

EXTENDED ABSTRACT

Effect of Drainage Conditions on the Mechanical Behavior of Firoozkuh No. 161 Sand under Triaxial Tests

Vahid Abazari Oskouei ^a, Masoud Hajjalilue-Bonab ^{b,*}

^aGraduated Student, Department of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

^bProfessor, Department of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Received: 12 October 2025; **Reviewed:** 23 November 2025; **Accepted:** 23 December 2025

Keywords:

Granular soil, Triaxial test, Partial drainage, Shear strength, Critical state, Stress path.

1. Introduction

The investigation of soil stress–strain behavior plays a fundamental role in the stability analysis and settlement prediction of geotechnical structures. Among the influencing factors, drainage conditions are of particular importance; previous studies indicate that soil mechanical behavior following an earthquake cannot be fully represented by the two limiting cases of fully drained or undrained conditions. Instead, it predominantly occurs under partially drained conditions, resulting from the simultaneous changes in pore water pressure and soil volume. The present study was designed to investigate the effect of partial drainage on the monotonic behavior of Firoozkuh No. 161 sand through a series of triaxial compression and extension tests. For analysis, effective stress paths, stress–strain curves, and excess pore water pressure responses obtained under partially drained conditions were compared with those from fully drained and undrained cases. The findings indicate that partial drainage has a significant influence on the shear behavior of sand.

2. Methodology

2.1. Sample preparation method and test procedures

Cylindrical sand specimens with a diameter of 50mm and a height of 100mm were prepared using the dry pluviation method. Following the installation of the triaxial cell, specimen saturation was achieved by sequentially flushing CO₂ and de-aired distilled water through the specimens, followed by the application of the back-pressure technique. The specimens were then isotropically consolidated under a confining pressure of 200kPa. For the subsequent compression and extension shear stages, four drainage conditions were considered: undrained, fully drained, and two bilinear volumetric–shear strain paths representing partially drained conditions with contractive ($\zeta = +0.125$) and expansive ($\zeta = -0.250$) volumetric rates. The overall performance of the electro-mechanical triaxial system is illustrated in Fig. 1.

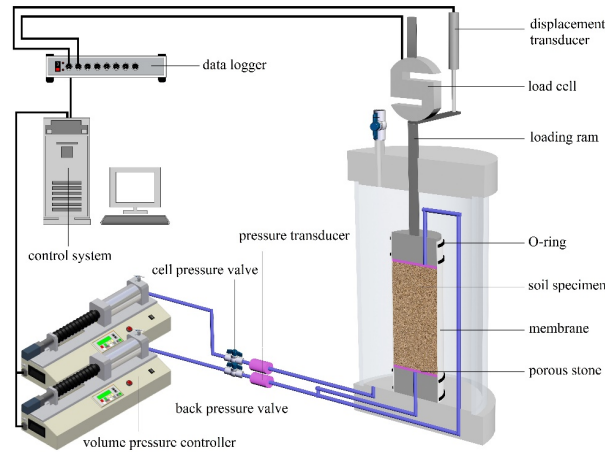


Fig. 1. Schematic illustration of the performance of the electro-mechanical triaxial system

2.2. Shear-volumetric strain paths

To implement the partially drained condition in the triaxial tests, after completion of consolidation and initiation of axial loading, the drainage valve was kept open. Simultaneously, the electromechanical pressure–volume controller connected to the back-pressure line was used to inject or withdraw water at a constant volumetric strain rate ζ until the axial strain reached $\varepsilon_1 = \pm 15\%$. At this point, the drainage valve was closed, and the test continued under undrained conditions until the termination of shearing, ensuring constant specimen volume thereafter, as illustrated in Fig. 2.

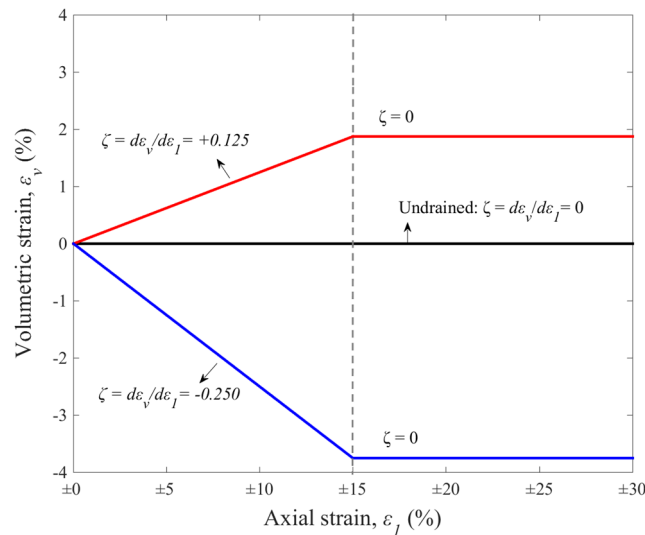


Fig. 2. Bilinear volumetric–shear strain paths applied to specimens in triaxial compression and extension tests

3. Results and discussion

The results of compressive and extension stress paths revealed that all specimens ultimately converged toward a unique Critical State Line (CSL). Nevertheless, pore water pressure response and shear strength were strongly affected by the drainage conditions. Under the contractive relative drainage condition ($\zeta = +0.125$), a substantial reduction in pore water pressure (30% and 54% decrease under compression and extension loading, respectively, compared with undrained tests) and enhanced dilatancy led to an earlier attainment of the peak shear strength, corresponding to an approximate 38% increase in strength relative to the undrained condition (Fig. 3). Conversely, the expansive partial drainage path ($\zeta = -0.250$), associated with increased porosity and the buildup of excess pore pressure, resulted in a pronounced reduction in stiffness and strength.

This effect was particularly evident under extension loading, where shear strength dropped by nearly 63% compared with the undrained case, causing the specimen to exhibit fully contractive behavior approaching liquefaction.

Post-test observations further demonstrated that the failure mode was directly influenced by the drainage condition. Contractive relative drainage in both loading modes induced a distinct shear-type failure. In contrast, under dilative drainage, the specimen subjected to compression exhibited a barrel-shaped failure, whereas the extension-loaded specimen showed no well-defined failure pattern due to instability.

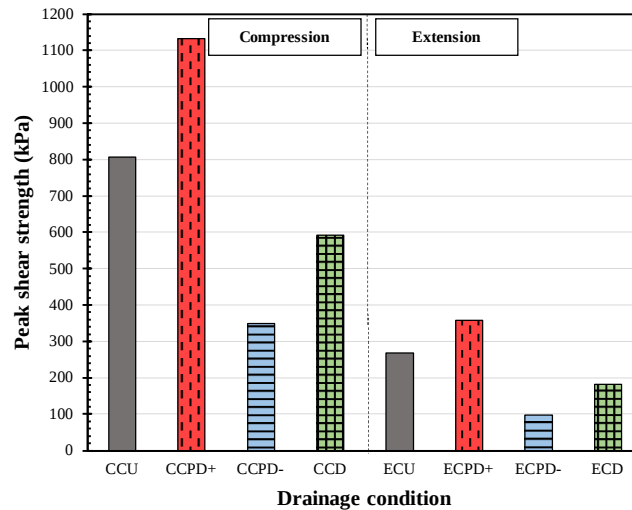


Fig. 3. Comparison of peak shear strength in triaxial compression and extension tests of sand specimens under different drainage conditions

4. Conclusions

The results of triaxial compression and extension tests under a constant confining pressure of 200kPa indicated that volumetric–shear strain paths had only a negligible effect on the critical state friction angle of sand. However, the strength behavior of the soil was significantly altered. The application of contractive partial drainage (water withdrawal at a rate of $\zeta = +0.125$) effectively controlled excess pore water pressure generation, leading to enhanced strain-hardening compared with both undrained and fully drained conditions, and resulted in the highest shear strength. In contrast, under expansive partial drainage conditions (water injection at a rate of $\zeta = -0.250$), the buildup of pore water pressure promoted contractive behavior. This effect was particularly evident under extension loading, where the continuous reduction in mean effective stress triggered strain-softening at relatively small strains, thereby increasing the potential for liquefaction.

