

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

سید محسن حائری^۱، بهنام سعدالله زاده^۲، سامان سلیمانی بروجردی^۳
۱- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
۲- دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- smhaeri@sharif.edu

۲- behnam.sadollahzadeh@sharif.edu

۳- saman.soleymani@sharif.edu

چکیده:

هدف این پژوهش، بررسی تأثیر تنش برشی اولیه بر رفتار هیدرومکانیکی خاک لس گرگان در مکش‌های متوسط تحت شرایط تراکم همسان و ناهمسان با استفاده از دستگاه سه‌محوری غیراشباع تمام اتوماتیک ارتقاءیافته در آزمایشگاه مکانیک خاک پیشرفته دانشگاه صنعتی شریف می‌باشد. در این پژوهش مجموعه‌ای از آزمایش‌های سه‌محوری بر روی نمونه‌های بازسازی‌شده از لس گرگان تحت مسیر " تنش خالص میانگین ثابت - مکش ساختاری کاهش" و در مکش‌های ساختاری متوسط شامل ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال 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 بدست‌آمده از آزمایش‌های ترشدگی نشان می‌دهد که با افزایش تنش برشی اولیه تحت تنش خالص میانگین ثابت، میزان کاهش حجم نمونه افزایش می‌یابد. نتایج آزمایش‌های مقاومت برشی نیز بیانگر آن است که برای نمونه‌هایی که در مرحله ترشدگی تحت مکش ساختاری و تنش خالص میانگین یکسان بوده‌اند، با افزایش تنش برشی اولیه مقدار مقاومت برشی کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی:

خاک لس، رفتار هیدرومکانیکی، تنش برشی اولیه، نمونه بازسازی شده، دستگاه سه‌محوری غیراشباع.

* سید محسن حائری، استاد، دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف.

ایمیل: smhaeri@sharif.edu (نویسنده مسئول مقاله)

Assessment of unsaturated behavior of Gorgan loessial soil under anisotropic triaxial compression in medium suctions range

S. M. Haeri^۱, B. Sadollahzadeh^۲, S. Soleymani Borujerdi^۲

۱- Professor, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

۲- Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

Abstract:

Collapsible soils, such as loess, are classified as problematic soils and are usually stable in unsaturated conditions in the nature. However, when they are exposed to a moisture increase especially under an applied load, they undergo a sudden decrease in volume or collapse. Various aspects of the behavior of unsaturated collapsible soils including volume change, soil-water retention, and shear strength have been extensively investigated so far. However, few studies have been carried out on the effect of initial shear stress on the hydromechanical behavior of unsaturated collapsible soils. The aim of this study is to investigate the effect of initial shear stress on the hydromechanical behavior of Gorgan loessial soil under isotropic and anisotropic triaxial consolidation in the medium suctions including ۳۰۰ and ۴۰۰ kPa using a fully automated unsaturated triaxial device. In this study, a set of stress-controlled triaxial tests were performed on reconstituted specimens of Gorgan loessial soil implementing “suction decrease under constant mean net stress” hydromechanical stress path. The tests were conducted in medium-range suctions under different initial shear stresses. Strain-controlled triaxial shear tests were also conducted at the end of anisotropic consolidation, to evaluate the shear behavior of the tested specimens. Results taken from the wetting stage indicate that the volume reduction of the specimens increases with an increase in initial shear stress under constant mean net stress. The results obtained from shear tests on specimens with constant matric suction and mean net stress in the wetting stage show that the greater the initial shear stress, the lower the shear strength of the specimen. Also, according to the independent stress variables approach, the shear resistance parameters including c' , ϕ' , and ϕ^b have been obtained ۴,۷ kPa, ۳۲,۹°, and ۱۳,۶, respectively. In addition, regression lines through the steady-state data points, used to define the CSL of the reconstituted specimens, had an M-value of ۱,۱۹.

Keywords: Loessial soil, Hydromechanical behavior, Initial shear stress, Reconstituted specimen, Unsaturated triaxial device.

۱- مقدمه و تاریخچه تحقیقات

خاک‌های فروریزی در گروه خاک‌های با ساختار باز و کم‌ثبات و با دانسیته نسبتاً کم شناخته می‌شوند. در بین خاک‌های فروریزی، نهشته‌های لسی جزء شناخته‌شده‌ترین نوع هستند. ترازقی و همکاران^۱ لس را بعنوان 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 گرفته و ساختاری باز را تشکیل می‌دهند که در حالت خشک پایدار می‌باشند [۱]. از ویژگی‌های مهندسی خاک لس می‌توان به وجود حفرات بزرگ در ساختار، درصد رطوبت طبیعی پائین، دانسیته نسبتاً کم و چسبندگی ناچیز اشاره نمود. این خاک‌ها در شرایط طبیعی و در حالت غیراشباع، بواسطه داشتن پیوندهای قوی بین‌دانه‌ای، دارای مقاومت برشی نسبتاً بالایی هستند اما طی ترشدن این باندها سست‌تر شده و تحت بارگذاری خارجی ساختارشان دچار فروریزش می‌شود. این پیوندها می‌تواند ناشی از وجود مکش ساختاری بالا، پیوندهای بین‌دانه‌ای رسی، باندهای کلسیتی و نمکی و حتی پیوندهای شیمیایی باشد [۲]. محققین وجود چهار شرط اساسی را لازمه رخداد پدیده فروریزش در خاک‌ها معرفی کرده‌اند [۳]. این چهار شرط عبارتند از: ۱- وجود ساختاری باز و تا حدودی ناپایدار، ۲- وجود حداقل تنش قائم جهت ایجاد ناپایداری در خاک، ۳- وجود مکش ساختاری کافی، پیوندها و عوامل سیمانی‌کننده دیگر برای پایداری خاک در حالت غیراشباع، ۴- افزایش رطوبت خاک و به تبع آن سست شدن پیوندهای بین‌دانه‌ای که منجر به کاهش حجم ناگهانی و فروریزش خاک شود.

بررسی رفتار خاک‌های فروریزی بخصوص لس از اواخر دهه ۱۹۶۰ میلادی تاکنون مورد توجه محققین بسیاری بوده است. با توسعه مکانیک خاک‌های غیراشباع، اکثر این مطالعات مربوط به بررسی آزمایشگاهی رفتار خاک‌های فروریزی تحت شرایط K_0 با استفاده از دستگاه تحکیم یک بعدی غیراشباع و همچنین شرایط تراکم همسان با استفاده از دستگاه سه‌محوری غیراشباع بوده است

[۱۴-۴]. با این وجود، تاکنون در مطالعات اندکی به تأثیر تنش برشی اولیه (شرایط تنشی ناهمسان) بر رفتار هیدرومکانیکی خاک‌های فروریزی با استفاده از دستگاه سه‌محوری غیراشباع پرداخته شده است.

از مدت‌ها قبل، محققین مختلفی به پیش‌بینی و مدل‌سازی اثر ناهمسانی بر رفتار خاک‌ها پرداخته‌اند. اولین بار کاساگرانده و کارلیو^۲ در سال ۱۹۴۴ ناهمسانی در خاک را از منظر تاریخچه شکل‌گیری خاک به دو نوع ناهمسانی ذاتی^۳ و ناهمسانی القایی^۴ تقسیم نمودند. آنها بیان کردند که ناهمسانی ذاتی در طی فرآیند رسوب‌گذاری ذرات و ناهمسانی القایی بدلیل تنش‌ها و کرنش‌های اعمال‌شده به خاک پس از مرحله شکل‌گیری ایجاد می‌شود [۱۵]. سوای و دلوز^۵ در سال ۱۹۹۶ از نخستین محققانی بودند که به بررسی آزمایشگاهی رفتار مکانیکی نمونه‌های غیراشباع با بافت ناهمسان پرداختند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که برای خاک‌های غیراشباع با بافت ناهمسان، سطح تسلیم در شرایط مکش ثابت در صفحه $q - p_n$ به صورت یک بیضی مایل می‌باشد [۱۶]. همچنین دیلاوچیا و رومرو^۶ در سال ۲۰۱۳ به شواهدی از مایل بودن سطح تسلیم خاک در صفحه $q - p'$ دست یافتند [۱۷]. سیاواکومار^۷ و همکاران در سال ۲۰۱۰ به بررسی تأثیر ناهمسانی القایی ناشی از تراکم استاتیکی بر رفتار خاک کاتولین غیراشباع پرداختند و به این نتیجه رسیدند که ناهمسانی اولیه نمونه بر موقعیت و شیب خط تراکم نرمال، شکل و سایز سطح تسلیم و نیز موقعیت خط حالت بحرانی تأثیر می‌گذارد [۱۸]. ژان و همکاران^۸ در سال ۲۰۱۴ یک پژوهش آزمایشگاهی را برای بررسی رفتار یک خاک متورم‌شونده غیراشباع در مسیر ترشدگی تحت شرایط تنش ناهمسان انجام دادند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که برای نمونه‌های بازسازی‌شده و دست‌نخورده، یک مکش ساختاری آستانه وجود دارد که در مقادیر کمتر از آن، با کاهش مکش ساختاری، کرنش محوری نمونه به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که این مکش ساختاری آستانه متناظر با شروع تسلیم نمونه می‌باشد. همچنین مشاهده شد که با

^۵ Cui and Delage

^۶ Della Vecchia and Romero

^۷ Sivakumar

^۸ Zhan et al.

^۱ Terzaghi et al.

^۲ Casagrande and Carillo

^۳ Inherent anisotropy

^۴ Induced anisotropy

مکش ساختاری ثابت تحت برش سه‌محوری و به صورت کنترل کرنش قرار گرفته‌اند.

