

تأثیر مسیر تنش بر رفتار ترشده‌گی خاک‌های غیر اشباع

بهنام یوسفی^۱، محمد ملکی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا همدان

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا همدان

*maleki@basu.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۶/۲۲]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۲/۲۰]

چکیده - یکی از جنبه‌های مهم رفتار خاک‌های غیراشباع، تغییرشکل ناشی از افزایش درصد رطوبت یا به عبارتی ترشده‌گی است. عمده کارهای صورت گرفته در خصوص مطالعه اثر ترشده‌گی در مسیر ادئومتری است. آزمایش ادئومتری توانایی مطالعه مسیرهای مختلف تنش را ندارد، بنابراین به منظور بررسی مسیرهای مختلف تنش استفاده از آزمایش سه‌محوری ضروری است. در این مقاله با استفاده از دستگاه سه محوری غیراشباع، رفتار خاک در فرایند ترشده‌گی در سه مکش بافتی مختلف و در هر مکش بافتی برای دو تنش انحرافی متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. دو مسیر تنش متفاوت برای حصول وضعیت تنش قبل از ترشده‌گی به نمونه‌ها اعمال شده است. مسیر اول با ثابت نگه داشتن سطح مقطع نمونه طی بارگذاری متناسب با شرایط ادئومتری است و در مسیر دوم نمونه‌ها ضمن تجربه یک تنش تحکیمی همسان، با ثابت نگه داشتن تنش محصور کننده تنش محوری افزایش داده شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در یک وضعیت تنش انحرافی و مکش بافتی اولیه یکسان، رفتار نمونه متأثر از تاریخچه تنش یا مسیر تنش طی شده قبل از ترشده‌گی است. همچنین، تغییرشکل‌های به وجود آمده ناشی از ترشده‌گی خاک غیراشباع، در یک مسیر مشخص، اساساً به مکش اولیه که در آن خاک در معرض افزایش رطوبت قرار می‌گیرد، بستگی دارد. به طوری که، نمونه‌ها با مکش اولیه بیشتر که در معرض ترشده‌گی قرار گرفته‌اند، تغییرشکل‌های بزرگتری را تجربه کرده‌اند.

واژگان کلیدی: خاک غیراشباع، مسیر تنش، ترشده‌گی، دستگاه سه‌محوری غیراشباع

۱- مقدمه

منجر به تغییرات قابل ملاحظه‌ای در حجم، مقاومت برشی و مشخصات هیدرولیکی می‌شود. خاکریزهای متراکم غیراشباع، ناشی از افزایش تدریجی یا ناگهانی درصد رطوبت، در معرض تغییر شکل‌های زیاد و یا حتی گسیختگی قرار می‌گیرند [۶؛ ۷؛ ۸]. شدت تغییر شکل‌ها به عواملی همچون، نوع خاک، مکش بافتی اولیه، درجه اشباع، میزان سربار موجود و تنش همه جانبه بستگی دارد.

خاک‌های رمبند جزء نگرانی‌های مهم در مناطق خشک و نیمه‌خشک به شمار می‌آیند. جنینگ و نایت (۱۹۷۵) از اولین کسانی بودند که آزمایش تحکیم دوگانه را در دستگاه ادئومتری با هدف بررسی پاسخ خاک به پدیده ترشده‌گی و

به‌طور کلی بیشتر مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان در شرایط غیراشباع قرار دارند و مطالعات و بررسی آن‌ها تفاوت فراوانی با خاک‌های اشباع دارد. در حال حاضر داده‌های آزمایشگاهی فراوانی روی خاک‌های غیراشباع با هدف بررسی رفتار آن‌ها صورت گرفته است. عمدتاً مطالعات در شرایط کنترل مکش با سلول‌های سه‌محوری به دست آمده است که مبنایی برای مدلسازی رفتاری خاک‌های غیراشباع و اعتبار بخشی به مدل‌های موجود بوده است [۱، ۲، ۳ و ۴]. یکی از اصلی‌ترین مسائل مربوط به خاک‌های غیراشباع، تأثیر ترشده‌گی روی رفتار خاک است [۵]. در خاک‌های غیراشباع، تغییر درجه اشباع خاک

پژوهش بررسی تأثیر مسیر تنش در مرحله تحکیم خاک‌های غیراشباع در دو مسیر k_0 و سه‌محوری بر رفتار ناشی از ترشدگی است. که این موضوع متناسب با شرایط واقعی در بسیاری از مسائل ژئوتکنیکی است. به همین منظور با استفاده از دستگاه و تجهیزات سه‌محوری توسعه یافته رفتار ناشی از ترشدگی یک نوع خاک ماسه‌ای مخلوط با رس و لای تحت مسیرهای فوق و در وضعیت تنش‌های اولیه (قبل از ترشدگی) متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مشخصات فیزیکی خاک مورد مطالعه و آماده‌سازی نمونه‌ها

خاک مورد استفاده در این پژوهش به صورت ترکیبی از ماسه، رس ولای در آزمایشگاه ساخته شده است. مشخصات فیزیکی خاک مورد مطالعه در جدول (۱) آورده شده است.

آزمایش دانه‌بندی مطابق با استاندارد ASTM D-422 برای دانه‌های بزرگتر از 0.075 میلی‌متر و آزمایش هیدرومتری برای ذرات کوچکتر از 0.075 میلی‌متر نیز مطابق با استاندارد ASTM D-422 انجام شد. شکل (۱) منحنی دانه‌بندی خاک مورد آزمایش را نشان می‌دهد.

پس از اختلاط خشک مصالح با نسبت‌های وزنی معین، به تدریج با آب‌فشان حدود ۵ درصد رطوبت به آن اضافه شد. سپس به مدت ۲۴ ساعت درون نایلون قرارداد شد تا به‌طور کامل همگن شود.

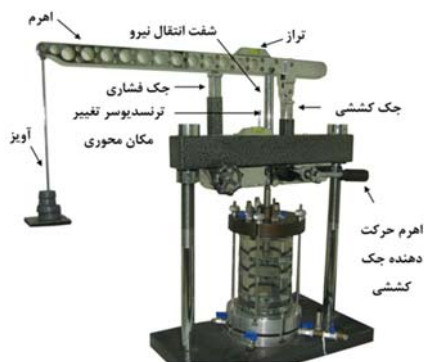
تمامی نمونه‌های ساخته شده از خاک مورد مطالعه برای انجام آزمایش‌ها با نسبت تخلخل 0.8 ساخته شده‌اند. روش آماده‌سازی نمونه‌ها در آزمایش سه‌محوری روی رفتار نمونه‌ها تأثیرگذار است [۱۷؛ ۱۸]. در این پژوهش از روش کویس مرطوب برای ساخت نمونه‌ها استفاده شد. این روش دارای مزیت کنترل آسان دانسیته نسبت به سایر روش‌ها است و همچنین این روش نمونه‌سازی، برای ساخت نمونه‌هایی با دامنه وسیعی از نسبت تخلخل مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۹]. مشخصات فیزیکی نمونه‌ها در جدول (۲) نشان داده شده است.

