2014. Assessing the hydro-mechanical behavior of collapsible soils using a modified triaxial test device. *Geotechnical Testing Journal*, 37(2), pp. 190-204. <http://doi.org/10.1520/gtj20130034>.
8. Garakani, A.A., Haeri, S.M., Khosravi, A. and Habibagahi, G., 2015. Hydro-mechanical behavior of undisturbed collapsible loessial soils under different stress state conditions. *Engineering Geology*, 195, pp. 28-41. <http://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.05.026>.
9. Haeri, S.M., Khosravi, A., Garakani, A.A. and Ghazizadeh, S., 2017. Effect of soil structure and disturbance on hydromechanical behavior of collapsible loessial soils. *International Journal of Geomechanics*, 17(1), p.04016021. [http://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0000656](http://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000656).
10. Almahbobi, S., Tripathy, S. and Cleall, P.J., 2018. Effects of confining stress and suction on volume change and shear strength behaviour of a collapsible soil. In *The 7th International Conference on Unsaturated Soils*, p. 6. <https://www.issmge.org/publications/online-library>.
11. Haeri, S.M., Akbari Garakani, A., Roohparvar, H.R., Desai, C.S., Seyed Ghafouri, S.M.H. and Salemi Kouchesfahani, K., 2019. Testing and constitutive modeling of lime-stabilized collapsible loess. I: Experimental investigations. *International Journal of Geomechanics*, 19(4), p. 04019006. [http://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.000136](http://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.000136).
12. Akbari Garakani, A., Haeri, S.M., Desai, C.S., Hosein Seyed Ghafouri, S.M., Sadollahzadeh, B. and Hashemi Senejani, H., 2019. Testing and constitutive modeling of lime-stabilized collapsible loess. II: Modeling and validations. *International Journal of Geomechanics*, 19(4), p.04019007. [http://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0001386](http://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0001386).
13. Sadeghi, H., Kiani, M., Sadeghi, M. and Jafarzadeh, F., 2019. Geotechnical characterization and collapsibility of a natural dispersive loess. *Engineering Geology*, 250, pp. 89-100. <http://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.01.015>.
14. Zhang, D., Wang, J., Chen, C. and Wang, S., 2020. The compression and collapse behaviour of intact loess in suction-monitored triaxial apparatus. *Acta Geotechnica*, 15(2), pp. 529-548. <http://doi.org/10.1007/s11440-019-00829-3>.
15. Casagrande, A., 1944. Shear failure of anisotropic materials. *Proc. Boston Soc. Civ. Engrs*, 31, pp.74-87. <http://doi.org/10.1061/taceat.0005693>.

16. Cui, Y.J. and Delage, P., 1996. Yielding and plastic behaviour of an unsaturated compacted silt. *Géotechnique*, 46(2), pp. 291-311. <http://doi.org/10.1680/geot.1996.46.2.291>.
17. Vecchia, G.D. and Romero, E., 2013. A fully coupled elastic-plastic hydromechanical model for compacted soils accounting for clay activity. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 37(5), pp.503-535. <http://doi.org/10.1002/nag.1116>.
18. Sivakumar, V., Sivakumar, R., Murray, E.J., Mackinnon, P. and Boyd, J., 2010. Mechanical behaviour of unsaturated kaolin (with isotropic and anisotropic stress history). Part 1: wetting and compression behaviour. *Géotechnique*, 60(8), pp. 581-594. <http://doi.org/10.1680/geot.8.p.007>.
19. Zhan, T.L.T., Chen, R. and Ng, C.W.W., 2014. Wetting-induced softening behavior of an unsaturated expansive clay. *Landslides*, 11(6), pp.1051-1061. <http://doi.org/10.1007/s10346-013-0449-6>.
20. Zhou, Y.F., Tham, L.G., Yan, W.M., Dai, F.C. and Xu, L., 2014. Laboratory study on soil behavior in loess slope subjected to infiltration. *Engineering Geology*, 183, pp. 31-38. <http://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.09.010>.
21. Buenfil, C., Romero Morales, E.E., Lloret Morancho, A. and Gens Sol, A., 2016. Anisotropic behaviour of compacted clayey silt subjected to hydromechanical paths. In *3rd European Conference on Unsaturated Soils: E-UNSAT 2016*, Paris, France, pp. 1-6, E3S Web of Conferences. <http://doi.org/10.1051/e3sconf/20160914021>.
22. Al-Sharrad, M.A., Gallipoli, D. and Wheeler, S.J., 2017. Experimental investigation of evolving anisotropy in unsaturated soils. *Gotechnique*, 67(12), pp. 1033-1049. <http://doi.org/10.1680/jgeot.15.p.279>.