تأثیر شرایط زهکشی بر رفتار مکانیکی ماسه شماره 161 فیروزکوه تحت آزمایش‌های سه‌محوری

وحید ابادری اسکونی¹، مسعود حاجی‌علیلوی بناب^{2*}

¹ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز
² استاد گروه ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

دریافت: 1404/7/20، بازنگری: 1404/9/2، پذیرش: 1404/10/2، نشر آنلاین: 1404/10/2

چکیده

رفتار تنش- کرنش خاک‌ها نقش اساسی در تحلیل پایداری و پیش‌بینی نشست سازه‌های ژئوتکنیکی دارد و شرایط زهکشی در این میان اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. پس از رخداد زلزله، معمولاً شرایط کاملاً زهکشی‌شده یا زهکشی‌نشده در طبیعت حاکم نیست؛ زیرا خاک‌های دانه‌ای به‌دلیل نفوذپذیری بالا مستعد تغییرات حجمی بوده و اغلب از یک رفتار نسبتاً زهکشی‌شده پیروی می‌کنند. با وجود این، اثر چنین شرایطی هنوز در مطالعات ژئوتکنیکی به‌طور کامل درک نشده است. این پژوهش، به بررسی اثر مسیرهای کرنش برشی- حجمی کنترل‌شده بر رفتار مونتونیک ماسه شماره 161 فیروزکوه پرداخته است. بدین‌منظور، آزمایش‌های سه‌محوری فشاری و کششی اشباع در چهار حالت کاملاً زهکشی‌شده، زهکشی‌نشده و دو حالت نسبتاً زهکشی‌شده با نرخ کرنش حجمی انقباضی و انبساطی انجام شد. نتایج نشان داد که زاویه اصطکاک مؤثر بحرانی مستقل از شرایط زهکشی بوده و تقریباً ثابت باقی می‌ماند. با این‌حال، پاسخ فشار آب حفره‌ای و مقاومت برشی به‌شدت تحت تأثیر شرایط زهکشی قرار گرفت. در حالت زهکشی نسبی انقباضی، کاهش قابل توجه فشار آب حفره‌ای و بهبود سخت‌شوندگی کرنشی موجب دستیابی نمونه‌ها به بیشترین مقاومت برشی شد. در مقابل، مسیر زهکشی نسبی انبساطی با افزایش تخلخل و تجمع فشار آب حفره‌ای، افت چشمگیری در سختی و مقاومت ایجاد کرد؛ به‌ویژه در بارگذاری کششی که نمونه رفتاری کاملاً انقباضی و نزدیک به روانگرایی بروز داد. در مجموع، یافته‌ها نشان می‌دهند که کنترل زهکشی می‌تواند نقش کلیدی در بهبود پایداری شیب‌های ماسه‌ای ایفا کند.

کلیدواژه‌ها: خاک دانه‌ای، آزمایش سه‌محوری، زهکشی نسبی، مقاومت برشی، حالت بحرانی، مسیر تنش.

1- مقدمه

Lashkari و همکاران، 2007؛ Logeswaran و Sivathayalan و همکاران،

Zürn و همکاران، 2021؛ (2024).

در مهندسی ژئوتکنیک کلاسیک، معمولاً فرض می‌شود که رفتار مکانیکی خاک در یکی از دو حالت حدی کاملاً زهکشی‌شده یا زهکشی‌نشده قرار دارد. با این‌حال، این فرض در بسیاری از شرایط میدانی معتبر نیست؛ زیرا تحقق آن به همگنی خاک و یکنواختی فشار آب حفره‌ای در سراسر المان‌های خاک وابسته است (Logeswaran و Sivathayalan، 2007؛ Lashkari و Yaghtin، 2018). علاوه بر این، شرایط واقعی به‌شدت تحت تأثیر نفوذپذیری خاک، مرزهای زهکشی و نرخ بارگذاری قرار دارد (Chen و همکاران، 2020).

بررسی رفتار تنش- کرنش خاک‌ها نقش بنیادی در تحلیل پایداری و پیش‌بینی نشست سازه‌های ژئوتکنیکی ایفا می‌کند. این رفتار در خاک‌های اشباع، غیرخطی و غیرالاستیک بوده و به عواملی همچون تاریخچه تنش، مسیر تنش و مسیر کرنش بستگی دارد (Gananathan و همکاران، 2002).

در جریان اعمال بار، پاسخ تنش و کرنش در یک المان خاک اشباع، تحت تأثیر ویژگی‌های فیزیکی خاک و شرایط محیطی قرار می‌گیرد. در این میان، شرایط زهکشی اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا تغییرات هم‌زمان فشار حفره‌ای و حجم خاک، به‌طور اجتناب‌ناپذیری بر الگوی کرنش و مسیر تنش تأثیرگذار است



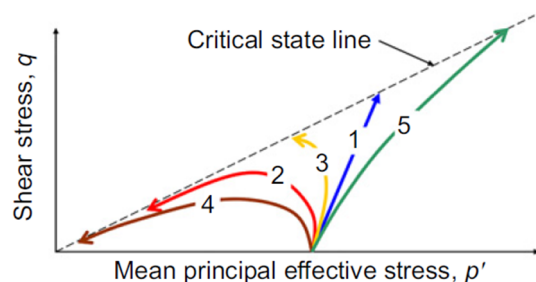
با انجام آزمایش‌های سه‌محوری فشاری بر روی ماسه سست Fraser، مسیرهای تنش متناظر با مسیرهای کرنش احتمالی را در پنج حالت شناسایی کردند (شکل 1):

مسیر 1، مربوط به رفتار کاملاً زهکشی شده که در آن نمونه در فشار آب حفره‌ای ثابت، دچار تغییر حجم می‌شود.
مسیر 2، رفتار زهکشی نشده‌ای است که با بستن شیر زهکشی، تغییر شکل در حجم ثابت اتفاق می‌افتد.

مسیر 3، بیانگر شرایط زهکشی نسبی است و مسیر تنش آن بین دو مسیر قبلی (مسیر 1 و 2) قرار دارد. این حالت در طبیعت در اثر بارگذاری سریع بر روی خاک‌های دانه‌ای اتفاق می‌افتد (Logeswaran و Sivathayalan، 2008).

مسیر 4، یعنی زهکشی انبساطی، نشانگر وضعیتی است که فشار آب حفره‌ای بالاتری در خاک اطراف حاکم است و باعث جریان یافتن آب به داخل المان خاک شده و موجب انبساط حجمی شود. این حالت می‌تواند منجر به کاهش مقاومت برشی خاک و افزایش آسیب‌پذیری آن در برابر روانگرایی جریان گردد (Yamamoto و همکاران، 2009؛ Eliadorani، 2000؛ Lashkari و Yaghtin، 2018).

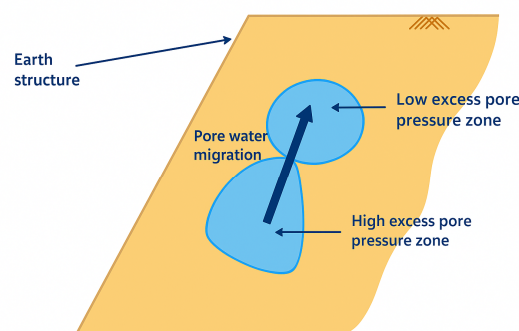
مسیر 5، زهکشی بیش از حد رخ می‌دهد؛ زیرا فشار منفذی پایین‌تر در مرز، باعث خروج آب از المان خاک شده و منجر به تغییر حجم بیشتری نسبت به حالت زهکشی شده (مسیر 1) می‌گردد. با این وجود، مسیرهای 3 تا 5 را می‌توان به‌عنوان شرایط زهکشی نسبی تلقی کرد؛ چراکه در آن‌ها تغییرات هم‌زمان فشار حفره‌ای و حجم نمونه مجاز است (Vaid و Eliadorani، 1998؛ Tohidvand و همکاران، 2023).