۲- مشخصات فیزیکی خاک مورد مطالعه و روش آماده‌سازی نمونه‌ها

خاک مورد مطالعه در این پژوهش لس گرگان می‌باشد. این خاک از تپه‌های هزارپیچ واقع در شهر گرگان اخذ شده است. لس گرگان در ناحیه شمال شرق ایران و بخشی از کمربند لس اوراسیایی است که از شمال غرب اروپا کشیده شده و تا آسیای مرکزی و چین ادامه دارد. این لس‌ها منشأ بادرستی^۲ داشته و سطح وسیعی را به شکل تپه‌هایی از جنس لای در این منطقه تشکیل داده‌اند [۲۵]. مطابق تحقیقات پیشین انجام‌شده، این خاک در گروه خاک‌های با قابلیت فروریزش شدید قرار دارد [۲۶،۲۷]. شکل (۱-الف) پوش منحنی دانه‌بندی لس مورد مطالعه مطابق استاندارد ۶۳-ASTM D ۴۲۲ نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود این خاک 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 داده است. مطابق استاندارد ۸۷-ASTM D ۴۳۱۸ حد روانی (LL)، حد خمیری (PL) و نشان خمیری (PI) این خاک به ترتیب ۳۲/۲٪، ۷/۱ و ۲۵٪ بدست آمده است. بدین ترتیب خاک لس گرگان بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد (ASTM D ۲۴۸۸) از نوع "ML" و به عبارتی "خاک لای با خاصیت خمیری کم" می‌باشد. طبق استاندارد ۹۲-۸۵۴-ASTM چگالی ویژه دانه‌های جامد (G_s) این خاک برابر با ۲/۷۲ بدست آمده است [۲۸،۲۹]. به منظور تعیین منحنی نگهداشت آب - خاک، آزمایش کاغذ صافی تماسی روی نمونه‌های بازسازی شده از این خاک مطابق ۰۳-۵۲۹۸-ASTM انجام شد و مطابق شکل (۱-ب) از مدل تحلیلی سه پارامتری ونگنوختن^۴ برای برازش بر داده‌های آزمایشگاهی استفاده شده است [۳۰]. به منظور تهیه نمونه‌ها، خاک عبور داده شده از الک شماره ۱۰۰ به مدت ۲۴ ساعت درون گرمخانه کاملاً خشک شده است. در مرحله بعدی مقدار مشخصی از خاک

افزایش نسبت تنش برشی، مقدار مکش تسلیم افزایش پیدا می‌کند [۱۹]. ژو و همکاران^۱ در سال ۲۰۱۴ مکانیزم گسیختگی یک شیب خاکی لسی در اثر ترشدگی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که رفتار نگهداشت آب - خاک لس وابسته به نسبت تنش برشی و سطح تنش همه جانبه می‌باشد [۲۰]. بوان فیل و همکاران^۲ در سال ۲۰۱۶ با انجام آزمایش‌های سه‌محوری غیراشباع تحت مسیرهای تنش مختلف به بررسی تأثیر ناهمسانی اولیه ناشی از تراکم استاتیکی بر رفتار نمونه‌های خاک لای رس‌دار غیر اشباع پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که در آزمایش‌های تراکم همسان تحت مکش ثابت، کرنش‌های برشی قابل توجهی در نمونه‌ها ایجاد شده که ناشی از ناهمسانی اولیه القاء شده در اثر تراکم استاتیکی نمونه می‌باشد [۲۱]. نتایج پژوهش‌های اخیر انجام‌شده در مورد بررسی تأثیر ناهمسانی بر رفتار نمونه‌هایی از خاک‌های متورم‌شونده غیراشباع [۲۲] و خاک‌های فروریزی غیراشباع [۲۳،۲۴] نشان می‌دهد که رفتار تغییرشکل نمونه‌ها تحت شرایط تنش ناهمسان به صورت ترکیبی از کرنش‌های حجمی و برشی می‌باشد. در نهایت، به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که رفتار هیدرومکانیکی خاک‌های غیراشباع متأثر از مسیر تنش، سطح تنش همه جانبه، نسبت تنش برشی و مکش ساختاری می‌باشد.

اگرچه با گذشت زمان گستره 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 به ندرت مورد بررسی قرار گرفته است. از اینرو در پژوهش حاضر با تمرکز بر بررسی اثر تنش برشی اولیه بر رفتار هیدرومکانیکی نمونه‌های بازسازی‌شده 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

^۱ Aeolian

^۲ van Genuchten

^۱ Zhou et al.

^۲ Buenfil et al.

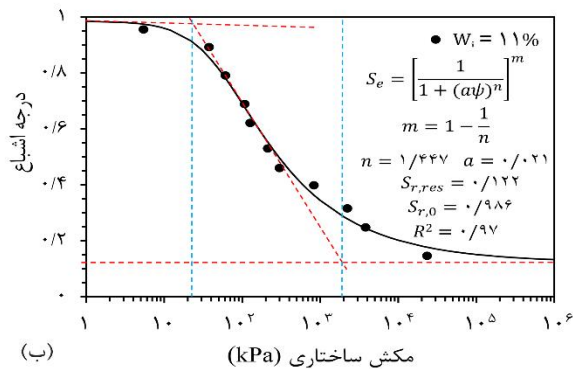
خشک شده توزین و بر اساس درصد رطوبت اولیه مورد نظر (۰.۱۱) با مقدار مشخصی آب مقطر کاملاً مخلوط و به مدت ۲۴ ساعت درون کیسه‌های پلاستیکی هواپست قرار داده شده تا توزیع رطوبت در سرتاسر خاک یکنواخت شود. در این پژوهش از نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۳/۸ سانتی‌متر، ارتفاع ۷/۶ سانتی‌متر و با وزن مخصوص خشک ۱۵/۱ کیلونیوتن 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 اولیه نمونه‌های مورد آزمایش در جدول (۱) ارائه شده است. به منظور ساخت نمونه‌های همگن با چگالی خشک نسبتاً یکسان در ارتفاع نمونه، از روش تراکم کاهش‌یافته^۱ پیشنهادی توسط لد^۲ برای ساخت نمونه‌ها استفاده شده است [۳۱]. در این روش، 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 این پژوهش، نمونه‌های

بازسازی شده در سه لایه متراکم شده‌اند و با توجه به توصیه لد بر ایجاد نمونه‌های شل با پتانسیل فروریزش بالاتر، مقدار پارامتر درصد کاهش تراکم (U_n) در لایه اول برابر با ۱۵ درصد در نظر گرفته شده است. همچنین منحنی تراکم خاک مورد آزمایش مطابق پراکتور استاندارد در شکل (۱-پ) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود شرایط اولیه نمونه‌ها در ناحیه خشک منحنی تراکم قرار گرفته است. نتایج پژوهش‌های انجام شده توسط محققین دیگر [۴،۵،۶،۹] بر روی نمونه‌های بازسازی شده نیز نشان می‌دهد که نمونه‌های متراکم‌شده در بخش خشک منحنی تراکم، ساختاری فروریزی دارند. شکل (۱-ت) نیز تصویر گرفته‌شده توسط میکروسکوپ الکترونی^۳ از نمونه‌های بازسازی شده قبل از شروع آزمایش را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود نمونه‌های بازسازی شده خاک لس گرگان ساختاری متخلخل و متشکل از حفرات ریز و حفرات درشت دارند که باعث بروز رفتار فروریزی در مسیر ترشدگی تحت بارگذاری اعمالی می‌شود.

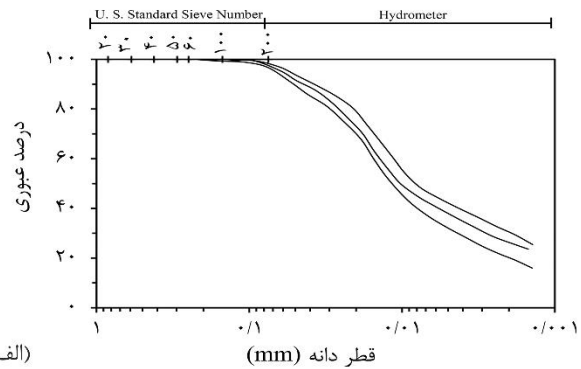
^۳ Scanning Electron Microscope (SEM)

^۱ Under-compaction

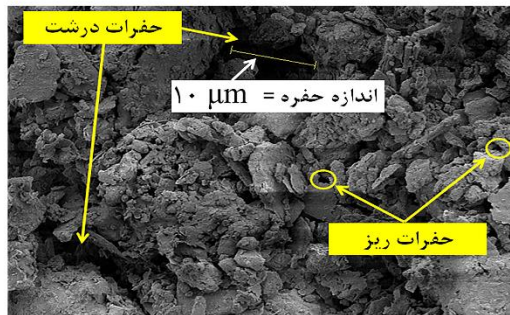
^۲ Ladd



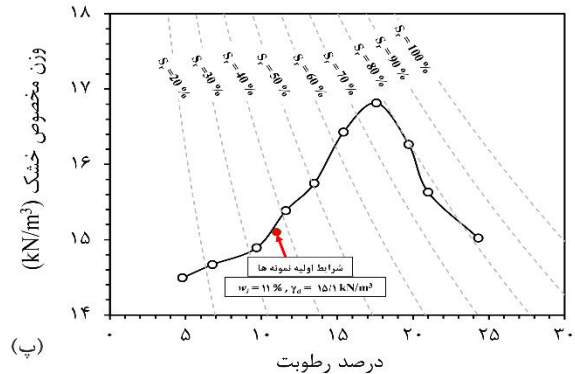
(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