بارگذاری در شرایط مختلف تنش گسترش داده‌اند [۹]. در ادامه مطالعات فراوانی بر روی رفتار خاک‌های رهنده صورت گرفته است که نشانگر پراکنندگی در بیان پتانسیل رهنندگی و دیگر مشخصه‌های مهندسی آن‌ها دارد [۱۰]. کاتو و کاوایی^۱ (۲۰۰۰) نیز جزء اولین کسانی بودند که به مطالعه جامعی از رفتار رهنندگی خاک‌های متراکم در شرایط تحکیم همسان و کنترل مکش در سلول سه‌محوری پرداخته‌اند [۱۱]. اما مطالعه آن‌ها محدود به یک دانسیته و در شرایط تنش همسان بوده است. مسیرهای تنش اولین بار به وسیله‌ی لامب^۲ (۱۹۶۷) مطرح شد [۱۲]، در ادامه وود^۳ (۱۹۸۴) مسائل مختلف ژئوتکنیک را در این زمینه گسترش داد [۱۳] و به وسیله‌ی لامب و ویتمن^۴ (۱۹۶۹) به صورت جزئی مورد بررسی قرار گرفت [۱۴].

دستگاه ادئومتری شرایط نمونه را در ابتدای آزمایش تا انتهای آن به صورت k_0 قرار می‌دهد، این در حالی است که خاک به ویژه در هنگام وقوع رهنندگی در شرایط k_0 قرار ندارد. از طرفی در دستگاه ادئومتری کلاسیک، مکش نمونه‌ها و تنش‌های جانبی اندازه‌گیری نمی‌شود. عمده مطالعات صورت گرفته در خصوص خاک‌های رهننده نیز با تجهیزات ادئومتری بوده است که با توجه به شرایط مرزی تنش و کرنش، انطباق آن با شرایط واقعی خاک قابل تأمل است. سان و همکاران^۵ (۲۰۰۴) و (۲۰۰۷) با استفاده از دستگاه سه‌محوری به بررسی عوامل مختلف از جمله تأثیر میزان تنش انحرافی و دانسیته خاک پرداخته‌اند [۱۵، ۱۶]، آن‌ها مشاهده کردند که در شرایطی که تنش میانگین خالص (P) ثابت است، با افزایش تنش انحرافی پتانسیل رهنندگی افزایش پیدا می‌کند. بنابر مطالعات مروری انجام شده، کارهای پژوهشگران در قبل بیشتر در یک مسیر ادئومتری یا سه‌محوری بوده است و مقایسه بین نتایج این دو مسیر و تأثیر آن‌ها بر روند تغییر شکل نمونه‌ها طی فرایند ترشدگی مدنظر نبوده است. مهمترین مسأله در این

1 Kato & Kawai
2 Lambe
3 Wood
4 Whitman
5 Sun et al.

متخلخل ($HAED^2$) با عدد عبوری هوای 5^3 اتمسفر کنترل و یا اعمال شده و فشار هوای حفره‌ای از طریق مجرای بالای نمونه کنترل و یا اعمال می‌شود.



شکل (۲) سیستم بارگذاری دستگاه سه‌محوری

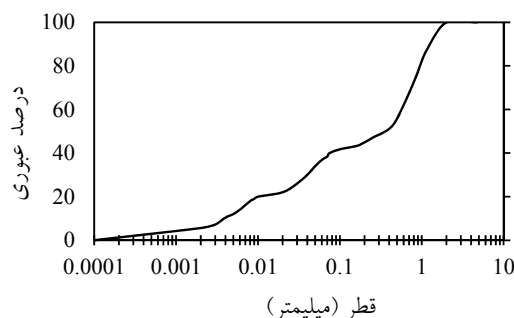
۴- روند آزمایش

به منظور بررسی تأثیر مکش بافتی، مسیر تنش و میزان سربار (تنش انحرافی) روی رفتار برشی و تغییر حجمی خاک در فرآیند ترشدگی، مجموعه‌ای از آزمایش‌های سه‌محوری انجام شده است. آزمایش‌های انجام شده در شرایط غیراشباع و با کنترل مکش بافتی صورت پذیرفته است.

به طور کلی نمونه‌ها شامل دو گروه بوده است. نمونه‌های گروه اول تحت تنش انحرافی 70 کیلوپاسکال و نمونه‌های گروه دوم تحت تنش انحرافی 250 کیلوپاسکال مورد آزمایش قرار گرفته‌اند که هر گروه در دو مسیر تنش متفاوت مورد بررسی قرار داده شده است. در این آزمایش‌ها، مقدار مکش بافتی با استفاده از روش جابه‌جایی محوری به مقدار مورد نظر (مندرج در جدول ۳) رسانده شده است. در همه نمونه‌ها فشار هوای حفره‌ای (u_a) ثابت و برابر 250 کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است و فشار آب حفره‌ای (u_w) متناسب با مکش بافتی مفروض تنظیم شده است. مشخصات نمونه‌های مورد آزمایش و همچنین نام‌گذاری و مقادیر اولیه متغیرهای مربوط به هر آزمایش از جمله تنش

جدول (۱) مشخصات فیزیکی خاک مورد مطالعه

نمونه عبوری	شدت	دانه بندی	دانه ریزی	چگالی دانه‌ها	لای	درصد	درصد ماده	درصد ریز	نوع خاک
NP	-	۱۵	۲/۶۴		۱۵	۶۰	۲۵		SM



شکل (۱) نمودار دانه‌بندی خاک مورد آزمایش

جدول (۲) مشخصات فیزیکی نمونه‌ها

وزن مخصوص خشک (kN/m^3)	۱۴/۷
درصد اشباع اولیه	۱۶/۵۰
نسبت تخلخل	۰/۸
درصد رطوبت اولیه	۵