شکل 2- شماتیک مسیرهای تنش مؤثر سه‌محوری فشاری تحت شرایط زهکشی مختلف (Lashkari و Yaghtin، 2018)

با مرور تحقیقات پیشین، تأثیر زهکشی نسبی بر رفتار مکانیکی ماسه همچنان با محدودیت‌هایی مواجه است. مطالعه حاضر با هدف بررسی اثر زهکشی نسبی بر رفتار مونوتونیک ماسه فیروزکوه شماره 161 طراحی شده است. در این راستا، آزمایش‌های سه‌محوری فشاری و کششی با در نظر گرفتن مسیرهای کرنش دوخطی برشی- حجمی شامل نرخ انبساطی و

در رویدادهای زلزله یا عبور ترافیک، به دلیل مدت‌زمان کوتاه بارگذاری، رفتار خاک‌ها اغلب زهکشی نشده در نظر گرفته می‌شود (Sivathayalan و Logeswaran، 2008؛ Yamamoto و همکاران، 2009). با این حال، خاک‌های دانه‌ای به دلیل نفوذپذیری نسبتاً بالا، مستعد تغییرات حجمی هستند (Zhu و همکاران، 2023؛ Abazari Oskouei و همکاران، 2025). این تغییرات موجب مهاجرت آب حفره‌ای از نواحی پرفشار به کم‌فشار شده و باعث بازتوزیع فضای خالی و تغییر شکل برشی می‌شود (Sivathayalan و Logeswaran، 2007؛ Adamidis و Madabhushi، 2018؛ Lashkari و همکاران، 2021). فرایندی که حتی پس از پایان زلزله نیز ممکن است ادامه یابد (شکل 1)، این وضعیت که تحت عنوان «شرایط نسبتاً زهکشی شده» شناخته می‌شود (Vaid و Eliadorani، 1998)، حالتی بین دو رفتار حدی زهکشی شده و زهکشی نشده است. بنابراین، در نظر گرفتن سطح مناسبی از زهکشی در طراحی می‌تواند به بهبود ایمنی و کارایی اقتصادی پروژه‌های ژئوتکنیکی کمک کند (Logeswaran، 2005).



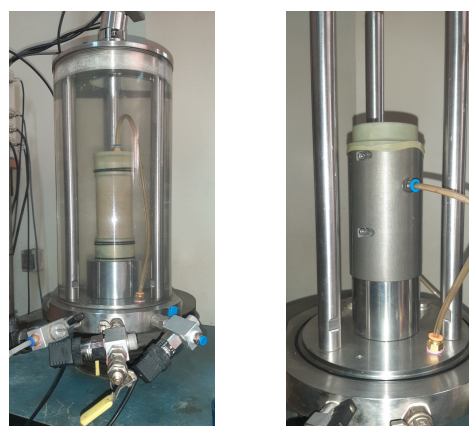
شکل 1- شماتیک مهاجرت آب حفره‌ای ناشی از گرادان هیدرولیکی در شیب

تحقیقات متعددی با هدف شبیه‌سازی آزمایشگاهی اثر زهکشی نسبی صورت گرفته است (Umehara و همکاران، 1985؛ Vaid و Eliadorani، 1998؛ Vaid و Eliadorani، 2000؛ Logeswaran، 2005؛ Maleki Tabrizi و همکاران، 2023؛ Tohidvand و همکاران، 2023؛ Zörn و همکاران، 2024). این پژوهش‌ها نشان می‌دهند که مسیرهای کرنش ثابت یا غیرخطی می‌تواند جهت افزایش کرنش و تنش را تغییر دهد. افزون بر این، مطالعات عددی با روش عناصر گسسته (DEM) نشان داده است که زهکشی نسبی می‌تواند مقاومت برشی را افزایش داده و از بروز روانگرایی در ماسه‌های سست جلوگیری کند (Salomon و همکاران، 2025).

در مطالعات اولیه، Sivathayalan و Logeswaran (2007)

طریق هوا ته‌نشین می‌شوند.

برای قالب‌بندی نمونه‌ها، از غشای لاستیکی با ضخامت 0/6 میلی‌متر استفاده گردید. این غشا با مکش ایجادشده توسط پمپ وکیوم به دیواره قالب چسبانده شد تا پایداری ساختار نمونه تضمین شود (شکل (5-الف)). سپس ماسه خشک توسط یک قیف آزمایشگاهی درون قالب سه‌محوری رسوب داده شد تا دانسیته نسبی هدف برابر 40% (معادل با نسبت تخلخل 0/78) حاصل گردد. به‌منظور ایجاد شرایط زهکشی مناسب، یک سنگ متخلخل و کاغذ صافی در بالا و پایین نمونه قرار داده شد. همچنین، برای تضمین پایداری نمونه و جلوگیری از ریزش، طی فرآیند برداشتن قالب از فشار خلأ معادل 20 کیلوپاسکال استفاده گردید.



(ب)

(الف)

شکل 5- الف) قالب‌بندی نمونه، ب) اعمال فشار محصورکننده

4-2- روش انجام آزمایش سه‌محوری

سلول پلکسی‌گلاس با ظرفیت 600 کیلوپاسکال بر روی دستگاه نصب و با آب مقطر پر شد (شکل (5-ب)). فشار سلول و پس‌فشار به ترتیب روی 60 و 50 کیلوپاسکال توسط سیستم کنترل فشار- حجم الکترومکانیکی تنظیم گردید. اختلاف 10 کیلوپاسکال میان این دو فشار به حفظ پایداری نمونه‌ها کمک می‌کرد.

کلیه نمونه‌ها در شرایط اشباع مورد آزمایش قرار گرفتند ($B_{Skempton} \geq 0.95$). فرآیند اشباع‌سازی شامل عبور دادن گاز دی‌اکسیدکربن (CO_2) و سپس آب مقطر بدون هوا (به‌میزان سه برابر حجم نمونه) از پایین نمونه به‌سمت بالا انجام شد. به‌منظور بهبود درصد اشباع، از روش پس‌فشار استفاده شد (Ampadu و Tatsuoka, 1993)؛ مقدار این فشار تا پیش از مرحله تحکیم به 190 کیلوپاسکال افزایش یافت. پیش از شروع مرحله برش، نمونه‌ها به‌صورت همسانگرد در محفظه سه‌محوری با اعمال فشار تحکیمی 200 کیلوپاسکال تحکیم یافتند. این مرحله در زمانی متوقف شد که تغییرات حجم نمونه به وضعیت نسبتاً ثابت رسید

(Dai و همکاران، 1999).

پس از اتمام مرحله تحکیم، به‌منظور بررسی رفتار مونوتونیک نمونه‌های ماسه‌ای تحت بارگذاری فشاری و کششی، چهار حالت مختلف زهکشی برای مرحله برش در نظر گرفته شد:

- شرایط زهکشی‌نشده (CU): بسته نگه‌داشتن شیر زهکشی.
- شرایط کاملاً زهکشی‌شده (CD): باز بودن شیر زهکشی.
- شرایط نسبتاً زهکشی‌شده انبساطی (CPD-): باز بودن شیر همراه با تزریق آب به داخل نمونه ($\zeta = -0.250$).
- شرایط نسبتاً زهکشی‌شده انقباضی (CPD+): باز بودن شیر همراه با استخراج آب از داخل نمونه ($\zeta = +0.125$).

در آزمایش‌های زهکشی‌نشده و نسبتاً زهکشی‌شده، نمونه‌ها به‌صورت کرنش- کنترل با نرخ جابه‌جایی 0/5 میلی‌متر بر دقیقه (معادل 0/5 درصد کرنش محوری در دقیقه) برش داده شدند؛ به‌منظور حفظ شرایط آزمایش در محدوده نرخ کرنش‌های شبه‌استاتیکی زلزله‌ای، درمقابل، در شرایط کاملاً زهکشی‌شده، نرخ جابه‌جایی برابر با 0/2 میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شد. برای آزمایش‌های سه‌محوری فشاری، فرآیند بارگذاری تا رسیدن کرنش محوری به 30% ادامه یافت. در حالی که کرنش محوری 15%- برای آزمایش‌های کششی به‌منزله اتمام برش در نظر گرفته شد. برنامه آزمایش‌های فشاری و کششی در جدول (2) ارائه شده است.