شکل ۱: (الف) پوش منحنی دانه‌بندی لس گرگان، (ب) منحنی نگهداشت آب - خاک نمونه‌های بازسازی‌شده لس گرگان، (پ) منحنی تراکم استاندارد لس گرگان، (ت) تصویر گرفته‌شده از نمونه بازسازی‌شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگنمایی ۳۵۰۰ برابر [۲۸]

جدول ۱: خصوصیات فیزیکی نمونه‌ها [۲۸]

مقدار	مشخصه 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 دانه‌های جامد (G_s)
۱۵/۱	وزن مخصوص خشک (کیلو نیوتن بر متر مربع)
۰/۸	نسبت تخلخل اولیه
۱۱	درصد رطوبت اولیه (%)

۳- دستگاه و تجهیزات آزمایش

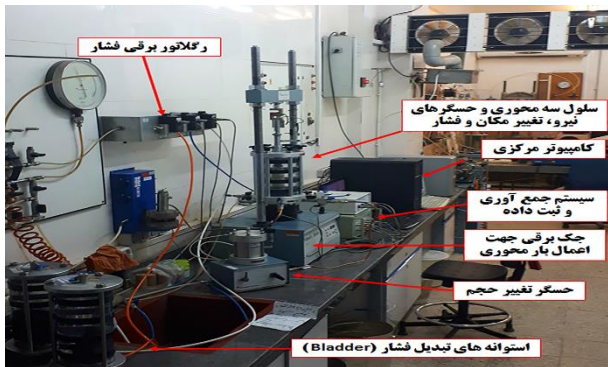
قابلیت بارگذاری به صورت کنترل کرنش و کنترل تنش استفاده شده است. این دستگاه دارای سه تنظیم‌کننده برقی فشار است که از یک کمپرسور با ظرفیت اسمی ۱۵ بار تغذیه می‌شود. تنظیم‌کننده‌ها به همراه دو سامانه تبدیل فشار هوا به آب وظیفه تأمین فشار هم‌جانبه، فشار هوای حفره‌ای و فشار آب حفره‌ای را دارند. همچنین جهت اعمال تنش برشی اولیه از یک جک برقی استفاده شده است. مقادیر تغییر حجم نمونه، تغییر حجم آب حفره‌ای، تغییر شکل قائم و نیروی محوری در طول آزمایش توسط دو دستگاه اندازه‌گیری تغییر حجم اتوماتیک، یک حسگر نیرو و یک حسگر تغییر مکان سنج اندازه‌گیری می‌شوند. کلیه تنظیم‌کننده‌ها برقی، جک برقی و حسگرهای دستگاه به یک واحد قرائت، 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 داده‌های خروجی به صورت تمام اتوماتیک فراهم شده است. در این دستگاه به منظور کنترل مکش ساختاری از روش انتقال

به منظور انجام آزمایش‌های سه‌محوری غیراشباع تحت شرایط تنش همسان و ناهمسان از یک دستگاه سه‌محوری ارتقاءیافته در دانشگاه صنعتی شریف با قابلیت کنترل مکش ساختاری و همچنین

تنش بوده و از نظر ریاضی قابل تبدیل و تعریف نسبت به یگدیگر هستند. این متغیرها مطابق روابط زیر تعریف شده‌اند:

$$k = \frac{\sigma_3}{\sigma_1} \quad (4)$$

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



شکل ۲: نمایی از دستگاه سه محوری غیراشباع ارتقاء یافته [۲۸،۲۹]

۵- برنامه آزمایش‌ها و روند انجام آنها

به منظور بررسی رفتار هیدرومکانیکی نمونه‌های بازسازی شده از خاک لس گرگان، مجموعه‌ای از آزمایش‌های سه محوری غیراشباع تحت مسیر "تنش خالص میانگین ثابت - مکش ساختاری کاهشی"

نرخ جابجایی محوری (μm/min)	η	p _n (kPa)	q (kPa)	ψ _f (kPa)	ψ _i (kPa)	W _i (%)	گروه و شماره آزمایش
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱
۵	۱	۱۰۰	۱۰۰	۴۰۰	۷۵۰	۱۱	۲
	۲		۲۰۰				۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴
۵	۱	۱۰۰	۱۰۰	۳۰۰	۷۵۰	۱۱	۵
	۲		۲۰۰				۶

مطابق جدول (۲) در گروه اول آزمایش‌ها، نمونه‌هایی با وزن مخصوص خشک اولیه ۱۵/۱ کیلونیوتن بر مترمکعب و رطوبت اولیه ۱۱٪ (متناظر درجه اشباع ۳۷/۴٪ و مکش ساختاری ۷۵۰ کیلوپاسکال)، تحت تنش خالص میانگین ۱۰۰ کیلوپاسکال با نسبت‌های تنش برشی η = ۰، η = ۱ و η = ۲ با طی کردن مسیر

محور^۱ استفاده می‌شود [۳۲]. برای این منظور از یک دیسک سرامیکی متخلخل (HAE^۲) با فشار ورودی هوای ۵ بار استفاده شده است. در شکل (۲) نمایی کامل از دستگاه سه محوری غیراشباع تمام اتوماتیک آزمایشگاه مکانیک خاک پیشرفته دانشگاه صنعتی شریف نشان داده شده است [۲۸،۲۹].

۴- معرفی متغیرهای تنش و نسبت تنش

در این پژوهش متغیرهای اصلی تنش در خاک مطابق روابط زیر تعریف می‌شوند:

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

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

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

در روابط فوق، p_n تنش خالص میانگین، σ_۱، σ_۲، σ_۳ تنش‌های اصلی و u_w و u_a به ترتیب فشار هوا و آب حفره‌ای می‌باشد. متغیرهای ψ و q نیز به ترتیب معرف مکش ساختاری و تنش تفاضلی هستند.

در این پژوهش، 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 بیان کننده نسبت

در محدوده مکش‌های متوسط و تحت تنش‌های برشی اولیه متفاوت و به صورت کنترل تنش انجام شده است. در انتهای هر آزمایش نیز جهت بررسی رفتار برشی، آزمایش برش سه محوری کنترل کرنش با نرخ جابجایی محوری ۵ میکرومتر بر ثانیه انجام شده است. این نرخ جابجایی بر اساس مطالعات قبلی انجام شده بر روی خاک لس گرگان [۸، ۹] و به منظور اطمینان از ایجاد شرایط زهکشی شده کامل و ثابت ماندن مکش ساختاری در طول مرحله برش انتخاب شده است. برنامه آزمایش‌های انجام شده در جدول (۲) ارائه شده است. در این جدول برای مرحله ترشدگی مقادیر رطوبت اولیه 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) نشان داده شده است.

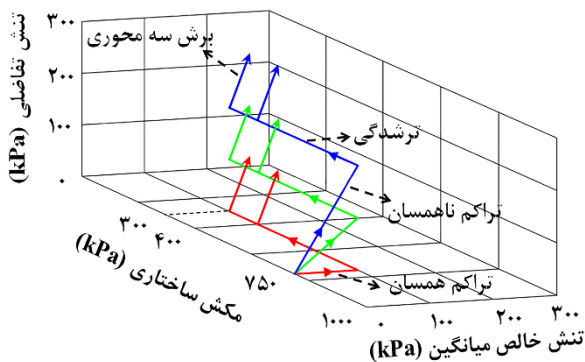
جدول ۲: مشخصات و برنامه آزمایش‌های ترشدگی و برش

مرحله ترشدگی	مرحله برش
--------------	-----------

^۲ High Air Entry

^۱ Axis Translation

(محدوده مکش‌های متوسط به بالا) به گسیختگی نرسد تا بتوان اثر تنش برشی اولیه را بر رفتار نمونه‌ها در هر دو مسیر (۱) ترشدگی و (۲) برش سه‌محوری تا رسیدن به حالت بحرانی بررسی نمود.



شکل ۳: مسیر تنش‌های اعمالی در فضای $q-p_n-\psi$

۶- نتایج آزمایش‌ها

در این بخش نتایج بدست‌آمده از آزمایش‌های سه‌محوری غیراشباع با تمرکز بر ارزیابی اثر نسبت‌های تنش برشی (تنش‌های برشی اولیه) و همچنین اثر مکش ساختاری بر رفتار هیدرومکانیکی نمونه‌های بازسازی‌شده از خاک لس گرگان ارائه می‌شود.

حجم آب حفره‌ای بر حسب زمان به ترتیب در شکل (۴-پ) و شکل (۴-ت) ارائه شده است. در این منحنی‌ها به طور قرارداد، کاهش حجم نمونه و مقدار آب جذب‌شده با علامت مثبت در نظر گرفته شده است. همچنین لازم به ذکر است که به علت تشابه نتایج بدست‌آمده از آزمایش‌های ترشدگی گروه اول با نتایج بدست‌آمده از آزمایش‌های ترشدگی گروه دوم تحت مکش ساختاری هدف ۴۰۰ کیلوپاسکال (تأییدی بر تکرار پذیری آزمایش‌های انجام شده) فقط نتایج آزمایش‌ها ترشدگی گروه دوم ارائه شده است. نتایج بدست‌آمده نشان می‌دهد که زمان تعادل برای نمونه‌های بازسازی‌شده در مسیر ترشدگی و برای رسیدن از مکش ساختاری اولیه ۷۵۰ کیلوپاسکال به مکش ساختاری هدف ۴۰۰ کیلوپاسکال حدوداً ۸ روز و برای رسیدن از مکش ساختاری ۴۰۰ کیلوپاسکال به ۳۰۰ کیلوپاسکال حدوداً ۷ روز بوده است.