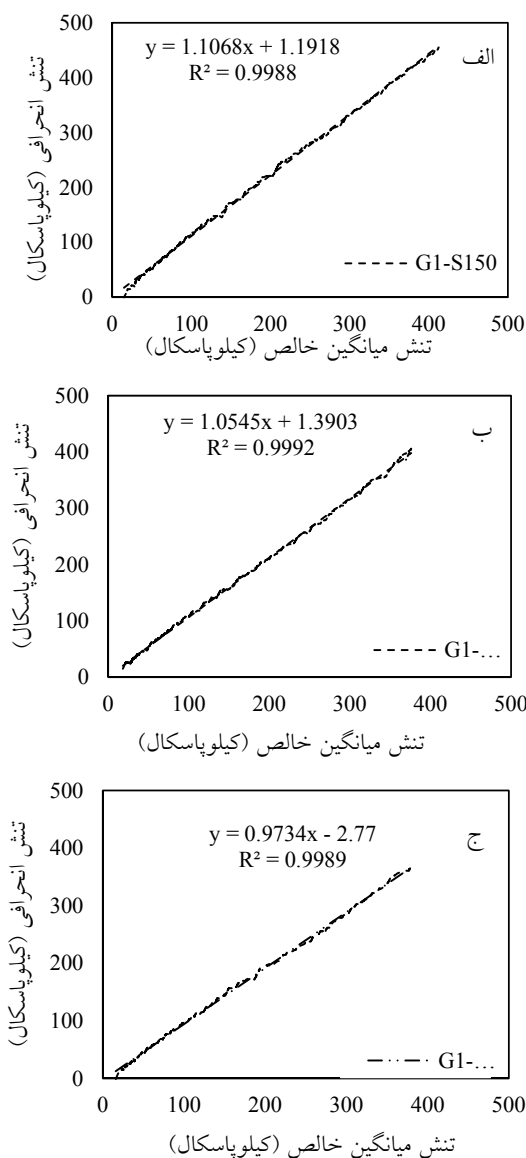
۳- دستگاه و تجهیزات آزمایش

در مقاله حاضر از دستگاه سه‌محوری با کنترل تنش توسعه یافته در دانشگاه بوعلی سینا برای انجام آزمایش استفاده شده است (شکل ۲). این دستگاه امکان بارگذاری طولانی مدت روی نمونه را فراهم می‌کند؛ یکی از مزایای مهم این دستگاه امکان انجام آزمایش‌های خزشی محدود شده در تنش‌های همه‌جانبه مختلف و همچنین تغییر تنش همه‌جانبه در حین انجام آزمایش است، که امکان انجام آزمایش در مسیرهای مختلف بارگذاری برای انواع خاک و سنگ‌های ضعیف را فراهم می‌کند. در این دستگاه برای کنترل مکش بافتی از روش جابه‌جایی محوری^۱ استفاده می‌شود. برای این امر، فشار آب حفره‌ای به صورت مستقل در بالا و پایین نمونه به وسیله‌ی یک دیسک سرامیکی

2 High air entry disk
3 Air entry value

1 Axis translation

مقدار شیب خط k_0 شده است، به عبارتی دیگر در یک مقدار مشخص از تنش انحرافی برای ثابت نگه داشتن سطح مقطع نمونه با کاهش مکش، نیاز به افزایش در تنش همه‌جانبه خالص است. نتایج بیان‌گر این مطلب است که مکش بافتی به عنوان یک نیروی داخلی عمل کرده است، به گونه‌ای که با کاهش آن، برای ثابت نگه داشتن سطح مقطع نیاز به افزایش تنش همه‌جانبه بوده است.



شکل (۳) نتایج آزمایش‌های سه‌محوری غیراشباع در حالت k_0 در مکش‌های بافتی الف- ۱۵۰ کیلوپاسکال، ب- ۱۰۰ کیلوپاسکال، ج- ۵۰ کیلوپاسکال

همه‌جانبه خالص ($\sigma_3 - u_a$)، فشار هوای حفره‌ای، فشار آب حفره‌ای و مکش بافتی و تنش انحرافی اعمال شده به ترتیب در جدول‌های (۲) و (۳) آورده شده است. در جدول (۳)، معرف گروه آزمایش، S معرف مکش بافتی اولیه و q معرف مقدار تنش انحرافی اعمال شده بر نمونه است. با در نظر گرفتن مقادیر ۷۰ و ۲۵۰ کیلوپاسکال برای تنش انحرافی نمونه‌های گروه اول و دوم و با توجه به نتایج نمودارهای شکل (۳) مقادیر جدول (۳) استخراج شده‌اند.

جدول (۳) مقادیر اولیه متغیرها در آزمایش‌های گروه اول و دوم با کنترل مکش بافتی

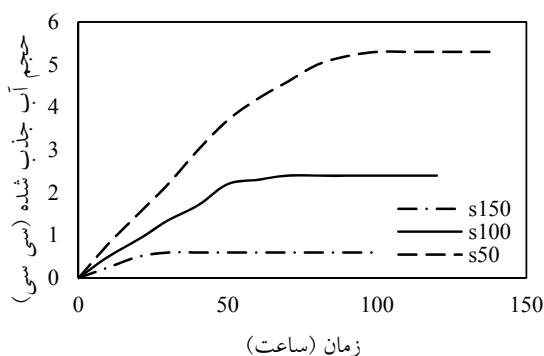
Test	$\sigma_3 - u_a$ (kPa)	u_a (kPa)	u_w (kPa)
G1-S150-q70	۴۰	۲۵۰	۲۰۰
G2-S150-q250	۱۴۰	۲۵۰	۲۰۰
G1-S100-q70	۴۳	۲۵۰	۱۵۰
G2-S100-q250	۱۵۲	۲۵۰	۱۵۰
G1-S50-q70	۵۲	۲۵۰	۱۰۰
G2-S50-q250	۱۷۴	۲۵۰	۱۰۰

۵- نتایج آزمایش‌های سه‌محوری غیراشباع در حالت k_0

عمده تحقیقات صورت گرفته در خاک غیراشباع در مرحله تحکیم به صورت تحکیم همسان می‌باشد و مطالعات بسیار کمی در شرایط تحکیم غیرهمسان انجام شده است.

برای تعیین خطوط k_0 پس از به تعادل رسیدن نمونه در مکش بافتی مورد نظر، نمونه‌ها تحت افزایش تدریجی تنش انحرافی و تنش همه‌جانبه خالص قرار می‌گیرند، به گونه‌ای که سطح مقطع نمونه ثابت باشد (شکل ۳). پژوهش‌های گذشته نشان‌دهنده این مطلب است که مکش اولیه نمونه‌ها روی مقاومت نهایی آنها تأثیرگذار است، به گونه‌ای که با افزایش مکش بافتی مقاومت نهایی نیز افزایش یافته است. همان‌طور که از نتایج شکل (۳) مشاهده می‌شود افزایش مکش بافتی باعث افزایش

شده و نفوذپذیری خاک و دیسک سرامیکی خیلی کم بوده است، بنابراین نمونه‌های با مکش بافتی هدف بالاتر زودتر به وضعیت تعادل رسیده‌اند.



شکل (۴) نمودار ترشدگی در فرایند تعادل برای نمونه‌ها در مکش‌های بافتی مختلف

۶-۲- مرحله بارگذاری

پس از این‌که نمونه‌ها به تعادل رسیده‌اند، با توجه به اطلاعات جدول (۳) برای رسیدن به تنش‌های همه‌جانبه و انحرافی مشخص، دو مسیر انتخاب شده است. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود برای نمونه‌های گروه اول، در مسیر اول (A-C) تنش انحرافی (q) و تنش همه‌جانبه خالص (p) به گونه‌ای افزایش می‌یابند که سطح مقطع اولیه در طی افزایش تدریجی تنش ثابت باشد. در این شرایط وضعیت تنش بر روی خط k_0 قرار گرفته است. در مسیر دوم (A-B-C) ابتدا مقدار فشار همه‌جانبه خالص به تدریج تا نقطه B افزایش داده شده و نمونه به صورت همسان تحکیم یافته است و سپس به نسبت ۳ به ۱ تنش انحرافی افزایش داده شده است، به گونه‌ای که در انتهای مرحله بارگذاری تحکیم، تنش‌های موجود، معادل با وضعیت تنش در نقطه C گردیده است.