جدول 2- برنامه آزمایش‌های سه‌محوری فشاری و کششی تحت

فشار محصورکننده 200 کیلوپاسکال

نام آزمایش	بارگذاری	نوع شرایط زهکشی	ζ^*	e_0
CCU	فشاری	زهکشی نشده	0/000	0/768
CCPD+		نسبتاً زهکشی شده	+0/125	0/766
CCPD-		نسبتاً زهکشی شده	-0/250	0/755
CCD		زهکشی شده	-	0/765
ECU	کششی	زهکشی نشده	0/000	0/769
ECPD+		نسبتاً زهکشی شده	+0/125	0/770
ECPD-		نسبتاً زهکشی شده	-0/250	0/771
ECD		زهکشی شده	-	0/768

* نمو کرنش حجمی؛ e_0 ، نسبت تخلخل پس از تحکیم

4-2-1- مسیرهای کرنش برشی - حجمی کنترل شده

در این پژوهش، به‌منظور بررسی اثر شرایط زهکشی نسبی بر رفتار برشی ماسه، از رویکرد مسیر کرنش دوخطی ارائه‌شده توسط Sivathayalan و Logeswaran (2008)، استفاده شد. این رویکرد به درک زهکشی نسبی کمک می‌کند؛ زیرا در شرایط واقعی، مهاجرت فشار آب حفره‌ای درون توده خاک، تحت تأثیر گرادیان هیدرولیکی، به‌تدریج کاهش می‌یابد تا زمانی که به صفر رسیده و نمونه شرایط زهکشی‌نشده را تجربه کند. در این روش، در مرحله اول، کرنش حجمی (ε_v) از ابتدای بارگذاری تا رسیدن

3- نتایج و بحث

به‌منظور بررسی رفتار مونوتونیک نمونه‌های بازسازی‌شده ماسه فیروزکوه شماره 161، آزمایش‌های سه‌محوری فشاری و کششی اشباع تحت فشار محصورکننده ثابت 200 کیلوپاسکال در چهار حالت زهکشی متفاوت شامل شرایط زهکشی‌نشده، کاملاً زهکشی‌شده و دو حالت نسبتاً زهکشی‌شده با نرخ انقباضی $(\zeta=+0.125)$ و انبساطی $(\zeta=-0.250)$ انجام شد. نتایج حاصل، با تمرکز بر مسیرهای تنش مؤثر، منحنی‌های تنش- کرنش، تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای و پاسخ‌های کرنش حجمی در بخش‌های زیر تحلیل شدند.

3-1- مسیرهای تنش مؤثر فشاری و کششی

شکل (7)، مسیرهای تنش مؤثر (صفحه $q-p'$) نمونه‌ها را برای آزمایش‌های فشاری و کششی نشان می‌دهد که براساس متغیرهای معرفی شده توسط Roscoe و همکاران (1958)، با استفاده از روابط (2) و (3) محاسبه شده‌اند:

$$q = \sigma'_1 - \sigma'_3 \quad (2)$$

$$p' = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3 \quad (3)$$

مسیرهای تنش نمونه‌ها در نهایت به یک خط حالت بحرانی (CSL) همگرا شدند (شکل (7)) که مقدار شیب این خط از رابطه (4) برای مسیرهای فشاری و کششی به ترتیب برابر $1/39$ و $0/96$ به‌دست آمد:

$$M = q/p' \quad (4)$$

این مقادیر، متناظر با زاویه اصطکاک مؤثر بحرانی (ϕ'_{CSL}) برای مسیرهای فشاری و کششی به ترتیب برابر با $34/5^\circ$ و 35° محاسبه شدند و با گزارشات مطالعه Farahmand و همکاران (2016) بر روی خصوصیات مکانیکی ماسه فیروزکوه شماره 161 سازگاری دارد. همچنین مشخص شد که مسیرهای کرنش نسبتاً زهکشی‌شده تأثیری بر ϕ'_{CSL} - به‌عنوان یک پارامتر ذاتی خاک- ندارند؛ یافته‌ای که توسط مطالعات قبلی (مانند: Eliadorani, 2000; Sivathayalan و Logeswaran, 2008; Maleki Tabrizi و همکاران, 2023) تأیید می‌شود و دقت و تکرارپذیری آماده‌سازی نمونه‌ها را در این پژوهش بازتاب می‌کند. در آزمایش‌های زهکشی‌نشده، نمونه‌ها در ابتدا رفتاری انقباضی (بدلیل تولید فشار آب حفره‌ای) همراه با کاهش تنش مؤثر میانگین نشان دادند که در مسیر کششی بارزتر بود (شکل (7-ب)). سپس با وقوع یک انتقال فاز، تمایل به اتساع آشکاری مشاهده شد تا نهایتاً در نقطه تنش انحرافی اوج (q_{peak}) به‌حالت بحرانی رسیدند. بااین‌حال هنگامی که نمونه‌ها در معرض شرایط

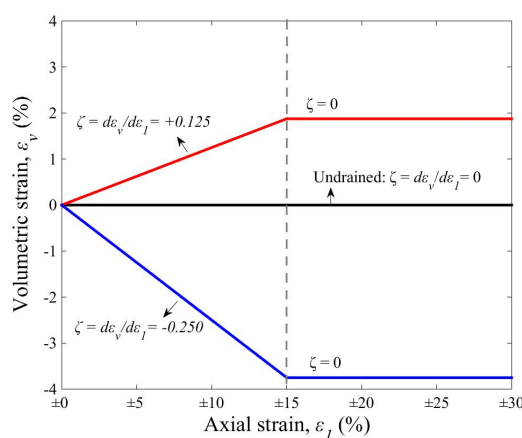
به کرنش محوری (ε_1) موردنظر، به‌صورت خطی و با نرخ ثابت از طریق رابطه (1) تغییر می‌یابد:

$$\zeta = d\varepsilon_v/d\varepsilon_1 \quad (1)$$

مقدار $\zeta > 0$ ، نشان‌دهنده مسیر انقباضی (استخراج آب از نمونه) و مقدار $\zeta < 0$ ، بیانگر مسیر انبساطی (تزریق آب به نمونه) است. پس از رسیدن به کرنش محوری مشخص، در مرحله دوم کرنش حجمی ثابت نگه داشته می‌شود ($d\varepsilon_v = 0$).

به‌منظور اجرای این فرایند در آزمایش سه‌محوری، پس از تکمیل مرحله تحکیم و با آغاز بارگذاری محوری، شیر زهکشی باز نگه داشته شد و به‌صورت هم‌زمان، با استفاده از دستگاه کنترل فشار- حجم الکترومکانیکی که به شیر پس‌فشار متصل بود، امکان تزریق یا استخراج آب با نرخ ζ تا رسیدن به $\varepsilon_1 = \pm 15\%$ فراهم گردید (مرحله اول). سپس شیر زهکشی بسته شد و آزمایش تحت شرایط زهکشی‌نشده تا پایان برش ادامه یافت؛ به‌گونه‌ای که حجم نمونه در ادامه ثابت باقی ماند (مرحله دوم).

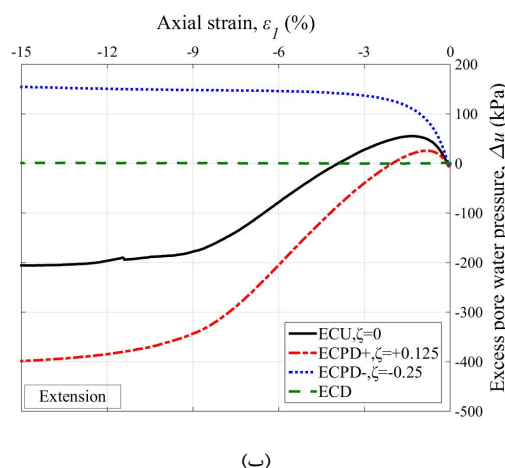
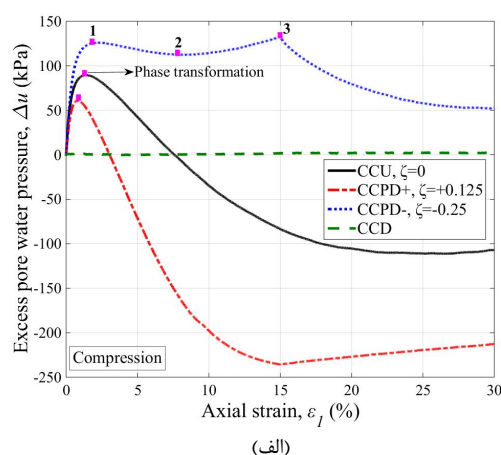
در این تحقیق، برای آزمایش‌های فشاری و کششی نسبتاً زهکشی‌شده، مقدار $\zeta = +0.125$ برای مسیر انقباضی و $\zeta = -0.250$ برای مسیر انبساطی در نظر گرفته شد. شایان ذکر است که در آزمایش‌های زهکشی‌نشده متداول، که در آن‌ها هیچ‌گونه تغییر حجمی مجاز نیست، مقدار ζ برابر صفر است. همچنین در آزمایش‌های کششی، مسیرهای کرنش نسبتاً زهکشی‌شده به‌صورت خطی دنبال شدند؛ چرا که تحت برش کششی، تمامی نمونه‌ها پیش از رسیدن به کرنش محوری 15%- به حالت بحرانی رسیده و آزمایش خاتمه یافت. مسیرهای کرنش برشی- حجمی تعریف‌شده در این مطالعه برای آزمایش‌های سه‌محوری فشاری و کششی، در شکل (6) نمایش داده شده است.