ترشدگی از مکش ساختاری اولیه ۷۵۰ کیلوپاسکال در مکش ساختاری هدف ۴۰۰ کیلوپاسکال به تعادل می‌رسند. در گروه دوم، نمونه‌ها با شرایط اولیه مشابه با گروه اول و تحت تنش‌های اعمالی مشابه با طی کردن مسیر ترشدگی از مکش ساختاری اولیه ۷۵۰ کیلوپاسکال، در مکش‌های ساختاری هدف ۴۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال به تعادل می‌رسند. مسیر تنش آزمایش‌های انجام شده در فضای سه بعدی $q-p_n-\psi$ در شکل (۳) نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، در گام اول با اعمال تراکم همسان و یا ناهمسان تحت مکش ساختاری اولیه (۷۵۰ کیلوپاسکال)، نمونه تحت مقادیر مورد نظر تنش خالص میانگین و تنش برشی اولیه قرار می‌گیرد. سپس تحت مقادیر ثابت تنش خالص میانگین و تنش برشی اولیه، نمونه تا مکش ساختاری مورد نظر (۳۰۰ یا ۴۰۰ کیلوپاسکال) در معرض ترشدگی قرار می‌گیرد. پس از اتمام مرحله ترشدگی، تمامی نمونه‌ها تحت مکش ساختاری ثابت و به صورت کنترل کرنش با نرخ جابجایی قائم ثابت ۵ میکرومتر بر دقیقه و تا کرنش محوری ۲۰ الی ۲۵ درصد تحت برش قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است که با توجه به نتایج تحقیقات قبلی صورت گرفته بر روی رفتار برشی خاک لس گرگان [۹]، این محدوده از نسبت‌های تنش برشی به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که نمونه در مراحل ابتدایی مرحله ترشدگی

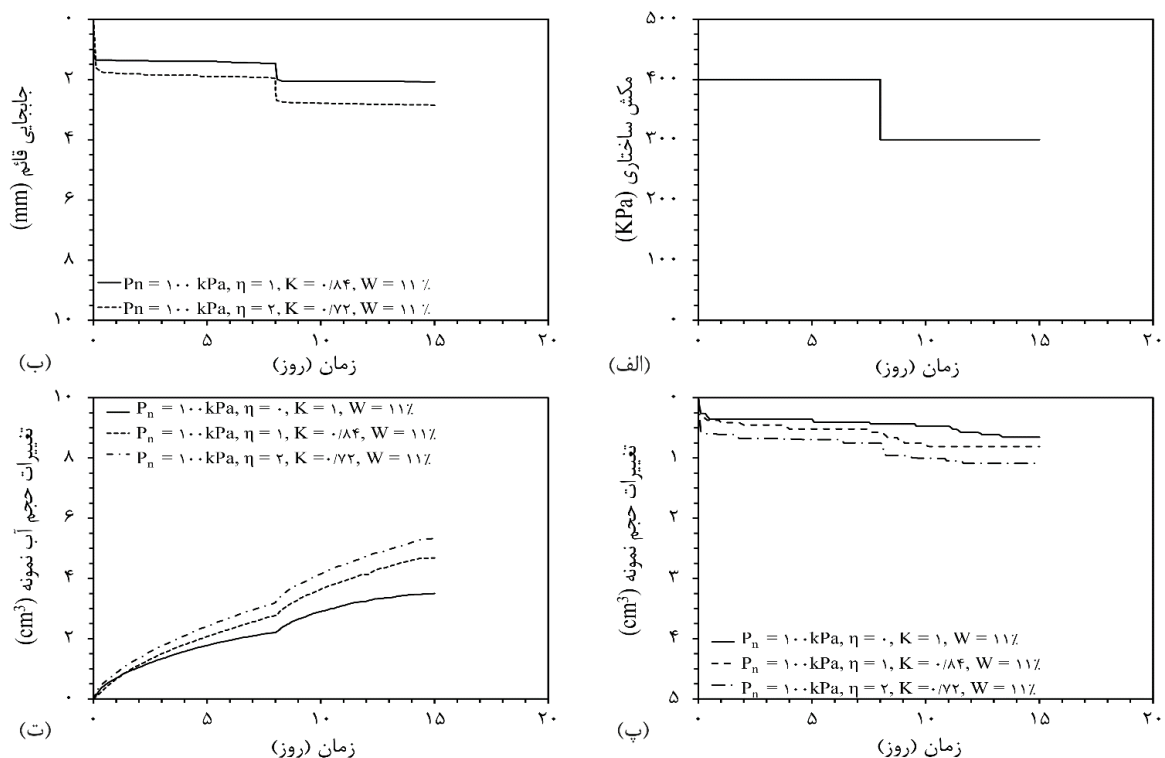
۶-۱- اثر نسبت تنش و مکش ساختاری بر رفتار تراکمی

برای ارزیابی اثر تنش برشی اولیه بر رفتار ترشدگی نمونه‌های بازسازی‌شده خاک لس گرگان، آزمایش‌های ذکر شده در جدول (۲) صورت پذیرفته است. در این آزمایش‌ها نرخ تغییرات حجم نمونه و تغییرات حجم آب حفره‌ای به ترتیب کمتر از ۰/۱ و ۰/۱۴ سانتی‌متر مکعب در روز به عنوان معیار رسیدن به تعادل هیدرومکانیکی در مکش ساختاری اعمال شده در نظر گرفته شد [۷]. لازم به ذکر است که با توجه به در نظر گرفتن یک معیار تعادل هیدرومکانیکی یکسان برای تمام آزمایش‌ها در همه گام‌های ترشدگی، خطاهای اندازه‌گیری تغییر حجم ناشی از عوامل مختلفی مانند تغییر حجم خزشی سلول سه‌محوری و تبخیر آب حفره‌ای برای تمام آزمایش‌ها به طور یکسان در نظر گرفته شده است، بنابراین زمان بر تحلیل نتایج آزمایش‌ها تأثیری نداشته است. منحنی‌های تغییرات حجم نمونه و تغییرات

در منحنی‌های مربوط به تغییرات حجم و همچنین جابجایی قائم نمونه‌ها (شکل‌های ۴-ب و ۴-پ) مشاهده می‌شود که تحت شرایط مکش ساختاری و تنش خالص میانگین ثابت، با افزایش نسبت‌های تنش برشی از صفر تا ۲، به دلیل افزایش تنش برشی اولیه، نمونه‌ها کاهش حجم بیشتری از خود نشان داده‌اند. همچنین در این منحنی‌ها پرش‌هایی دیده می‌شود که بیانگر فروریزش‌های ایجاد شده در ساختار خاک لس می‌باشد. با توجه به جدول (۱)، خاک لس گرگان به طور متوسط دارای ۲۵ درصد رس می‌باشد. تمایل بالای ذرات رس به جذب آب و نیز کاهش تدریجی تنش موثر اعمالی به نمونه در طی فرآیند ترشدگی موجب بروز اندکی تورم در نمونه‌ها می‌شود. از طرف دیگر در اثر افزایش درجه اشباع نمونه (کاهش مکش ساختاری) پیوندهای بین‌دانه‌ای سست شده و تحت تنش خالص میانگین اعمال شده به نمونه، کاهش حجم یا فروریزش در ساختار خاک رخ می‌دهد. در محدوده مکش‌های متوسط، نرخ وقوع فروریزش در ساختار خاک بیشتر از نرخ تورم ایجاد شده ناشی از کاهش تنش موثر و رفتار تورمی ذرات رس می‌باشد، بنابراین در منحنی‌های تغییر حجم رفتار فروریزشی مشاهده می‌گردد. لازم به ذکر است از آنجائیکه که نمونه‌های بازسازی‌شده با درصد رطوبت اولیه ۱۱٪ و در بخش خشک منحنی پراکتور متراکم شده‌اند لذا دارای ساختاری متخلخل و متشکل از حفرات ریز و درشت می‌باشد (شکل ۱-ت). بدین ترتیب، در اثر اعمال تنش‌های خارجی ابتدا حفرات درشت متراکم می‌شوند و با افزایش سطح تنش نوبت به حفرات ریزتر می‌رسد.

در منحنی‌های مربوط به تغییر حجم آب حفره‌ای در طی فرآیند ترشدگی (شکل ۴-ت) مشاهده می‌شود که در کلیه آزمایش‌ها به دلیل کاهش مکش ساختاری ناشی از فرآیند ترشدگی، نمونه شروع

به جذب آب نموده و حجم آب حفره‌ای افزایش پیدا کرده است. همچنین نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش تنش برشی اولیه (افزایش η) تحت تنش خالص میانگین ثابت، مقادیر آب جذب شده توسط نمونه افزایش یافته است. به نظر می‌رسد که این رفتار به دلیل آن است که در محدوده مکش‌های ساختاری متوسط که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است، اکثر حفرات درشت موجود در ساختار خاک دچار ترشدگی نشده و جذب آب غالباً توسط حفرات ریز خاک صورت گرفته است. با شروع فرآیند ترشدگی و جذب آب توسط نمونه، تورم ذرات رس از یک سو و اعمال تنش برشی اولیه از سوی دیگر موجب می‌شود که اندازه بخشی از حفرات موجود در ساختار اولیه خاک (حالتیکه مکش متناظر ترشدگی آنها اندکی کمتر از مکش اعمالی به نمونه می‌باشد) به اندازه‌ای کاهش یابد که مکش متناظر ترشدگی این حفرات از مکش اعمالی به نمونه فراتر رود. این امر به همراه تمایل بالای جذب آب ذرات رس موجب افزایش تمایل نمونه به جذب آب می‌گردد. با این حال در محدوده مکش‌های متوسط و تحت تنش خالص میانگین در نظر گرفته‌شده در این پژوهش، نیروهای بین‌دانه‌ای به طور کامل از بین نرفته و میزان کاهش حجم حفرات خاک و به دنبال آن کاهش ظرفیت جذب آب هنوز به اندازه‌ای نرسیده 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 بخشی از حفرات در اثر رفتار تورمی ذرات رس و اعمال تنش برشی اولیه) را تحت تاثیر قرار دهد. بنابراین با افزایش تنش برشی اولیه میزان جذب آب نمونه افزایش پیدا کرده است.