با توجه به شکل (۵) به منظور بررسی تأثیر میزان تنش انحرافی در نمونه‌های گروه دوم نیز، مسیر اول (A-D) و مسیر دوم (A-E-D) انتخاب شده است.

۶- نتایج آزمایش‌های سه‌محوری غیراشباع در معرض افزایش رطوبت

پس از تهیه و جای‌گذاری نمونه در دستگاه سه‌محوری غیراشباع، مکش بافتی به مقدار مورد نظر رسانده شده است. تمامی نمونه‌های گروه اول و دوم در مکش اولیه ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال پس از رسیدن به تعادل و اتمام مرحله تحکیم غیرهمسان، تحت افزایش رطوبت قرار گرفته‌اند و کرنش حجمی و محوری آن‌ها اندازه‌گیری شده است.

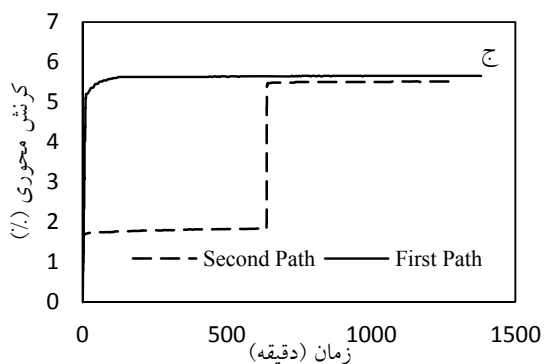
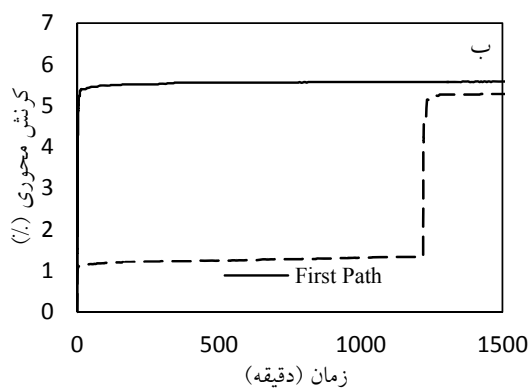
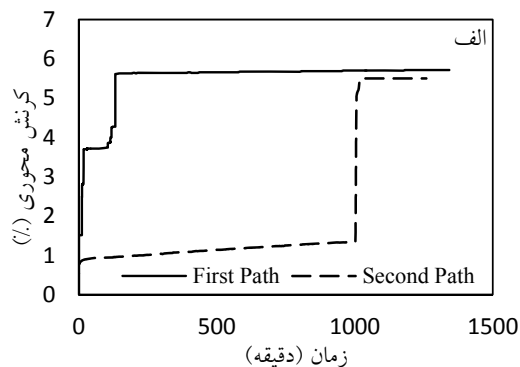
۶-۱- مرحله تعادل

از آنجایی که رفتار خاک‌ها در دو مسیر ترشدگی و خشک‌شدگی متفاوت است و برای آن‌که در این پژوهش همواره نمونه‌ها در فرایند ترشدگی به تعادل برسند، با چندین مرتبه سعی و خطا رطوبت ۵٪ برای تمامی نمونه‌ها انتخاب شده است.

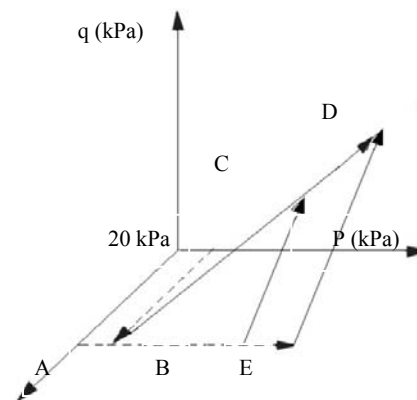
با توجه به درصد رطوبت اولیه کم نمونه‌ها، درجه اشباع نمونه‌های خاک در حین رساندن آن‌ها به مقادیر مکش بافتی مفروض (۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال) افزایش یافته است. در این مجموعه از آزمایش‌ها به دلیل درصد رطوبت اولیه کم، تمامی آزمایش‌ها در مسیر ترشدگی برای رسیدن به تعادل قرار گرفته‌اند. نمودار ترشدگی نمونه‌ها در شکل (۴) آورده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، نمونه‌هایی که تحت مکش بافتی اولیه کمتر برای رسیدن به تعادل قرار گرفته‌اند، سرعت جذب آب بیشتری در ساعات اولیه مرحله ترشدگی داشته‌اند، به همین ترتیب نمونه‌هایی که تحت مکش بافتی اولیه بیشتر برای رسیدن به تعادل قرار گرفته‌اند، زمان کم‌تری برای رسیدن به تعادل را سپری کرده‌اند.

با مقایسه نمودارهای ترشدگی برای نمونه‌ها مشاهده می‌شود که مدت زمان لازم برای رسیدن به تعادل در مکش‌های بافتی هدف بالاتر کمتر بوده است، این مسأله به این دلیل است که آب کمتری به نمونه خاک وارد

نشست نمونه‌های گروه دوم (تنش انحرافی ۲۵۰ کیلوپاسکال) در شکل (۷) مشاهده شده است که به دلیل افزایش تنش انحرافی و تنش همه‌جانبه، در مقایسه با نمونه‌های گروه اول کرنش‌های محوری مسیر دوم در این گروه اختلاف قابل توجهی نسبت به مسیر اول را تجربه کرده‌اند، علت این امر را می‌توان افزایش دانسیته خاک و در نتیجه افزایش سختی خاک به واسطه تنش همه‌جانبه بالا در مرحله اول تحکیم همسان بیان کرد.



شکل (۶) نمودار کرنش محوری- زمان برای نمونه‌های گروه اول در مکش‌های بافتی مختلف الف- ۱۵۰ کیلوپاسکال، ب- ۱۰۰ کیلوپاسکال، ج- ۵۰ کیلوپاسکال



S (kPa)

شکل (۵) مسیرهای اعمال تنش در مرحله تحکیم گروه اول (مسیر اول (A-C) - مسیر دوم (A-B-C)) - گروه دوم (مسیر اول (A-E-D) - مسیر دوم (A-E-D))

در مرحله تحکیم اجازه از بین رفتن شدن اضافه فشار آب و هوای حفره‌ای داده شده است. در این مرحله داده‌های تغییر حجم نمونه‌ها به وسیله دستگاه اندازه‌گیری تغییر حجم ثبت شده است. در شکل‌های (۶) و (۷) تغییرات کرنش محوری نمونه‌ها در مسیرهای بارگذاری اول و دوم به ترتیب در نمونه‌های گروه اول و دوم نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۶) مشخص شده است، برای همه نمونه‌های گروه اول (تنش انحرافی ۷۰ کیلوپاسکال) با مکش اولیه متفاوت، کرنش محوری برابر بوده و اختلاف بین دو مسیر تنش اندک بوده است. علت این مسأله را می‌توان این‌گونه بیان کرد که با توجه به نسبت تنش‌های قائم و افقی که بر اساس شرایط k_0 انتخاب شده‌اند، نمونه‌هایی که دارای مکش بافتی کمتر بوده‌اند، تنش همه‌جانبه خالص بیشتری را تجربه کرده‌اند همین امر سبب شده تا مقدار کرنش محوری تقریباً برابر در مکش‌های مختلف را داشته باشیم و در تمامی نمونه‌های مسیر اول به دلیل این‌که در شرایط اذئومتر قرار گرفته، تاریخچه تنش انحرافی را تجربه نموده و کرنش محوری بیشتری را متحمل می‌شود.