شکل 6- مسیرهای کرنش برشی- حجمی اعمال‌شده به نمونه‌ها در آزمایش‌های سه‌محوری فشاری و کششی

2-3- پاسخ اضافه فشار آب حفره‌ای

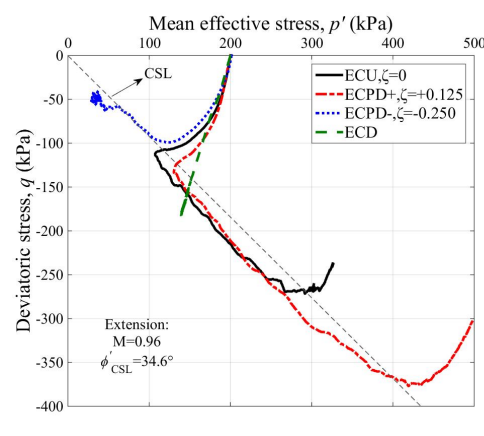
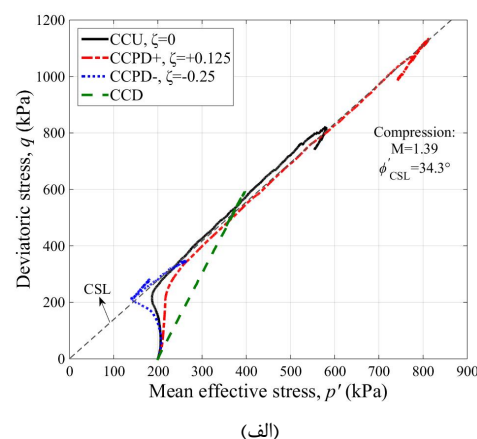
منحنی‌های تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای طی آزمایش‌های فشاری و کششی به‌ترتیب در شکل (8-الف) و (8-ب) نمایش داده شده‌اند؛ به‌طوری‌که افزایش فشار آب حفره‌ای نشان‌دهنده تمایل نمونه به انقباض (کاهش حجم) و کاهش فشار بیانگر تمایل به اتساع (افزایش حجم) است.



شکل 8- منحنی‌های اضافه فشار آب حفره‌ای - کرنش محوری حاصل از آزمایش‌های سه‌محوری تحت شرایط زهکشی مختلف در فشار محصورکننده 200 کیلوپاسکال؛ الف) بارگذاری فشاری، ب) بارگذاری کششی.

نتایج نشان داد که اوج فشار آب حفره‌ای مربوط به نقطه انتقال فاز (از رفتار انقباضی به اتساعی) در آزمایش‌های فشاری همواره بالاتر از مقادیر حاصل از آزمایش‌های کششی قرار دارد. برای مثال، در شرایط زهکشی‌نشده، نمونه تحت بارگذاری فشاری حدود 60% فشار اوج بیشتری را نسبت به حالت کششی تجربه کرد. این موضوع نشان می‌دهد که ذرات ماسه در بارگذاری فشاری تمایل بیشتری به انقباض دارند، در حالی که در بارگذاری کششی، تمایل به اتساع غالب است؛ نتیجه‌ای که با گزارش‌های Eliadorani

زهکشی نسبی انقباضی با نرخ $\zeta=+0.125$ قرار گرفتند، بخش بزرگی از رفتار انقباضی مهار شد؛ به‌گونه‌ای که مسیر تنش در موقعیتی بین شرایط کاملاً زهکشی‌شده و زهکشی‌نشده قرار گرفت و اتساع بیشتری را نسبت به شرایط زهکشی‌نشده بروز داد. این موضوع ناشی از اجازه استخراج تدریجی آب و تعدیل فشار حفره‌ای بود که سبب شد ماسه در سطح مقاومت بالاتری به حالت بحرانی برسد (Eliadorani, 2000). در مقابل، در شرایط زهکشی نسبی انقباضی ($\zeta=-0.25$)، کاهش تنش مؤثر میانگین شدیدتر از سایر حالت‌ها بود. این سست‌شدگی، ناشی از افزایش تخلخل در اثر ورود آب به نمونه است که ناحیه انقباضی را گسترش می‌دهد و در نتیجه باعث کاهش تحمل بار می‌شود، به‌ویژه در بارگذاری کششی، این اثر آشکارتر بوده و نمونه تقریباً رفتاری کاملاً انقباضی از خود نشان داد (شکل (7-ب)). چنین پاسخی می‌تواند پتانسیل روانگرایی استاتیکی را وسعت بخشیده و از منظر پایداری نگران‌کننده باشد (Eliadorani, 2000; Sivathayalan, 2008; Logeswaran, 2008; Yaghtin, 2018; Salomon, 2018 و همکاران, 2025).



(ب)

شکل 7- مسیرهای تنش مؤثر آزمایش‌های سه‌محوری تحت شرایط زهکشی مختلف در فشار محصورکننده 200 کیلوپاسکال؛ الف) بارگذاری فشاری، ب) بارگذاری کششی

(2000) سازگار است.

اعمال نرخ کرنش حجمی انقباضی ($\zeta = +0.125$) موجب شد نقطه انتقال فاز در کرنش‌های محوری پایین‌تری ظاهر شود (در $\varepsilon_1 = \pm 0.8\%$ برای هر دو نوع بارگذاری). این یافته مشابه با نتایج Ganathan (2002) است. در این حالت، تولید فشار آب حفره‌ای به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافت؛ به‌طوری که فشار اوج نسبت به حالت زهکشی‌نشده حدود 30% در بارگذاری فشاری و 54% در بارگذاری کششی کمتر بود. در نتیجه، نمونه‌ها با نرخ اتساع بیشتری نسبت به سایر شرایط، زودتر به حالت بحرانی رسیدند؛ در بارگذاری فشاری هم‌زمان با پایان مرحله اول مسیر دوخطی (کرنش محوری 15%) و در بارگذاری کششی در کرنش حدود 9%- همچنین در این شرایط از زهکشی، اختلاف بین اضافه فشارهای آب حفره‌ای اوج و حالت بحرانی، بیشترین مقدار بود. بنابراین، حتی اعمال نرخ‌های انقباضی کمتر نیز می‌تواند فشار آب حفره‌ای را به‌شدت کاهش دهد و در پی آن سختی ماسه و پایداری بهبود یابد (Gananathan, 2002). این نتیجه منطقی است، چرا که استخراج آب از نمونه، فضای خالی را کاهش داده و ذرات ماسه در ادامه تحت اثر اتساع تمایل به افزایش حجم پیدا می‌کنند. علاوه بر این، نمونه‌ها سریع‌تر به مقدار فشار آب حفره‌ای پیش از برش بازگشتند (یعنی نقطه $\Delta u = 0$)؛ در کرنش محوری حدود 3% در حالت فشاری و 2%- در حالت کششی. از این روند برمی‌آید که با افزایش نرخ استخراج آب، فشار آب مثبت سریع‌تر از بین رفته و نمونه از همان آغاز برش رفتاری کاملاً اتساعی پیدا می‌کند؛ حالتی که به‌عنوان زهکشی بیش از حد شناخته می‌شود (Sivathayalan و Logeswaran, 2007؛ Lashkari و Yaghtin, 2018).

در آزمایش‌های زهکشی نسبی انبساطی، منحنی اضافه فشار آب حفره‌ای همواره بالاتر از حالت زهکشی‌نشده قرار داشت ($\Delta u > 0$)، به‌طوری که هیچ‌گاه به فشار اولیه پیش از بارگذاری فشاری و کششی بازنگشت (شکل (8-الف) و (8-ب)). در بارگذاری فشاری، سه انتقال فاز مشاهده شد (شکل (8-الف)): رفتار انقباضی $\leftarrow$ اتساعی $\leftarrow$ انقباضی $\leftarrow$ اتساعی.

- نقطه انتقال فاز اول در $\varepsilon_1 = +2.3\%$ رخ داد، جایی که فشار آب حفره‌ای حدود 40% بالاتر از نقطه اوج زهکشی‌نشده ($\varepsilon_1 = +1.4\%$) بود.