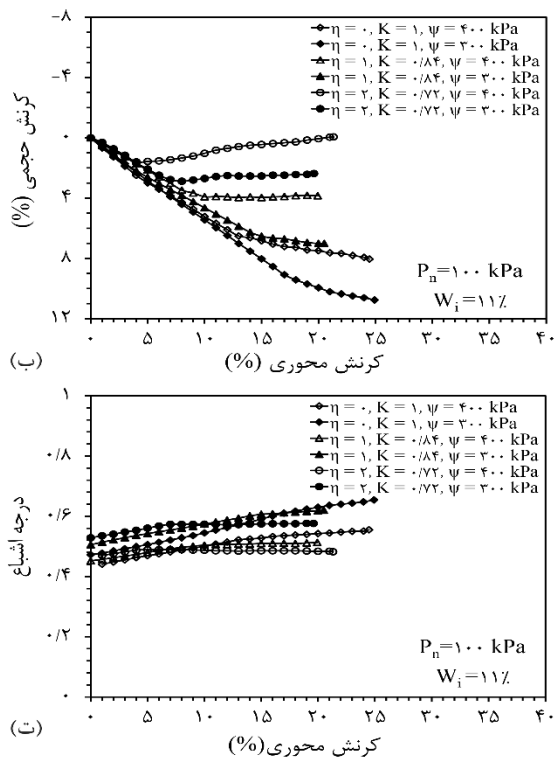
شکل ۴: نتایج آزمایش‌های ترشدگی؛ (الف) تغییرات مکش اعمالی بر حسب زمان، (ب) تغییر شکل قائم نمونه بر حسب زمان، (پ) تغییرات حجم نمونه بر حسب زمان، (ت) تغییرات حجم آب نمونه بر حسب زمان

۲-۶- اثر نسبت تنش و مکش ساختاری بر رفتار برشی

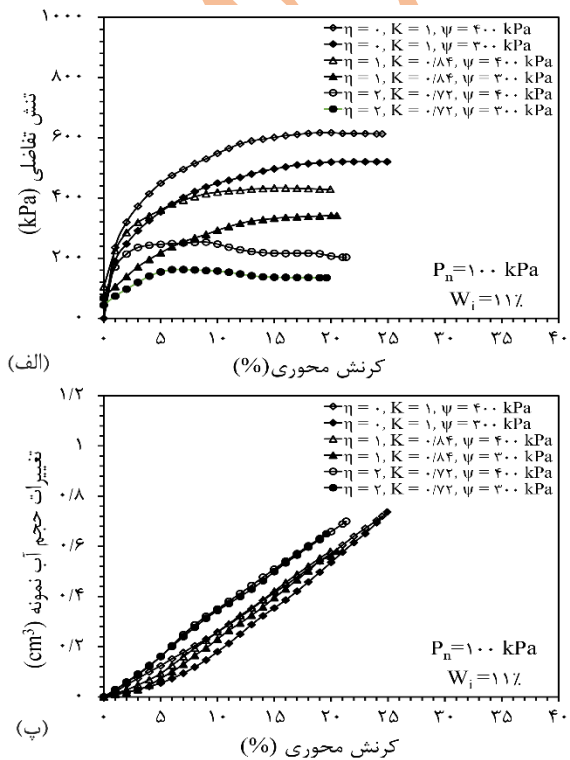
برشی اولیه (یا نسبت تنش) مشابه بوده‌اند، مقدار تنش تفاضلی قابل تحمل توسط نمونه در مرحله برش با افزایش مکش ساختاری، افزایش یافته است. علت این امر آن است که نمونه‌های با مکش ساختاری بیشتر، پیوندهای بین ذرات قوی تر و در نتیجه ساختار مستحکم تری داشته و مقاومت بیشتری را از خود نشان داده‌اند. همچنین تحت شرایط مکش ساختاری یکسان، با افزایش نسبت‌های تنش برشی و یا عبارتی افزایش تنش برشی اولیه در مرحله ترشدگی، مقدار تنش تفاضلی قابل تحمل توسط نمونه در مرحله 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 ترشدگی از دست داده و بنابراین تنش برشی کمتری را در مرحله برش تحمل می‌کند. تغییرات بیشینه تنش تفاضلی قابل تحمل توسط نمونه‌ها در مرحله برش بر حسب نسبت‌های تنش برشی در مرحله ماقبل برش و برای مقادیر مختلف مکش ساختاری در شکل (۶-الف) نشان داده شده است.

پس از اتمام مرحله ترشدگی، کلیه نمونه‌ها تحت شرایط مکش ساختاری ثابت و به صورت کنترل کرنش با نرخ جابجایی قائم ثابت ۵ میکرومتر بر دقیقه تحت برش سه‌محوری قرار گرفتند. نتایج حاصل آزمایش‌های برش سه‌محوری در شکل (۵) ارائه شده است. در این شکل متغیرهای P_n و W_i به ترتیب بیانگر رطوبت اولیه و تنش خالص میانگین نمونه‌ها در مرحله ماقبل برش (مرحله ترشدگی) می‌باشد. از آنجائیکه نمونه‌های مورد آزمایش در طول مسیر ترشدگی تحت مسیرهای تنش هیدرومکانیکی متفاوتی قرار گرفته‌اند (شکل ۳)، شرایط هیدرومکانیکی آنها (نسبت تخلخل، درجه اشباع، مکش ساختاری، تنش همه جانبه خالص و تنش برشی اولیه) در آغاز مرحله برش متفاوت می‌باشد (جدول ۲ و شکل ۳). از اینرو با توجه به تأثیر شرایط هیدرومکانیکی نمونه در شروع مرحله برش بر رفتار برشی، نمونه‌های مورد آزمایش رفتار برشی متفاوتی را نشان داده‌اند (شکل‌های ۵-الف و ۵-ب). همانطور که مشاهده می‌شود، در نمونه‌هایی که در مرحله ترشدگی تحت تنش خالص میانگین و تنش

رسی پیش تحکیم یافته و یا خاک‌های ماسه‌ای متراکم تحت تنش‌های همه‌جانبه کم می‌باشد. دلیل این رفتارها در نسبت تنش‌های مختلف شرایط تنش متفاوت نمونه‌ها در مرحله ترشدگی می‌باشد، به گونه‌ای که نمونه‌های با نسبت تنش برشی ۲ نسبت به سایر نمونه‌ها تحت کمترین تنش خالص همه‌جانبه قرار داشته است. اعمال تنش خالص همه‌جانبه پایین در کنار مکش ساختاری نسبتاً بالا، موجب تفاوت رفتار مقاومت برشی و تغییر حجم نمونه‌های تحت نسبت تنش برشی ۲ در مقایسه با سایر نمونه‌ها شده است. در شکل (۶-ب) تغییرات کرنش حجمی متناظر حالت بحرانی بر حسب نسبت‌های تنش برشی در مرحله ماقبل برش برای مقادیر مختلف مکش ساختاری ارائه شده است.



مطابق شکل (۵-الف)، در آزمایش‌هایی که نمونه‌ها در مرحله ترشدگی تحت نسبت تنش برشی صفر (شرایط تنش همسان) و یا نسبت تنش برشی ۱ (شرایط تنش ناهمسان) بوده‌اند، رفتار مقاومت برشی نمونه‌ها سخت‌شونده و مشابه رفتار خاک‌های رسی عادی تحکیم یافته و یا خاک‌های ماسه‌ای شل می‌باشد. تغییر حجم این نمونه‌ها در مرحله برش (شکل ۵-ب) نیز تاییدکننده چنین رفتاری می‌باشد. از طرفی در آزمایش‌هایی که نمونه‌ها در مرحله ترشدگی تحت نسبت تنش برشی ۲ قرار داشته‌اند، رفتار مقاومت برشی (شکل ۵-الف) مابین حالت‌های سخت‌شونده و نرم‌شونده بوده و این نمونه‌ها در شروع مرحله برش ابتدا دچار کاهش حجم و سپس دچار منبسط می‌شوند (شکل ۵-ب). این رفتار نیز مشابه رفتار خاک‌های

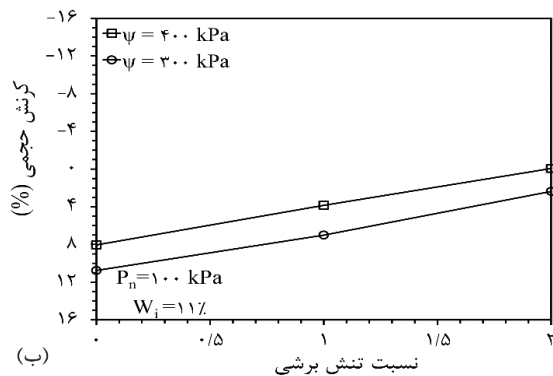


شکل ۵: نتایج آزمایش‌های برش سه‌محوری؛ (الف) تغییرات تنش تفاضلی بر حسب کرنش محوری، (ب) تغییرات کرنش حجمی بر حسب کرنش محوری، (پ) تغییرات حجم آب نمونه بر حسب کرنش محوری، (ت) تغییرات درجه اشباع بر حسب کرنش محوری