با توجه به شکل (۵) نمونه‌های گروه دوم تنش انحرافی بیشتری را تجربه کرده‌اند. بنابراین با دقت در منحنی‌های

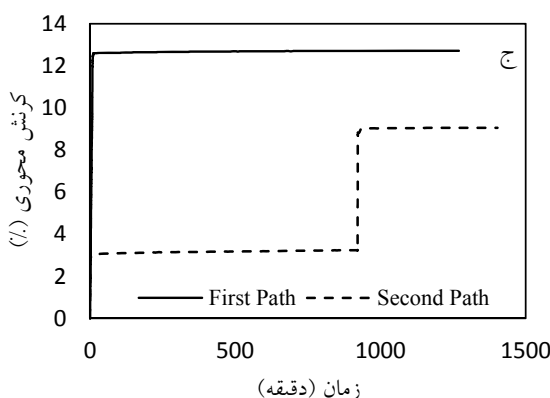
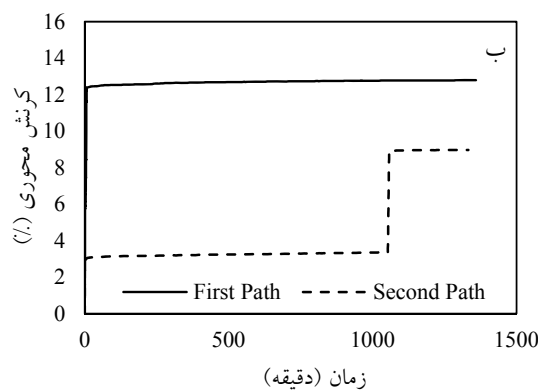
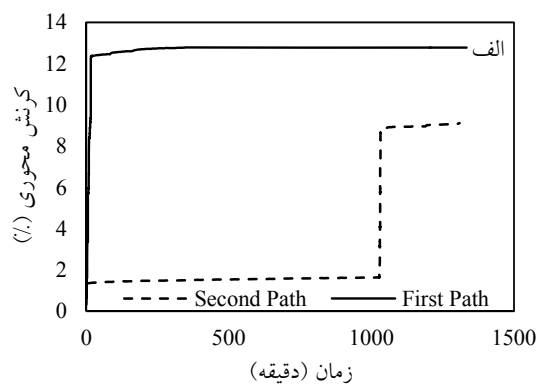
۳-۶- افزایش رطوبت نمونه‌ها ناشی از کاهش

مکش بافتی

پس از این که نمونه‌ها تحت تنش‌های اعمال شده در هر دو مسیر به تعادل رسیدند؛ با کاهش گام به گام مکش بافتی، در معرض افزایش رطوبت قرار گرفته‌اند. در شکل‌های (۸) الی (۱۳) روند تغییر کرنش‌های محوری و حجمی نمونه‌ها در مرحله ترشدگی ترسیم شده‌است.

در تمامی نمونه‌ها، افزایش درصد رطوبت به واسطه کاهش مکش بافتی با ثابت نگاه داشتن فشارهای حفره‌ای ۲۵۰ کیلوپاسکال و افزایش پله‌ای فشار آب حفره‌ای صورت گرفته‌است. به عبارت دیگر آزمایش ترشدگی برای نمونه‌ها با مکش اولیه ۱۵۰ کیلوپاسکال در سه مرحله، با کاهش مکش از ۱۵۰ به ۱۰۰، ۱۰۰ به ۵۰ و از ۵۰ به صفر کیلوپاسکال و برای نمونه‌های با مکش اولیه ۱۰۰ کیلوپاسکال در دو مرحله، با کاهش مکش از ۱۰۰ به ۵۰ و از ۵۰ به صفر کیلوپاسکال و در پایان برای نمونه با مکش اولیه ۵۰ کیلوپاسکال در یک مرحله انجام شده است. در هر مرحله از کاهش مکش بافتی، به نمونه‌ها اجازه داده شده که به تعادل رسیده و روند جذب آب و تغییر شکل محوری آن‌ها به یک وضعیت پایدار رسیده باشند.

با توجه به شکل (۵) در مسیرهای (A-C) و (A-D) نمونه‌های گروه اول و دوم به دلیل ثابت بودن سطح مقطع اولیه نمونه در مرحله تحکیم، بیشترین شباهت را با رفتار دستگاه ادنومتري دارد. از مهم‌ترین خصوصیات دستگاه ادنومتري صفر بودن کرنش شعاعی به دلیل حضور رینگ فلزی در اطراف نمونه است. بنابراین در فرایند ترشدگی همواره کرنش شعاعی صفر است که این مسأله با رفتار خاک در طبیعت همخوانی مناسبی ندارد. به همین منظور در این تحقیق برای تأمین شرایط مشابه رفتار در طبیعت با ثابت نگاه داشتن نسبت تنش‌های قائم و افقی طی فرایند ترشدگی به نمونه‌ها اجازه تغییر کرنش شعاعی داده شده‌است. در شکل (۸) نتایج کرنش شعاعی نمونه‌ها در فرایند ترشدگی نشان داده شده‌است.



شکل (۷) نمودار کرنش محوری- زمان برای نمونه‌های گروه دوم در مکش‌های بافتی الف- ۱۵۰ کیلوپاسکال، ب- ۱۰۰ کیلوپاسکال، ج- ۵۰ کیلوپاسکال

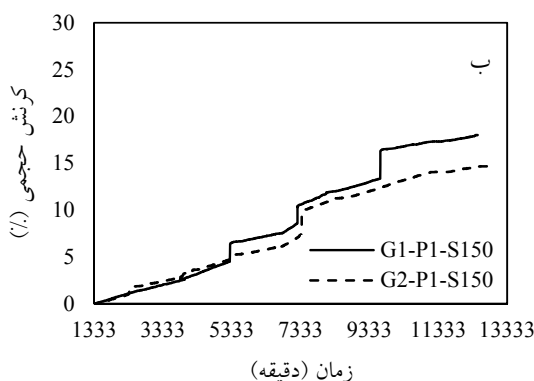
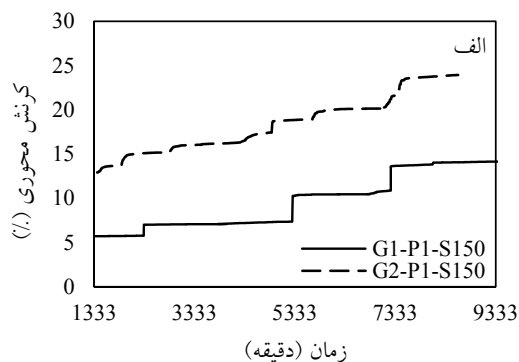
با توجه به نتایج ارائه شده در نمونه‌های گروه دوم (تنش انحرافی ۲۵۰ کیلوپاسکال) نیز نمونه‌ها با مکش بافتی اولیه کمتر به دلیل حضور تنش همه‌جانبه خالص بیشتر، در هر مسیر کرنش تقریباً برابر در آزمایش‌ها با مکش‌های متفاوت را تجربه کرده‌است.