- انتقال فاز دوم (در $\varepsilon_1 = +8.5\%$)، در اثر غلبه حجم آب تزریق‌شده بر میزان تمایل ذاتی ماسه به اتساع اتفاق افتاد. این پدیده، عمدتاً به نرخ بالای تزریق (یعنی $\zeta = -0.250$) نسبت داده می‌شود.

- انتقال فاز سوم، ناشی از به‌کارگیری رویکرد مسیر کرنش دوخطی اتخاذ شده در این آزمایش است که هم‌زمان با اعمال شرایط حجم ثابت ($\varepsilon_v = -3.75\%$) رخ می‌دهد (شکل (6)). در

این وضعیت، خاک بلافاصله پس از ثابت نگه‌داشتن حجم در کرنش محوری 15%، وارد فاز اتساع شده و با روندی مشابه رفتار زهکشی‌نشده، تا رسیدن به حالت بحرانی در کرنش محوری 26% ادامه یافت.

در بارگذاری کششی (شکل (8-ب))، نمونه رفتاری کاملاً انقباضی از خود نشان داد و هیچ‌گونه انتقال فازی مشاهده نشد. در این شرایط، تزریق مداوم آب موجب افزایش تخلخل و در نتیجه رشد پیوسته فشار آب حفره‌ای تا کرنش محوری حدود 3%- شد. پس از آن، فشار حفره‌ای در سطحی پایدار و نزدیک به 150 کیلوپاسکال تثبیت گردید. با توجه به فشار محصورکننده 200 کیلوپاسکال، می‌توان نتیجه گرفت که نمونه به‌تدریج به آستانه روانگرایی استاتیکی نزدیک می‌شود؛ پدیده‌ای که افزایش نرخ تزریق، وقوع آن را محتمل‌تر می‌سازد (Salomon و همکاران، 2025؛ Oskouei و همکاران، 2025).

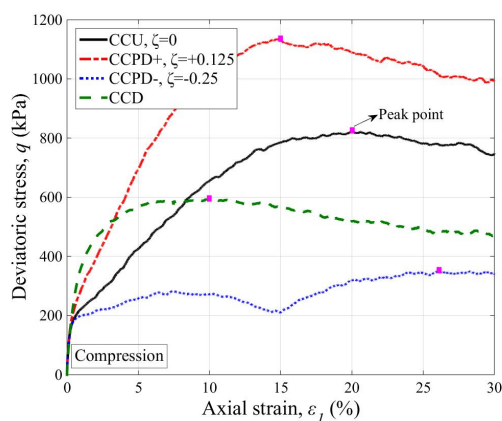
3-3- تغییرات کرنش حجمی

تکامل کرنش حجمی - کرنش محوری حاصل از آزمایش‌های فشاری و کششی به ترتیب در شکل (9-الف) و (9-ب) ارائه شده است. افزایش کرنش حجمی به‌منزله کاهش حجم است و کاهش آن بیانگر اتساع حجمی است.

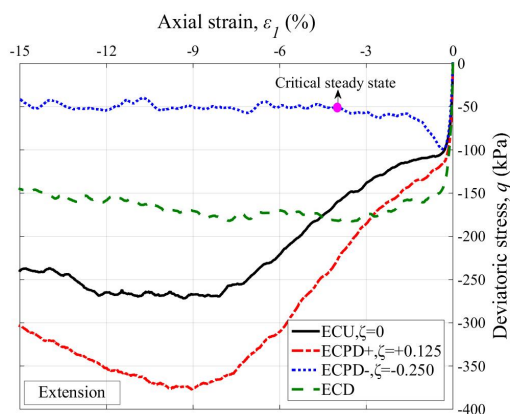
در آزمایش‌های زهکشی‌شده تحت هر دو نوع بارگذاری، نمونه‌ها ابتدا در اثر تراکم ذرات و نزدیک‌شدن دانه‌ها رفتار انقباضی نشان دادند، سپس با بازآرایی ذرات در امتداد صفحه گسیختگی، به‌تدریج وارد فاز اتساعی شده و درنهایت در حالت بحرانی (ε_v) تقریباً ثابت در کرنش‌های بالا) پایدار شدند. این ویژگی، نشان‌دهنده رفتار یک ماسه متراکم است (Logeswaran, 2005). نقطه انتقال فاز در بارگذاری فشاری ($\varepsilon_v = +0.49\%$) بالاتر از بارگذاری کششی ($\varepsilon_v = +0.2\%$) بود که نشان می‌دهد در حالت کشش، نرخ کاهش حجم کمتر و اتساع زود هنگام‌تر است. همچنین، نمونه فشاری در کرنش محوری بالاتری نسبت به نمونه کششی (حدود دو برابر افزایش کرنش) به حجم اولیه خود بازگشت.

در آزمایش‌های زهکشی نسبی، تغییرات کرنش حجمی به‌صورت کنترل‌شده با نرخ ثابت انقباض یا انبساط (بسته به نوع مسیر کرنش) تا رسیدن به کرنش محوری $\pm 15\%$ ادامه یافت و سپس ثابت نگه داشته شد. این رویکرد، تکامل هم‌زمان فشار حفره‌ای و تغییر شکل حجمی را در طول برش امکان‌پذیر ساخت. در مسیر زهکشی نسبی انبساطی ($\zeta = -0.250$)، حجم نمونه تا رسیدن به نقطه $\varepsilon_v = -3.750\%$ به‌طور پیوسته افزایش یافت، در حالی که در مسیر انقباضی ($\zeta = +0.125$) استخراج آب موجب کاهش حجم تا $\varepsilon_v = +1.875\%$ شد. در بارگذاری فشاری (شکل

انحرافی اوج گردید؛ یافته‌ای که با نتایج مطالعه Salomon و همکاران (2025) مطابقت دارد. در بارگذاری فشاری، نمونه CCPD+ در اثر تراکم بالای نمونه ناشی از استخراج آب، هم‌زمان با توقف تغییر شکل حجمی، به نقطه اوج رسید و با طی کرنش محوری کمتری نسبت به سایر شرایط به حالت بحرانی دست یافت (در کرنش محوری 15%).



(الف)

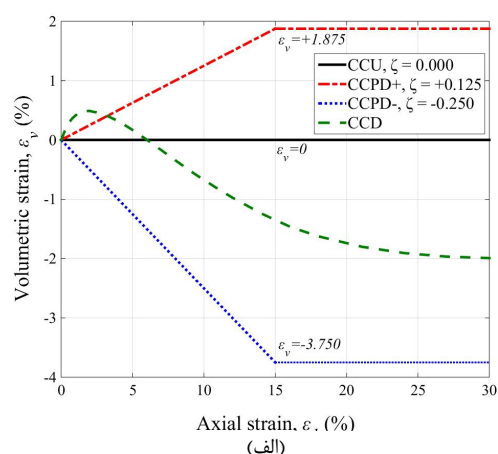


(ب)

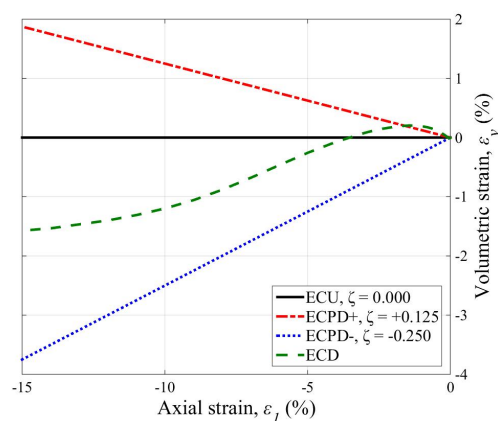
شکل 10- منحنی‌های تنش انحرافی - کرنش محوری حاصل از آزمایش‌های سه‌محوری تحت شرایط زهکشی مختلف در فشار محصورکننده 200 کیلوپاسکال: (الف) بارگذاری فشاری، (ب) بارگذاری کششی

در شرایط زهکشی نسبی انبساطی، کاهش محسوس سختی و مقاومت اوج نسبت به حالات زهکشی کامل یا زهکشی‌نشده مشاهده شد؛ به‌طوری‌که تحت بارگذاری فشاری، رفتار به ترتیب حالت سخت‌شوندگی، نرم‌شوندگی و دوباره هم‌زمان با اعمال شرایط حجم ثابت، سخت‌شوندگی را در پیش گرفت تا به حالت بحرانی دست یافت. در مقابل، تحت تنش کششی، نمونه در کرنش‌های پایین (تا $\varepsilon_1 = -0.35\%$) سخت‌شوندگی جزئی داشت اما به‌سرعت وارد فاز نرم‌شوندگی شد، به‌طوری‌که پس از کرنش

(9-الف)، پس از رسیدن به کرنش محوری 15% و بستن شیر زهکشی، حجم نمونه مشابه حالت زهکشی‌نشده ثابت ماند. همچنین در کرنش‌های محوری کوچک‌تر ($\geq 2\%$)، مسیر انقباضی (نمونه CCPD+) نرخ کاهش حجم کمتری نسبت به حالت زهکشی‌شده کامل (نمونه CCD) نشان می‌دهد. باین‌حال در $\varepsilon_1 = +3.2\%$ هر دو نمونه حجم یکسانی داشتند.