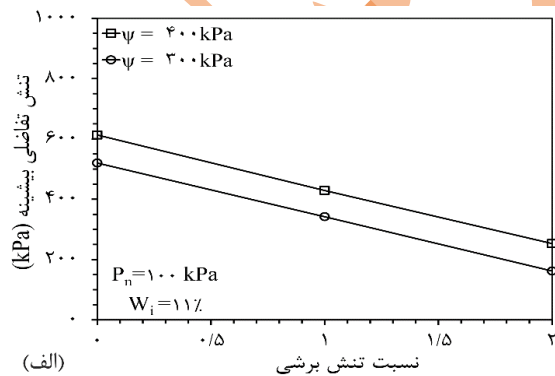
پ)، تمامی نمونه‌ها در طول مرحله برش جذب آب داشته‌اند. این رفتار بدین دلیل است که علیرغم اعمال مکش ساختاری ثابت و رفتار تراکمی نمونه حین برش، وقوع فروریزش در ساختار خاک از یک سو و تورم ذرات رس در اثر جذب آب از سوی دیگر باعث کاهش حجم

تغییرات درجه اشباع بر حسب کرنش محوری نمونه‌ها در مرحله برش در شکل (۵-ت) نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود روند تغییرات درجه اشباع به میزان تغییرات حجم نمونه و حجم آب حفره‌ای در طی برش وابسته می‌باشد. مطابق با شکل (۵-)

شکل (۵-ت) مشاهده می‌شود در آزمایش‌های شماره ۴، ۲، ۱ و ۵ رفتار تراکمی از یک سو و جذب آب توسط نمونه از سوی دیگر باعث افزایش تدریجی درجه اشباع در حین برش می‌شود. در آزمایش‌های شماره ۳ و ۶ نیز تا زمانیکه نمونه در طی برش رفتار تراکمی دارد، درجه اشباع خاک افزایش پیدا می‌کند اما با شروع رفتار اتساعی و با وجود تمایل نمونه به جذب آب، افزایش حجم نمونه به اندازه‌ای است که باعث ایجاد روند کاهشی درجه اشباع می‌گردد.



حفرات و در نتیجه افزایش مکش ساختاری داخلی خاک شده و این تفاوت ایجاد شده 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 می‌شود. در حالتیکه نمونه رفتار اتساعی از خود نشان می‌دهد، انبساط نمونه موجب کاهش فشار آب حفره ای و افزایش مکش ساختاری داخلی نمونه نسبت به مکش اعمالی شده و این امر در کنار تمایل بالای جذب آب بخش رسی، منجر به جذب آب توسط نمونه می‌شود، بنابراین همانگونه که در



شکل ۶: (الف) تغییرات تنش تفاضلی بیشینه در مرحله برش با نسبت تنش برشی (η) در مرحله ترشدگی، (ب) تغییرات کرنش حجمی متناظر حالت بحرانی با نسبت تنش برشی (η) در مرحله ترشدگی

چسبندگی ظاهری^۲ خاک می‌باشد که این مقدار با افزایش مکش ساختاری افزایش می‌یابد [۳۴]. در این بخش، پوش‌های گسیختگی متناظر با مکش‌های ساختاری ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال در صفحه τ - σ_n مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق شکل (۷)، ملاحظه می‌شود که در یک مکش ساختاری ثابت، با افزایش نسبت تنش برشی (افزایش تنش برشی اولیه) قطر دایره 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 محاسبه متغیرهای مقاومت برشی بدست‌آمده از آزمایش‌های سه‌محوری غیراشباع، معیار گسیختگی موهر-کلمب توسعه یافته را می‌توان بر حسب تنش‌های اصلی خالص به صورت زیر بازنویسی کرد:

۳-۶- متغیرهای مقاومت برشی با رویکرد متغیرهای مستقل تنش

فردلاند و مورگنسترن^۱ در سال ۱۹۷۸ با تعمیم پوش گسیختگی برشی موهر-کلمب، رابطه (۶) را برای محاسبه مقاومت برشی در خاک‌های غیر اشباع پیشنهاد کردند [۳۳]:

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

در رابطه فوق، c' چسبندگی در مکش ساختاری و تنش نرمال خالص صفر، ϕ' زاویه اصطکاک داخلی متناظر با تغییرات تنش نرمال خالص و ϕ^b زاویه اصطکاک داخلی متناظر با تغییرات مکش ساختاری می‌باشد. رابطه (۶) در فضای تنش سه بعدی $(\tau - \sigma_n - \psi)$ به شکل یک رویه می‌باشد که تصویر آن در صفحه $(\tau - \sigma_n)$ به صورت یکسری خطوط موازی با زاویه شیب ϕ' می‌باشد. عرض از مبدا این خطوط، یعنی مجموع عبارات اول و دوم سمت راست رابطه (۶)، بیانگر

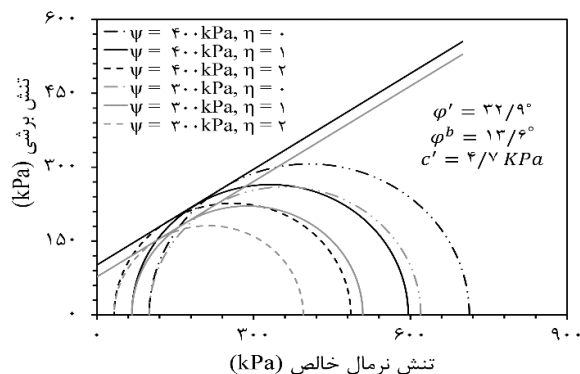
^۲ Apparent Cohesion

^۱ Fredlund and Morgenstern

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

که در آن، c'_1 چسبندگی ظاهری خاک بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

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



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

با استفاده از نتایج بدست‌آمده از آزمایش‌های برش سه‌محوری غیراشباع انجام شده در مکش‌های ساختاری ۴۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال و جایگذاری نتایج بدست آمده در رابطه (۷)، مقادیر متغیرهای مقاومت برشی c' ، ϕ' و ϕ^b برای نمونه‌های بازسازی شده خاک فروریزی لس گرگان با رطوبت اولیه ۱۱٪ به ترتیب برابر با ۴/۷ کیلوپاسکال، ۳۲/۹ درجه و ۱۳/۶ درجه بدست آمده است. همچنین با استفاده از رابطه (۸)، مقادیر چسبندگی ظاهری (c'_1) در مکش‌های ساختاری ۴۰۰ کیلوپاسکال و ۳۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب برابر با ۷۷/۱ و ۱۰۱/۲ کیلوپاسکال بدست آمده که این امر نشان دهنده افزایش چسبندگی ظاهری با افزایش مکش ساختاری می‌باشد.

۴-۶- تئوری حالت بحرانی و رویکرد تنش موثر

در تحقیقات اولیه بر روی رفتار خاک‌های غیراشباع، محققان مختلفی تلاش کردند تا با ارائه مدل‌های رفتاری مختلف بر پایه تئوری تنش موثر بیشاپ^۱، رفتار این خاک‌ها را توصیف کنند. با این حال تعدادی از محققان مانند جنینگز و برلند^۲ در سال ۱۹۶۲ [۳۵] بیان کردند که رابطه تنش موثر به تنهایی نمی‌تواند رفتار خاک‌های فروریزی غیراشباع را توجیه کند. آنها به این نکته اشاره کردند که

بر طبق نظریه تنش موثر، با افزایش درجه اشباع خاک، مقدار تنش موثر کاهش یافته و انتظار می‌رود که خاک رفتار تورمی نشان دهد اما در مورد خاک‌های فرو ریزی دقیقاً عکس این مطلب اتفاق می‌افتد. در این خصوص لازم به ذکر است که استدلال این محققین در حوزه تغییر شکل‌های الاستیک اعتبار دارد درحالیکه پدیده فروریزش یک تغییر شکل پلاستیک می‌باشد که به دلیل کاهش نیروهای نگهدارنده بین دانه‌های رخ می‌دهد. از اینرو برای مرتبط کردن پارامترهای تنش و کرنش جهت توصیف پدیده فروریزش باید روابط رفتاری مناسبی مورد استفاده قرار داد و در این رابطه نمی‌توان از اصول مکانیک خاک کلاسیک پیروی کرد. در این راستا تعدادی از محققان مانند قاسم زاده و امیری در سال ۲۰۱۳ و قاسم زاده و همکاران در سال ۲۰۱۷ نشان دادند که با استفاده از یک چارچوب الاستوپلاستیک مناسب می‌توان رفتار پیچیده خاک‌های غیراشباع مانند پدیده فروریزش ناشی از ترشدهگی را توصیف کرد [۳۶،۳۷]. بیشاپ در سال ۱۹۵۹ با توسعه معادله تنش موثر کلاسیک ترازقی به حالت غیراشباع، رابطه زیر را برای بیان تنش موثر پیشنهاد کرد [۳۸]:

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

در این رابطه، p' تنش موثر میانگین، p تنش کل میانگین و χ پارامتر تنش موثر می‌باشد. رابطه (۷) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