در برخی موارد بسته به نوع خاک، میزان تنش کل و یا نرخ ترشدگی ممکن است گسیخته شوند.

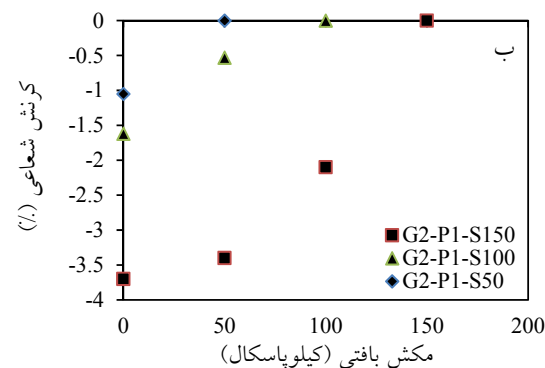
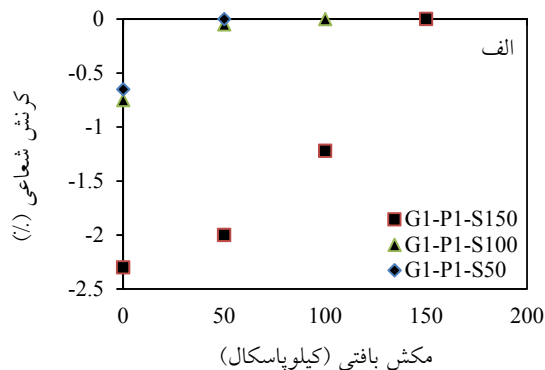
پتانسیل ریبندگی خاک (ε_v^{co}) با توجه به کرنش های حجمی نمونه ها براساس رابطه (۱) محاسبه می شود که در آن e_b نسبت تخلخل نمونه در ابتدای کاهش مکش بافتی و Δe_{co} اختلاف نسبت تخلخل در ابتدا و پایان مرحله ترشدگی است [۱۶].

$$\varepsilon_v^{co} = \frac{-\Delta e_{co}}{1 + e_b} \quad (1)$$

در شکل های (۹) و (۱۰) به ترتیب تغییرات کرنش محوری و حجمی در طول بازه های ترشدگی برای نمونه های گروه اول و دوم با مکش اولیه ۱۵۰ کیلو پاسکال در دو مسیر تنش اول و دوم نشان داده شده است.



شکل (۹) نمودار الف-کرنش محوری- زمان، ب- کرنش حجمی- زمان برای نمونه های گروه اول و دوم طی فرایند ترشدگی ناشی از کاهش مکش بافتی با مکش اولیه ۱۵۰ کیلو پاسکال، تحت مسیر اول تنش



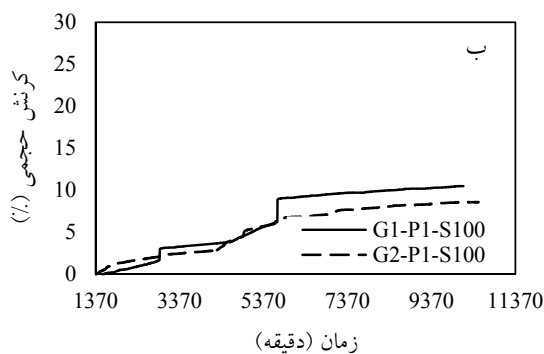
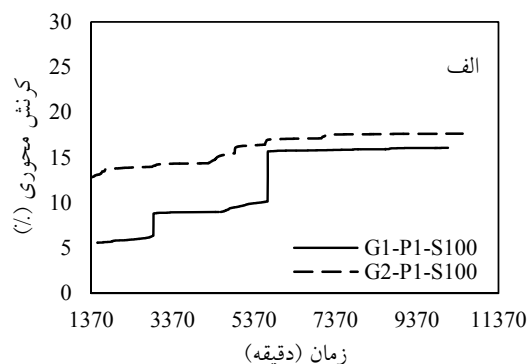
شکل (۸) نمودار مکش بافتی- کرنش شعاعی الف- گروه اول ب- گروه دوم

با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۸) با افزایش مکش بافتی اولیه مقدار کرنش شعاعی در فرایند ترشدگی افزایش می یابد. همچنین نمونه های گروه دوم به دلیل تجربه تنش انحرافی و همه جانبه بیشتر دارای کرنش شعاعی بیشتری نسبت به نمونه های گروه اول است.

۴-۶- تأثیر میزان تنش انحرافی بر رفتار ریبندگی نمونه های غیر اشباع

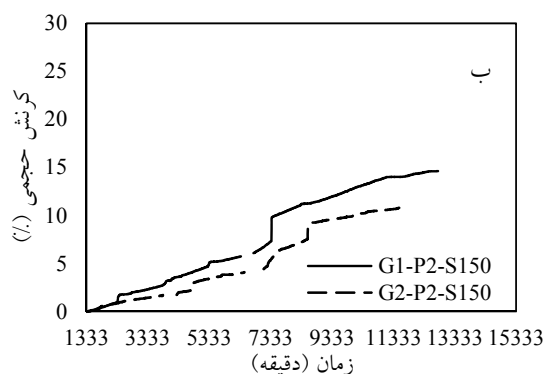
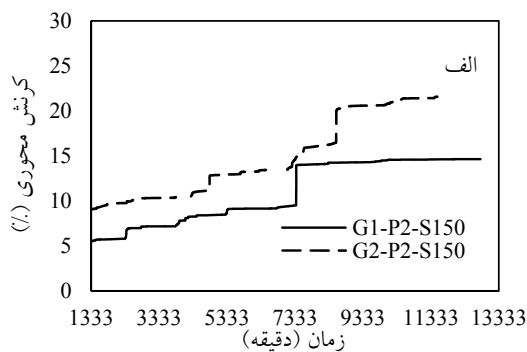
یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار بر رفتار مکانیکی خاک های غیر اشباع در فرایند ترشدگی، مسیر تنش اعمالی و میزان تنش انحرافی در مرحله تحکیم است. خاک های غیر اشباع در طبیعت بسته به چگونگی تشکیل آن ها و یا شکل اعمال بار روی خاک ممکن است در شرایط مختلف تنش، تحکیم یابند. خاک های غیر اشباع هنگامی که در معرض افزایش رطوبت قرار بگیرند معمولاً نشست های قابل توجهی را از خود نشان داده و

به منظور بررسی تأثیر مکش بافتی نیز در شکل های (۱۱) و (۱۲) تغییرات کرنش های محوری و حجمی در حین ترشدگی به ترتیب برای نمونه های گروه اول و دوم با مکش اولیه ۱۰۰ کیلوپاسکال در دو مسیر تنش اول و دوم نشان داده شده است.