(الف)



(ب)

شکل 9- نتایج کرنش حجمی - کرنش محوری حاصل از آزمایش‌های سه‌محوری تحت شرایط زهکشی مختلف در فشار محصورکننده 200 کیلوپاسکال: (الف) بارگذاری فشاری، (ب) بارگذاری کششی

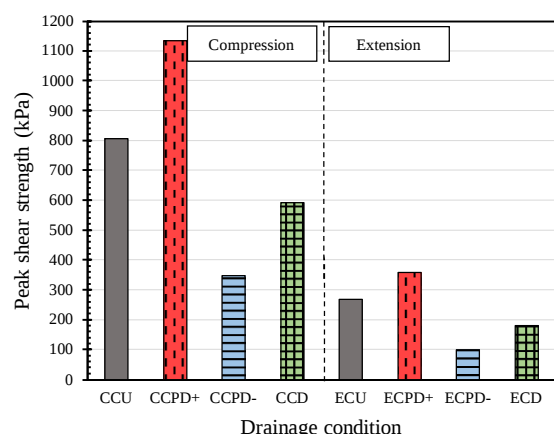
3-4- رفتار تنش - کرنش

شکل (10-الف) و (10-ب)، منحنی‌های تنش انحرافی - کرنش محوری را به‌ترتیب در بارگذاری فشاری و کششی تحت شرایط زهکشی مختلف نشان می‌دهد. در مسیر زهکشی‌نشده فشاری و کششی، هر دو نمونه ابتدا رفتار سخت‌شوندگی کرنشی را تا رسیدن به نقطه اوج تجربه کردند و سپس در اثر کاهش تنش مؤثر وارد فاز نرم‌شوندگی شدند. در مقابل، اعمال مسیر زهکشی نسبی انقباضی موجب افزایش سختی و تسریع در رسیدن به تنش

و شکل ساعت‌شنی به خود گرفت. مشابه با حالت فشاری، نرخ انقباضی زهکشی نسبی موجب بروز شکست برشی در نمونه (ECPD+) شد که این حالت در نمونه زهکشی‌شده (ECD) نیز تکرار شد. در مقابل با قرار دادن نمونه در شرایط زهکشی نسبی انبساطی (ECPD-)، به دلیل افزایش قابل توجه تخلخل، ناپایداری نمونه مشهود بود و الگوی شکست مشخصی ایجاد نشد.

3-6- تأثیر مسیرهای کرنش برشی - حجمی بر بیشینه مقاومت برشی

مقایسه نتایج مقاومت برشی (شکل (12)) نشان می‌دهد که به طور کلی، ماسه در برابر بارگذاری فشاری مقاومت بیشتری نسبت به بارگذاری کششی دارد. این یافته با مطالعات Eliadorani (2000) و Yoshimine و همکاران (2001) همخوانی دارد که تأکید کرده‌اند رفتار مقاومتی خاک‌های دانه‌ای به شدت تحت تأثیر ناهمسانگردی ذاتی و نحوه اعمال بارگذاری برشی است. بنابراین در طراحی شیب‌ها باید به نواحی پایین‌دست، که تحت کشش هستند، توجه ویژه‌ای داشت.



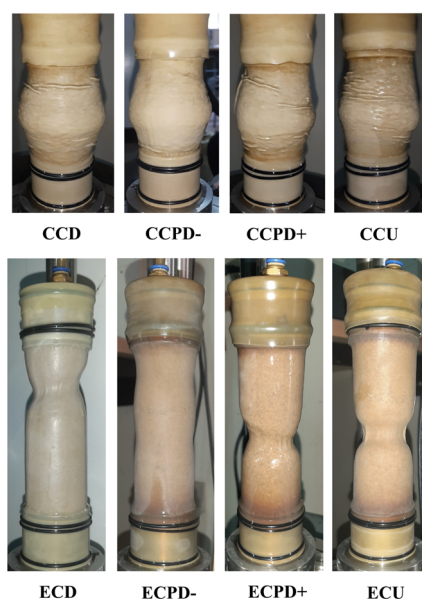
شکل 12- مقایسه بیشینه مقاومت برشی سه‌محوری فشاری و کششی نمونه ماسه‌ای تحت شرایط زهکشی مختلف

بیشترین مقاومت برشی در اثر زهکشی نسبی انقباضی حاصل شد؛ به گونه‌ای که تحت هر دو نوع بارگذاری، مقاومت نمونه‌ها نسبت به حالت زهکشی‌نشده حدود 38% و نسبت به حالت زهکشی‌شده تا حدود دو برابر افزایش یافت. این نتیجه با مطالعه عددی Salomon و همکاران (2025) مشابهت زیادی دارد و نشان می‌دهد که فراهم‌سازی شرایط خروج آب و افزایش تنش مؤثر می‌تواند به عنوان یک مکانیزم محافظتی در برابر روانگرایی عمل کند. در مقابل، اعمال کرنش حجمی انبساطی منجر به کاهش قابل توجه مقاومت شد؛ به طوری که بیشینه مقاومت فشاری تا حدود 58% نسبت به حالت زهکشی‌نشده و 42% نسبت به حالت زهکشی‌شده کاهش یافت. این روند با گزارش‌های Maleki

محوری حدوداً 1/5-٪، به یک وضعیت پایدار رسید. در واقع، تحت مسیر انبساطی، بخش قابل توجهی از مقاومت برشی نمونه خاک پس از رسیدن به نقطه اوج از دست می‌رود و دیگر افزایش نمی‌یابد که نشان‌دهنده افزایش پتانسیل روانگرایی در ماسه است (Yoshimine و Ishihara، 1998).

3-5- نحوه شکست نمونه‌ها در پایان آزمایش

بررسی ظاهری نمونه‌ها پس از پایان برش سه‌محوری فشاری و کششی نشان داد که تحت شرایط زهکشی مختلف، الگوهای شکست متفاوتی ایجاد شدند (شکل (11)).



شکل 11- تصاویر شکست نمونه‌ها پس از پایان برش سه‌محوری فشاری و کششی

در بارگذاری فشاری، نمونه زهکشی‌نشده (CCU) شکست ترکیبی از نوع برشی-خمردی را تجربه کرد. با اعمال مسیر زهکشی نسبی انقباضی (نمونه CCPD+) گسیختگی به شکست برشی واضح تغییر یافت؛ وضعیتی که به دلیل تراکم بالای نمونه ناشی از استخراج آب رخ می‌دهد و به صورت نوار برشی در ضعیف‌ترین صفحه ظاهر می‌شود. در مقابل، در شرایط زهکشی نسبی انبساطی (نمونه CCPD-)، ورود آب موجب سست شدن نمونه و بروز شکست کاملاً خمردی (بشکهای) گردید؛ به طوری که تغییر شکل در کل حجم توزیع شده و دیواره‌ها به سمت بیرون متورم شدند. این الگوی گسیختگی در نمونه زهکشی‌شده کامل (CCD) نیز مشاهده شد.

در بارگذاری کششی، نمونه زهکشی‌نشده (ECU) شکستی از نوع گردن‌بندی نشان داد. به طوری که در ناحیه میانی باریک شد

کرنش برشی - حجمی در تعیین رفتار و مقاومت کوتاه‌مدت ماسه را نشان می‌دهد.

(5) بررسی‌های پس از آزمایش نشان داد که نوع شکست به‌طور مستقیم تحت تأثیر شرایط زهکشی قرار دارد. زهکشی نسبی انقباضی در هر دو حالت بارگذاری موجب بروز شکست برشی شد. در مقابل، تحت شرایط انبساطی، نمونه تحت فشار دچار شکست خم‌های گردید، درحالی‌که تحت بارگذاری کششی به‌دلیل ناپایداری، الگوی مشخصی شکل نگرفت.