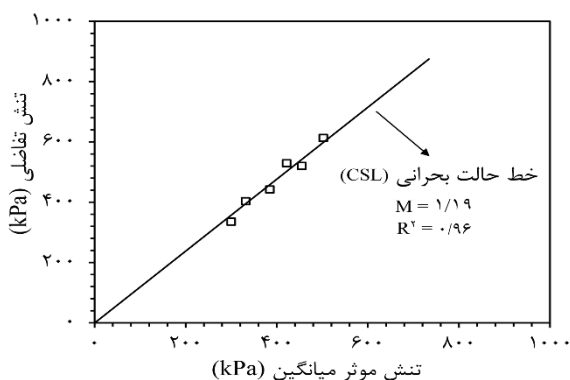
$$p' = p_n + \chi \psi \quad (10)$$

در رابطه پیشنهادی بیشاپ، یکی از مهم‌ترین مسائل نحوه تعریف پارامتر تنش موثر (χ) می‌باشد. تاکنون روابط متعددی جهت محاسبه پارامتر تنش موثر پیشنهاد شده است که برخی از آنها تابعی از مکش ساختاری و برخی دیگر تابع درجه اشباع می‌باشند. یکی از رایج‌ترین روابط برابر قرار دادن پارامتر تنش موثر با درجه اشباع است [۳۹،۴۰،۴۱]. برخی دیگر از محققان به جای درجه اشباع از پارامتر درجه اشباع موثر استفاده کرده‌اند [۱۱،۱۲] که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S_e = \frac{S_r - S_{r,res}}{S_{r0} - S_{r,res}} \quad (11)$$

^۲ Jennings and Burland

^۱ Bishop



شکل ۸: خط حالت بحرانی در فضای تنش موثر (صفحه $q-p'$)

نتایج بدست آمده از آزمایش‌های ترشده‌گی در محدوده مکش‌های متوسط نشان می‌دهد که در کلیه آزمایش‌ها به دلیل کاهش مکش ساختاری ناشی از فرآیند ترشده‌گی، نمونه شروع به جذب آب کرده و حجم آب حفره‌ای افزایش پیدا کرده است. از طرف دیگر تحت شرایط مکش ساختاری و تنش خالص میانگین ثابت، با افزایش تنش برشی اولیه میزان کاهش حجم نمونه‌ها افزایش یافته و در منحنی‌های تغییر حجم پرش‌هایی مشاهده می‌شود که بیانگر فروریزش‌های ایجادشده در ساختار خاک لس می‌باشد.

با توجه به اینکه خاک لس گرگان به طور متوسط دارای ۲۵ درصد رس می‌باشد، تمایل بالای ذرات رس به جذب آب و کاهش تدریجی تنش موثر اعمالی به نمونه در طی فرآیند ترشده‌گی موجب تمایل به انبساط نمونه می‌گردد. از طرف دیگر در اثر افزایش درصد رطوبت نمونه (کاهش مکش ساختاری) پیوندهای بین‌دانه‌ای سست شده و تحت تنش خالص میانگین اعمال شده به نمونه، کاهش حجم یا فروریزش در ساختار خاک رخ می‌دهد. در محدوده مکش‌های متوسط، نرخ وقوع فروریزش در ساختار خاک بیشتر از نرخ تورم ایجاد شده ناشی از کاهش تنش موثر و رفتار تورمی ذرات رس بوده، بنابراین در منحنی‌های تغییر حجم رفتار فروریزشی مشاهده می‌گردد.

در محدوده مکش‌های متوسط و تحت تنش خالص میانگین در نظر گرفته شده در این پژوهش، نیروهای بین‌دانه‌ای به طور کامل از بین نرفته و میزان کاهش حجم حفرات خاک هنوز به اندازه‌ای نرسیده است که افزایش تمایل جذب آب نمونه را تحت تاثیر قرار دهد،

در این رابطه S_r درجه اشباع، S_{r0} درجه اشباع متناظر مکش ساختاری صفر و $S_{r, res}$ درجه اشباع متناظر حالت باقیمانده^۱ می‌باشد. با توجه به شکل (۱-ب) مقادیر S_{r0} و $S_{r, res}$ در مسیر ترشده‌گی برای نمونه‌های بازسازی شده خاک لس گرگان با درصد رطوبت اولیه ۱۱٪ به ترتیب برابر با ۰/۹۸۶ و ۰/۱۲۲ می‌باشد.

در این مقاله رابطه تنش موثر مطابق با رابطه پیشنهادی توسط لو و همکاران^۲ [۴۲] به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

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

با جایگزینی رابطه (۱۲) بجای رابطه تنش موثر کلاسیک ترقاقی، بسیاری از تئوری‌های مکانیک خاک کلاسیک قابل گسترش به حالت غیراشباع هستند. طبق رابطه در نظر گرفته شده برای تنش موثر و بر اساس تئوری حالت بحرانی، در شکل (۸) نقاط متناظر با حالت بحرانی در فضای تنش موثر (صفحه $q-p'$) ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود خط حالت بحرانی^۳ با دقت مناسبی بر داده‌ها برازش یافته ($R^2 = 0.96$) و شیب آن برابر با ۱/۱۹ می‌باشد. با توجه به شیب خط حالت بحرانی، مقدار زاویه اصطکاک متناظر حالت بحرانی (ϕ'_{cr}) برابر با ۲۹/۸ است.

۷- نتیجه گیری

در این مقاله به ارزیابی اثر وجود تنش برشی اولیه (شرایط تنش ناهمسان) بر رفتار هیدرومکانیکی نمونه‌های بازسازی شده خاک لس گرگان در مکش‌های ساختاری متوسط پرداخته شد. بدین منظور مجموعه‌ای از 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 شد. در انتهای هر کدام از آزمایش‌ها، نمونه‌ها در شرایط مکش ساختاری ثابت تحت برش سه‌محوری با کنترل کرنش قرار گرفتند.

^۲ Lu et al.

^۳ Critical State Line (CSL)

^۱ Residual state

بنابراین با افزایش تنش برشی اولیه میزان جذب آب نمونه‌ها افزایش پیدا کرده است.

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

در آزمایش‌های مرحله ترشدگی تحت نسبت‌های تنش برشی صفر (شرایط تنش همسان) و ۱، رفتار برشی نمونه‌ها به صورت سخت‌شونده و مشابه رفتار خاک‌های رسی عادی تحکیم‌یافته و یا ماسه‌ای شل و در آزمایش‌ها تحت نسبت تنش برشی ۲، رفتار برشی مابین حالت‌های سخت‌شونده و نرم‌شونده و مشابه خاک‌های رسی پیش تحکیم‌یافته و یا ماسه‌ای مترکم بوده است. علت تفاوت رفتار برشی نمونه‌های تحت نسبت تنش برشی ۲ در مقایسه با سایر نمونه‌ها، میزان تنش خالص همه جانبه کم اعمال شده به این نمونه‌ها در مرحله ترشدگی می‌باشد که در کنار مکش ساختاری نسبتاً بالا باعث بروز این رفتار شده است.

تمامی نمونه‌ها در طول مرحله برش جذب آب داشته‌اند. این رفتار به خاطر آن است که 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 حفرات و در نتیجه افزایش مکش ساختاری داخلی خاک شده و این تفاوت ایجاد شده 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 حالتیکه نمونه رفتار اتساعی از خود نشان داده است، انبساط نمونه کاهش فشار آب حفره‌ای را در پی داشته که موجب افزایش مکش ساختاری داخلی نمونه نسبت به مکش اعمالی شده و این امر

در کنار تمایل بالای جذب آب بخش رسی منجر به جذب آب توسط نمونه شده است.

نتایج آزمایش‌ها در مرحله برش با رویکرد متغیرهای مستقل تنش مورد بررسی قرار گرفته است. بر این اساس، پوش‌های گسیختگی متناظر با مکش‌های ساختاری ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال با رسم دوایر موهر بر حسب تنش‌های اصلی خالص (σ_{n1}, σ_{n3}) در صفحه $\tau - \sigma_n$ ترسیم شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، پوش‌های گسیختگی به صورت خطوط موازی می‌باشند که نشان دهنده عدم تاثیر مکش ساختاری بر زاویه اصطکاک داخلی خاک در محدوده مکش‌های متوسط است. همچنین نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که چسبندگی ظاهری خاک با افزایش مکش ساختاری افزایش یافته است.

نتایج مرحله برش بر اساس مفهوم حالت بحرانی و با رویکرد تنش موثر نیز مورد بررسی قرار گرفته است. بر این اساس، خط حالت بحرانی در صفحه $q-p'$ با دقت خوبی به نقاط متناظر حالت بحرانی برازش داده شده و شیب آن برابر با $1/19$ می‌باشد.

منابع

- [۱] Terzaghi, k., Peck, R.B. and Mesri, G. "Soil Mechanics in Engineering Practice", *Third Ed, John Wiley & Sons, Inc., New York* (۱۹۹۶).
- [۲] Jefferson, I., Rogers, C.D. "Chapter ۳۲ Collapsible soils", *In ICE manual of geotechnical engineering*, Thomas Telford Ltd, pp.۳۹۱-۴۱۱ (۲۰۱۲).
- [۳] Li, P., Vanapalli, S. and Li, T. "Review of collapse triggering mechanism of collapsible soils due to wetting", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, ۸(۲), pp.۲۵۶-۲۷۴ (۲۰۱۶).
- [۴] Pereira, J.H.F. and Fredlund, D.G. "Volume change behavior of collapsible compacted gneiss soil", *ASCE J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, ۲۶(۱۰), pp.۹۰۷-۹۱۶ (۲۰۰۰).
- [۵] Sun, D.A., Matsouka, H. and Xu, Y.F. "Collapse behavior of compacted clays in suction-controlled triaxial tests", *ASTM Geotechnical Testing Journal*, ۲۷(۴), pp.۳۶۲-۳۷۰ (۲۰۰۴).
- [۶] Jotisankasa, A. "Collapse Behaviour of a Compacted Silty Clay", *Ph.D. Dissertation*, Imperial College London, London (۲۰۰۵).