23. Liang, C., Cao, C. and Wu, S., 2018. Hydraulic-mechanical properties of loess and its behavior when subjected to infiltration-induced wetting. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77(1), pp. 385-397. <http://doi.org/10.1007/s10064-016-0943-x>.
24. Wang, J., Zhang, D., Wang, N. and Gu, T., 2019. Mechanisms of wetting-induced loess slope failures. *Landslides*, 16(5), pp. 937-953. <http://doi.org/10.1007/s10346-019-01144-4>.
25. Frechen, M., Kehl, M., Rolf, C., Sarvati, R. and Skowronek, A., 2009. Loess chronology of the Caspian lowland in northern Iran. *Quaternary International*, 198(1-2), pp. 220-233. <http://doi.org/10.1016/j.quaint.2008.12.012>.
26. Haeri, S.M., Zamani, A. and Garakani, A.A., 2012. Collapse potential and permeability of undisturbed and remolded loessial soil samples. In *Unsaturated Soils: Research and Applications*, 1, pp. 301-308. Springer Berlin Heidelberg. http://doi.org/10.1007/978-3-642-31116-1_41.
27. Haeri, S.M., 2016. Hydro-mechanical behavior of collapsible soils in unsaturated soil mechanics context. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2(1), pp.25-40. <http://doi.org/10.3208/jgssp.KL-3>.
28. Sadollahzadeh, B. 2017. *Assessment of the Initial Shear Stress Effect on Unsaturated Behavior of Collapsible Soil, a Case Study of the Gorgan Loess*. M.Sc. Thesis, Sharif University of Technology. [In Persian].
29. Borujerdi, S.S. 2015. *Development of Unsaturated Triaxial Device in Order to Conduct Stress-Controlled Tests and Study of the Hydromechanical Behavior of Collapsible Soils Under Anisotropic Consolidation, a Case Study of the Gorgan Loess*. M.Sc. Thesis, Sharif University of Technology. [In Persian].
30. Van Genuchten, M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), pp. 892-898. <http://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>.
31. Ladd, R.S., 1978. Preparing test specimens using under-compaction. *ASTM Geotechnical Testing Journal*, 1(1), pp. 16-23. <http://doi.org/10.1520/gtj10364j>.
32. Hilf, J.W., 1956. *An Investigation of Pore-water Pressure in Compacted Cohesive Soils*. Doctoral Dissertation, University of Colorado at Boulder.
33. Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R. and Widger, R.A. (1978). The shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 15(3), pp. 313-321. <http://doi.org/10.1139/t78-029>.
34. Lu, N. and Likos, W.J., 2006. Suction stress characteristic curve for unsaturated soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(2), pp. 131-142. [http://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2006\)132:2\(131\)](http://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2006)132:2(131)).
35. Jennings, J.E.B. and Burland, J.B., 1962. Limitations to the use of effective stresses in partly saturated soils. *Géotechnique*, 12(2), pp.125-144. <http://doi.org/10.1680/geot.1962.12.2.125>.
36. Ghasemzadeh, H. and Amiri, S.G., 2013. A hydro-mechanical elastoplastic model for unsaturated soils under isotropic loading conditions. *Computers and Geotechnics*, 51, pp. 91-100. <http://doi.org/10.1016/j.compgeo.2013.02.006>.
37. Ghasemzadeh, H., Sojoudi, M.H., Amiri, S.G. and Karami, M.H., 2017. Elastoplastic model for hydro-mechanical behavior of unsaturated soils. *Soils and Foundations*, 57(3), pp. 371-383.
38. Bishop, A.W. (1959). The Principle of Effective Stress. *Teknisk Ukeblad*, 106(39), pp. 859-863.
39. Gallipoli, D., Gens, A., Sharma, R. and Vaunat, J., 2003. An elasto-plastic model for unsaturated soil incorporating the effects of suction and degree of saturation on mechanical behaviour. *Géotechnique*, 53(1), pp. 123-135. <http://doi.org/10.1680/geot.2003.53.1.123>.
40. Wheeler, S.J., Sharma, R.S. and Buisson, M.S.R., 2003. Coupling of hydraulic hysteresis and stress-strain behaviour in unsaturated soils. *Géotechnique*, 53(1), pp. 41-54. <http://doi.org/10.1680/geot.2003.53.1.41>.
41. Akbari Garakani, A., Pirjalili, A. and Desai, C.S., 2021. An effective stress-based DSC model for predicting the coefficient of lateral soil pressure in unsaturated soils. *Acta Geotechnica*, 16(12), pp. 3813-3830. <http://doi.org/10.1007/s11440-021-01376-6>.
42. Lu, N., Godt, J.W. and Wu, D.T., 2010. A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil. *Water Resources Research*, 46(5). <http://doi.org/10.1029/2009wr008646>.