شکل (۱۱) نمودار الف-کرنش محوری- زمان، ب- کرنش حجمی- زمان برای نمونه های گروه اول و دوم طی فرایند ترشدگی ناشی از کاهش مکش بافتی با مکش اولیه ۱۰۰ کیلوپاسکال، تحت مسیر تنش اول

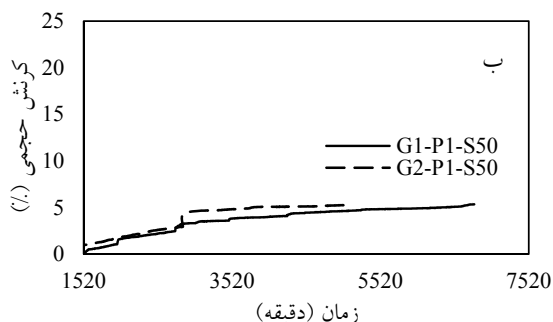
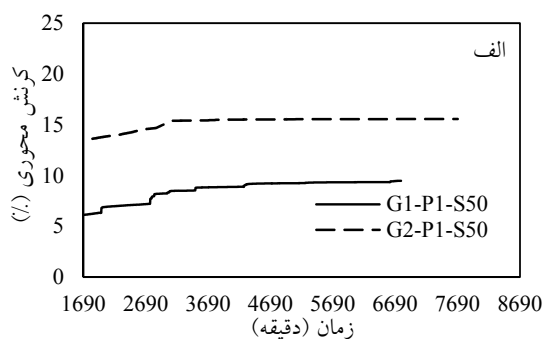
با مقایسه شکل های (۱۱) و (۱۲) نیز مشاهده می شود که نمونه های گروه ۲ با وجود تنش انحرافی بالاتر، دارای پتانسیل رمبندگی کمتری است. این مسأله با چشم پوشی از مسیر تنش است به عبارتی در هر دو مسیر تنش، نمونه های گروه دوم دارای پتانسیل رمبندگی کمتری هستند. اختلاف پتانسیل رمبندگی گروه های ۱ و ۲ با کم شدن مکش بافتی اولیه از ۱۵۰ کیلوپاسکال به



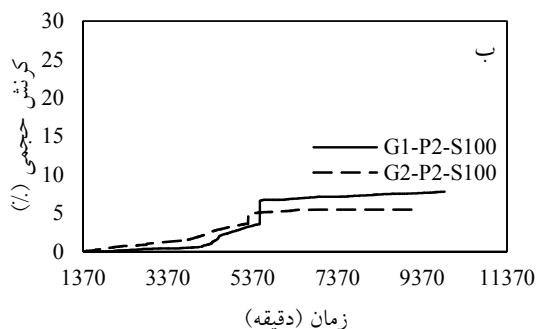
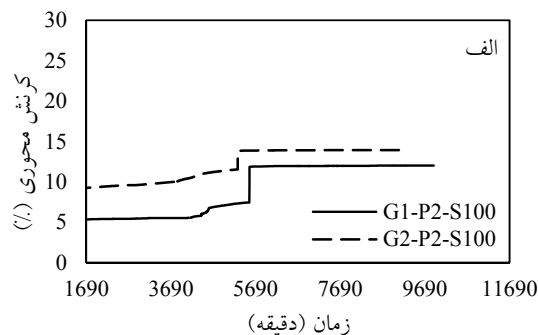
شکل (۱۰) نمودار الف-کرنش محوری- زمان، ب- کرنش حجمی- زمان برای نمونه های گروه اول و دوم طی فرایند ترشدگی ناشی از کاهش مکش بافتی با مکش اولیه ۱۵۰ کیلوپاسکال، تحت مسیر دوم

از مقایسه شکل های (۹) و (۱۰) مشاهده می شود، برای مکش بافتی ۱۵۰ کیلوپاسکال طی فرایند ترشدگی تغییرات درصد کرنش محوری برای هر دو گروه و در هر دو مسیر طی فرایند ترشدگی دارای مقدار تقریبی ۱۰ درصد است، این در حالی است که کرنش های حجمی در انتهای فرایند ترشدگی برای نمونه های گروه اول بیشتر از کرنش های حجمی نمونه های گروه دوم است. از مشاهده این نمودارها می توان نتیجه گرفت که تحت مسیرهای تنش مشابه نمونه های گروه اول با وجود تجربه تنش انحرافی کم تر نسبت به گروه دوم پتانسیل رمبندگی بزرگتری را با کاهش مکش بافتی تجربه می کنند. این مسأله در نتایج شکل (۱۰) نیز مشاهده می شود.

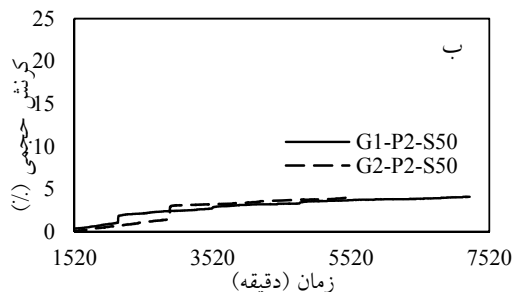
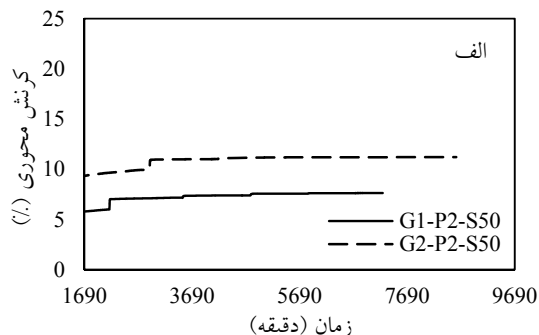
۱۰۰ کیلوپاسکال، کاهش یافته است.



شکل (۱۳) نمودار الف- کرنش محوری- زمان، ب- کرنش حجمی- زمان برای نمونه های گروه اول و دوم طی فرایند ترشدگی ناشی از کاهش مکش بافتی با مکش اولیه ۵۰ کیلوپاسکال، تحت مسیر تنش اول



شکل (۱۴) نمودار الف- کرنش محوری- زمان، ب- کرنش حجمی- زمان برای نمونه های گروه اول و دوم طی فرایند ترشدگی ناشی از کاهش مکش بافتی با مکش اولیه ۱۰۰ کیلوپاسکال، تحت مسیر تنش دوم



شکل (۱۵) نمودار الف- کرنش محوری- زمان، ب- کرنش حجمی- زمان برای نمونه های گروه اول و دوم طی فرایند ترشدگی ناشی از کاهش مکش بافتی با مکش اولیه ۵۰

در شکل های (۱۳) و (۱۴) نیز به ترتیب نتایج کرنش محوری و حجمی برای نمونه های گروه اول و دوم با مکش اولیه ۵۰ کیلوپاسکال در دو مسیر تنش اول و دوم نشان داده شده است.