- [۱۶] Cui, Y.J. and Delage, P. "Yielding and plastic behavior of an unsaturated compacted silt", *Geotechnique*, ۴۶(۲), pp.۲۹۱-۳۱۱ (۱۹۹۶).
- [۱۷] Vecchia, G.D. and Romero, E. "A fully coupled elastic-plastic hydro-mechanical model for compacted soils accounting for clay activity" *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, ۳۷(۵), pp.۵۰۳-۵۳۵ (۲۰۱۳).
- [۱۸] Sivakumar, V., Sivakumar, R., Murray, E.J., Mackinnon, P. and Boyd, J. "Mechanical behaviour of unsaturated kaolin (with isotropic and anisotropic stress history). Part ۱: wetting and compression behaviour", *Geotechnique*, ۶۰(۸), pp.۵۸۱-۵۹۴ (۲۰۱۰).
- [۱۹] Zhan, T.L.T., Chen, R. and Ng, C.W.W. "Wetting-induced softening behavior of an unsaturated expansive clay", *Landslides*, ۱۱(۶), pp.۱۰۵۱-۱۰۶۱ (۲۰۱۴).
- [۲۰] Zhou, Y.F., Tham, L.G., Yan, W.M., Dai, F.C. and Xu, L. "Laboratory study on soil behavior in loess slope subjected to infiltration", *Engineering Geology*, ۱۸۳, pp.۳۱-۳۸ (۲۰۱۴).
- [۲۱] Buenfil, C., Romero Morales, E.E., Lloret Moranchó, A. and Gens Solé, A. "Anisotropic behaviour of compacted clayey silt subjected to hydro-mechanical paths", *3rd European Conference on Unsaturated Soils: E-UNSAT*, Paris, France, pp.۱-۶ (۲۰۱۶).
- [۲۲] Al-Sharrad, M.A., Gallipoli, D. and Wheeler, S.J. "Experimental investigation of evolving anisotropy in unsaturated soils", *Geotechnique*, ۶۷(۱۲), pp.۱۰۳۳-۱۰۴۹ (۲۰۱۷).
- [۲۳] Liang, C., Cao, C. and Wu, S. "Hydraulic-mechanical properties of loess and its behavior when subjected to infiltration-induced wetting", *Bull. Eng. Geol. Environ.*, ۷۷(۱), pp.۳۸۵-۳۹۷ (۲۰۱۸).
- [۲۴] Wang, J., Zhang, D., Wang, N. and Gu, T. "Mechanisms of wetting-induced loess slope failures", *Landslides*, ۱۶(۵), pp.۹۳۷-۹۵۳ (۲۰۱۹).
- [۲۵] Frechen, M., Kehl, M., Rolf, C., Sarvati, R. and Skowronek, A. "Loess chronology of the Caspian lowland in northern Iran", *Quaternary International*, ۱۹۸(۱), pp.۲۲۰-۲۳۳ (۲۰۰۹).
- [۲۶] Haeri, S. M., Zamani, A. and Garakani, A.A. "Collapse potential and permeability of undisturbed and remolded loessial soil samples", *Unsaturated soils: Research and applications*, ۱, pp.۳۰۱-۳۰۸ (۲۰۱۲).
- [۲۷] Haeri, S.M., Garakani, A.A., Khosravi, A. and Meehan, C.L. "Assessing the hydro-mechanical behavior of collapsible soils using a modified triaxial test device", *ASTM Geotechnical Testing Journal*, ۳۷(۲), pp.۱۹۰-۲۰۴ (۲۰۱۴).
- [۲۸] Garakani, A.A., Haeri, S.M., Khosravi, A. and Habibagahi, G. "Hydro-mechanical behavior of undisturbed collapsible loessial soils under different stress state conditions", *Engineering Geology*, ۱۹۵, pp.۲۸-۴۱ (۲۰۱۵).
- [۲۹] Haeri, S.M., Khosravi, A., Garakani, A.A. and Ghazizadeh, S. "Effect of soil structure and disturbance on hydromechanical behavior of collapsible loessial soils", *ASCE International Journal of Geomechanics*, ۱۷(۱), pp.۰۴۰۱۶۰۲۱ (۲۰۱۷).
- [۳۰] Almahbobi, S., Tripathy, S., and Cleall, P.J. "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*, pp. ۶ (۲۰۱۸).
- [۳۱] Haeri, S.M., Garakani, A.A., Roohparvar, H.R., Desai, C.S., Seyed Ghafouri, S.M.H. and Salemi Kouchesfahani, K. "Testing and constitutive modeling of lime-stabilized collapsible loess. I: experimental investigations", *ASCE International journal of geomechanics*, ۱۹(۴), pp.۰۴۰۱۹۰۰۶ (۲۰۱۹).
- [۳۲] Garakani, A.A., Haeri, S.M., Desai, C.S., Seyed Ghafouri, S.M.H., Sadollahzadeh, B., Hashemi Senejani, H. "Testing and constitutive modeling of lime-stabilized collapsible loess. II: Modeling and validations" *ASCE International journal of geomechanics*, ۱۹(۴), pp.۰۴۰۱۹۰۰۷ (۲۰۱۹).
- [۳۳] Sadeghi, H., Kiani, M., Sadeghi, M., Jafarzadeh, F. "Geotechnical characterization and collapsibility of a natural dispersive loess", *Engineering Geology*, ۲۵۰, pp.۸۹-۱۰۰ (۲۰۱۹).
- [۳۴] Zhang, D., Wang, J., Chen, C., and Wang, S. "The compression and collapse behaviour of intact loess in suction-monitored triaxial apparatus", *Acta Geotechnica*, ۱۵(۲), pp.۵۲۹-۵۴۸ (۲۰۲۰).
- [۳۵] Casagrande, A. and Carillo, N. "Shear failure of anisotropic materials", *Proc. Boston Soc. Civ. Engineers*, ۳۱, pp.۷۴-۸۷ (۱۹۴۴).

- [۳۸] Bishop, A.W. "The principle of effective stress", *Teknisk Ukeblad*, ۱۰۶ (۳۹), pp.۸۵۹-۸۶۳ (۱۹۵۹).
- [۳۹] Gallipoli, D., Gens, A., Sharma, R.S. and Vaunat, J. "An elasto-plastic model for unsaturated soil incorporating the effects of suction and degree of saturation on mechanical behaviour.", *Géotechnique*, ۵۳(۱), pp.۱۲۳-۱۳۵ (۲۰۰۳).
- [۴۰] Wheeler, S.J., Sharma, R.S. and Buisson, M.S.R. "Coupling of Hydraulic Hysteresis and Stress-Strain Behaviour in Unsaturated Soils", *Géotechnique*, ۵۳(۱), pp.۴۱-۵۴ (۲۰۰۳).
- [۴۱] Garakani, A.A., Pirjalili, A., Desai, C.S. "An effective stress-based DSC model for predicting the coefficient of lateral soil pressure in unsaturated soils", *Acta Geotechnica*, 16(12), pp.۳۸۱۳-۳۸۳۰ (۲۰۲۱).
- [۴۲] Lu, N., Godt, J.W., and Wu, D.T. "A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil", *Water Resources Research*, ۴۶(۵), (۲۰۱۰).
- [۳۷] Haeri, S.M. "Hydro-mechanical behavior of collapsible soils in unsaturated soil mechanics context", *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, ۲(۱), pp.۲۵-۴۰ (۲۰۱۶).
- [۳۸] Sadollahzadeh, B. "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) (۲۰۱۷).
- [۳۹] Borujerdi, S.S. "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) (۲۰۱۵).
- [۳۰] van Genuchten, M.T. "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", *Soil science society of America journal*, ۴۴(۵), pp.۸۹۲-۸۹۸ (۱۹۸۰).
- [۳۱] Ladd, R.S. "Preparing test specimens using undercompaction", *ASTM Geotechnical Testing Journal*, ۱(۱), pp.۱۶-۲۳ (۱۹۷۸).
- [۳۲] Hilf, J.W. "An investigation of pore water pressure in compacted cohesive soils", *Ph.D. Dissertation*, University of Colorado at Boulder, Boulder, CO, USA (۱۹۵۶).
- [۳۳] Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R. and Widger, R.A. "The shear strength of unsaturated soils", *Can. Geotech. J.*, ۱۵(۳), pp.۳۱۳-۳۲۱ (۱۹۷۸).
- [۳۴] Lu, N. and Likos, W.J. "Suction stress characteristic curve for unsaturated soil", *ASCE J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, ۱۳۲(۲), pp.۱۳۱-۱۴۲ (۲۰۰۶).
- [۳۵] Jennings, J. E. B., and J. B. Burland. "Limitations to the use of effective stresses in partly saturated soils." *Géotechnique* ۱۲, no. ۲ :۱۲۵-۱۴۴ (۱۹۶۲).
- [۳۶] Ghasemzadeh, H. and Amiri, S.G. "A hydro-mechanical elastoplastic model for unsaturated soils under isotropic loading conditions", *Computers and Geotechnics*, ۵۱, pp.۹۱-۱۰۰ (۲۰۱۳).
- [۳۷] Ghasemzadeh, H., Sojoudi, M.H., Amiri, S.G. and Karami, M.H. "Elastoplastic model for hydro-mechanical behavior of unsaturated soils", *Soils and Foundations*, ۵۷(۳), pp.۳۷۱-۳۸۳ (۲۰۱۷).