با توجه به نتایج شکل (۱۳) تغییرات کرنش محوری در مکش بافتی ۵۰ کیلوپاسکال در فرایند ترشدگی اندک است و نمونه با سرعت بیشتری به تعادل می رسد. این در حالی است که تغییرات کرنش حجمی که مهم ترین معیار برای ارزیابی پتانسیل رمبندگی خاک ها محسوب می شود کمترین مقدار اختلاف در هر دو گروه را تجربه کرده است. به عبارت دیگر افزایش تنش انحرافی تقریباً تأثیری بر میزان اختلاف کرنش حجمی در کاهش مکش بافتی از ۵۰ کیلوپاسکال به صفر را نداشته است.

۳. با در نظر گرفتن ثابت بودن سطح مقطع نمونه به عنوان معیار اصلی برای تعیین خط k_0 ، افزایش مکش بافتی سبب افزایش مقدار شیب خط k_0 می‌شود به عبارت دیگر مکش بافتی به عنوان یک نیروی داخلی عمل می‌کند، به گونه‌ای که با کاهش آن، برای ثابت نگه داشتن سطح مقطع نیاز به افزایش تنش همه‌جانبه است.

۸- مراجع

- [1] Alonso, F.E., Gens, A., and Josa, A., "A constitutive model for partially saturated soils.", *Geotechnique*, 40(3), 1990, 405-430.
- [2] Wheeler, S.J., and Sivakumar, "An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil.", *Géotechnique*, 45(1), 1995, 35-53.
- [3] Sun, D.A., Matsuoka, H., Yao, Y.P., and Ichihara, W., "An elastoplastic model for unsaturated soil in three-dimensional stresses.", *Soils and Foundations*, 40(3), 2000, 17-28.
- [4] Wang, Q., Pufahl, D.E., and Fredlund, D.G., "A study of critical state on an unsaturated silty soil.", *Canadian Geotechnical Journal*, 39, 2002, 213-218.
- [5] Houston, S. L., Houston, W. N., Zapata, C. E., Lawrence, C., "Geotechnical Engineering Practice for Collapsible Soils.", *Geotechnical and Geological Engineering*, 19, 2001, 333-355.
- [6] Leonards, G. A., and Narain, J., "Flexibility of clay and cracking of earth dams.", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 89(2), 1963, 47-98.
- [7] Leonards, G. A., and Davidson, L. W., "Reconsideration of failure initiating mechanisms for Teton Dam.", *Proceedings International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, 2, 1984, 1103-1113.
- [8] Pereira, J. H. F., and Fredlund, D. G., "Volume change behavior of collapsible compacted gneiss soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(10), 2000, 907-916.
- [9] Jennings, J. E., Knight, K., "A Guide to construction or with materials exhibiting additional settlement due to collapse of grain structure.", 6th Regional Conference for Africa On Soil Mechanics & Foundation Engineering, Durban, South Africa, September, 1975, 99-105.
- [10] Houston, S.L., "Foundation and pavements on unsaturated soils Part one: collapsible soils.", *Proc. Conf. on Unsaturated Soils*, Paris, E.E. Alonso and P.Delage, eds., 1995, 1421-1439.
- [11] Kato, S., and Kawai, K., "Deformation characteristics of a compacted clay in collapse under

کیلوپاسکال، تحت مسیر تنش دوم با توجه به شکل‌های (۹) الی (۱۴) مشاهده می‌شود اختلاف پتانسیل رهمبندگی بین دو گروه اول و دوم صرف نظر از مسیر تنش با کاهش مکش اولیه، کاهش یافته، به شکلی که در مکش ۵۰ کیلوپاسکال به صفر می‌رسد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت تأثیر میزان تنش انحرافی بر پتانسیل رهمبندگی در مسیر مشخص با افزایش مکش بافتی اولیه، افزایش پیدا می‌کند.

۷- نتیجه گیری

در این پژوهش با انجام آزمایش‌های سه‌محوری غیراشباع به بررسی تأثیر مسیر تنش، مکش بافتی و همچنین، میزان تنش انحرافی بر روی رفتار خاک مورد مطالعه، در فرآیند ترشدگی ناشی از افزایش درصد رطوبت، پرداخته شده است. برای بررسی رفتار خاک، آزمایش‌ها با کنترل مکش بافتی در دو مسیر تنش و دو سطح تنش انحرافی اولیه در مرحله تحکیم قرار گرفته و سپس در معرض افزایش رطوبت قرار داده شده‌اند. همچنین تمامی آزمایش‌ها در حالت تحکیم یافته - زهکشی شده (CD) انجام شده‌اند. از این پژوهش نتایج زیر قابل استخراج است:

۱. تفاوت تغییر شکل به وجود آمده در مرحله تحکیم برای دو مسیر تنش متفاوت، وابسته به مقدار تنش انحرافی است به شکلی که برای تنش انحرافی کم اختلاف ناچیز و برای تنش انحرافی بالا اختلاف زیاد است. همچنین در مرحله تحکیم، کاهش مکش در برابر افزایش تنش همه‌جانبه جبران شده و سبب شده تا مقدار کرنش محوری تقریباً برابر در مکش‌های مختلف را داشته باشیم.

۲. صرف نظر از مسیر تنش و در شرایط تنش k_0 نمونه‌هایی با تنش انحرافی بالاتر، دارای پتانسیل رهمبندگی کم‌تری است. همچنین تأثیر میزان تنش انحرافی بر پتانسیل رهمبندگی در مسیر مشخص با افزایش مکش بافتی، افزایش می‌یابد.

isotropic and triaxial stress state.”, *Soils and Foundations*, 2000, 40(5), 75–90.

[12] Lambe, T.W., “Stress path method.”, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, SM6, 1967, 309-331.

[13] Wood, D.M, “ On stress parametrs.”, *Géotechnique*, 34(2), 1984, 282–287.

[14] Lambe, T.W., and Whitman, R.V., *Soil Mechanics*, Wiley, 1969, 553pp.

[15] Sun, D. A., Matsuoka, H., and Xu, Y. F., “Collapse behavior of compacted clays in suction-controlled triaxial tests.”, *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, 27(4), 2004, 362-370.

[16] Sun, D., Sheng, D., and Xu, Y., “Collapse behaviour of unsaturated compacted soil with different initial densities.”, *Canadian Geotechnical Journal*, 44(6), 2007, 673-686.

[17] Ladd, R. S., “Specimen preparation and liquefaction of sands”, *Journal of Geotechnical Engineering Divition, ASCE*, 100(10), 1974, 1180-1184.

[18] Mulilis, J. P., Arulanandan, K., Mitchell, J. K., Chan, C. K., and Seed, H. B.,” Effects of sample preparation on sand liquefaction”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103(2), 1977, 91-108.

[19] Frost, J. D., and Park, J. Y.,” A critical assessment of the moist tamping technique”, *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, 26(1), 2003, 57-70.