به‌طورکلی، زهکشی نسبی انقباضی می‌تواند به‌عنوان یک مکانیزم تقویتی و محافظتی در برابر روانگرایی ماسه عمل کند، درحالی‌که حالت انبساطی آن (مانند شرایط بارندگی شدید و نفوذ آب) یک تهدید جدی برای پایداری شیب‌های ماسه‌ای، به‌ویژه پس از رویدادهای لرزه‌ای، به‌شمار می‌آید. بنابراین، طراحی سیستم زهکشی کارآمد، به‌ویژه در بخش‌های پایین‌دست شیب، اهمیت فراوان دارد.

5- مراجع

- Abazari Oskoue V, Maleki Tabrizi E, Hajililue Bonab M, "An experimental study on triaxial compression tests considering coupled volumetric-shear strain paths", The International Conference on Nature-Inspired Solutions for Built Environment, 2025. <https://doi.org/10.26392/SSM.NISE.24.052>
- Adamidis O, Madabhushi SPG, "Experimental investigation of drainage during earthquake-induced liquefaction", *Géotechnique*, 2018, 68 (8), 655-665. <https://doi.org/10.1680/jgeot.16.P.090>
- Ampadu SK, Tatsuoka F, "Effect of setting method on the behaviour of clays in triaxial compression from saturation to undrained shear", *Soils and Foundations*, 1993, 33 (2), 14-34. https://doi.org/10.3208/sandf1972.33.2_14
- ASTM D5311, "Standard test method for load controlled cyclic triaxial strength of soil", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011. <https://doi.org/10.1520/D5311-11>
- ASTM D2487, "Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011. <https://doi.org/10.1520/D2487-11>
- ASTM D7181, "Standard test method for consolidated drained triaxial compression test for soils", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, 1-12. <https://doi.org/10.1520/D7181-11>
- Chen WB, Liu K, Feng WQ, Yin JH, "Partially drained cyclic behaviour of granular fill material in triaxial condition", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 139, 106355. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106355>
- Dai F, Lee CF, Wang S, Feng Y, "Stress-strain behaviour of a loosely compacted volcanic-derived soil and its significance to rainfall-

Tabrizi و همکاران (2023) هم‌راستا است و نشان می‌دهد چنین رفتاری در شرایط زهکشی با نرخ مشابه نیز محتمل است. اعمال این شرایط در حالت کششی، موجب افتی مشابه با بارگذاری فشاری شد؛ کاهش حدود 63% نسبت به مقاومت زهکشی‌نشده و حدود 46% نسبت به مقاومت زهکشی‌شده.

بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که در میان چهار شرایط زهکشی بررسی‌شده، زهکشی نسبی انبساطی می‌تواند در شرایطی مانند بارندگی شدید و نفوذ آب، تهدیدی جدی برای پایداری شیب‌های ماسه‌ای باشد. این وضعیت به‌ویژه در بخش‌های پایین‌دست شیب که تحت تنش کششی قرار دارند، می‌تواند بلافاصله پس از زلزله، خاک را به آستانه روانگرایی برساند. در مقابل، زهکشی انقباضی با تخلیه آب منافذ، توان بالقوه‌ای برای بهبود پایداری شیب‌ها دارد.

4- نتیجه‌گیری

بررسی آزمایش‌های سه‌محوری فشاری و کششی اشباع بر روی نمونه‌های بازسازی‌شده ماسه فیروزکوه شماره 161 تحت شرایط زهکشی مختلف نشان داد که مسیرهای کرنش برشی-حجمی اعمال‌شده تأثیر چشمگیری بر مسیر تنش، فشار آب حفره‌ای، تکامل کرنش حجمی، سختی و مقاومت برشی دارند. نتایج اصلی این پژوهش به شرح زیر است:

- مسیرهای تنش تمامی نمونه‌ها در چهار حالت زهکشی، در نهایت به یک CSL همگرا شدند. این امر نشان می‌دهد که مسیرهای کرنش برشی-حجمی تأثیر بسیار ناچیزی بر زاویه اصطکاک مؤثر بحرانی ماسه دارد.
- اعمال زهکشی نسبی انقباضی (استخراج آب با نرخ $\zeta=+0.125$) با کاهش تخلخل و کنترل تولید فشار آب حفره‌ای، موجب بهبود سخت‌شوندگی کرنشی نسبت به حالت‌های زهکشی‌نشده و کاملاً زهکشی‌شده گردید و باعث تسریع در رسیدن به اوج تنش انحرافی شد.
- در شرایط زهکشی نسبی انبساطی (تزریق آب با نرخ $\zeta=-0.250$) با افزایش فشار آب حفره‌ای، ناحیه انقباضی گسترش یافت. این موضوع به‌ویژه در بارگذاری کششی سبب کاهش پیوسته تنش مؤثر میانگین و شروع نرم‌شوندگی کرنشی در کرنش‌های پایین شد.

(4) بیشترین مقاومت برشی در هر دو نوع بارگذاری مربوط به شرایط زهکشی نسبی انقباضی بود (افزایشی حدود 38% نسبت به حالت زهکشی‌نشده). در مقابل، شرایط انبساطی افت چشمگیری در مقاومت ایجاد کرد؛ به‌ویژه در بارگذاری کششی که نمونه تا آستانه روانگرایی پیش رفت. این موضوع نقش کلیدی مسیرهای

- Sivathayalan S, Logeswaran P, "Experimental assessment of the response of sands under shear-volume coupled deformation", Canadian Geotechnical Journal, 2008, 45 (9), 1310-1323. <https://doi.org/10.1139/T08-068>
- Tabrizi EM, Tohidvand HR, Hajialilue-Bonab M, Mousavi E, Ghassemi S, "An investigation on the strain accumulation of the lightly EICP-cemented sands under cyclic traffic loads", Journal of Road Engineering, 2023, 3 (2), 203-217. <https://doi.org/10.1016/j.jreng.2023.03.002>
- Tohidvand HR, Maleki Tabrizi E, Esmatkahh Irani A, Hajialilue-Bonab M, Farrin M, "Effects of the fiber reinforcement on the monotonic behavior of sands considering coupled volumetric-shear strain paths", International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 2023, 9 (4), 39. <https://doi.org/10.1007/s40891-023-00462-x>
- Umehara Y, Zen K, Hamada K, "Evaluation of soil liquefaction potentials in partially drained conditions", Soils and Foundations, 1985, 25 (2), 57-72. https://doi.org/10.3208/sandf1972.25.2_57
- Vaid YP, Eliadorani A, "Instability and liquefaction of granular soils under undrained and partially drained states", Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35 (6), 1053-1062. <https://doi.org/10.1139/t98-061>
- Vaid YP, Eliadorani A, "Undrained and drained (?) stress-strain response", Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37 (5), 1126-1130. <https://doi.org/10.1139/t00-036>
- Yamamoto Y, Hyodo M, Orense RP, "Liquefaction resistance of sandy soils under partially drained condition", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135 (8), 1032-1043. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000051](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000051)
- Yoshimine M, Ishihara K, "Flow potential of sand during liquefaction", Soils and Foundations, 1998, 38 (3), 189-198. https://doi.org/10.3208/sandf.38.3_189
- Yoshimine M, Robertson PK, Wride CE, "Undrained shear strength of clean sands to trigger flow liquefaction: Reply", Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38 (3), 654-657. <https://doi.org/10.1139/t00-114>
- Zhu J, Leung AK, Wang Y, "Partially drained uplift behaviour of plant roots in dilative soils", Canadian Geotechnical Journal, 2023, 61 (3), 500-518. <https://doi.org/10.1139/cgj-2023-0104>
- Zürn J, Mugele L, Stutz HH, "Novel experimental method for rate-independent triaxial tests under partial drainage condition", Géotechnique Letters, 2024, 14 (3), 100-105. <https://doi.org/10.1680/jgele.23.00120>
- induced fill slope failures", Engineering Geology, 1999, 53 (3-4), 359-370. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(99\)00016-2](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(99)00016-2)
- Eliadorani AA, "The response of sands under partially drained states with emphasis on liquefaction", Doctoral Dissertation, University of British Columbia, 2000. <https://doi.org/10.14288/1.0063746>
- Farahmand K, Lashkari A, Ghalandarzadeh A, "Firoozkuh sand: introduction of a benchmark for geomechanical studies", Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2016, 40 (2), 133-148. <https://doi.org/10.1007/s40996-016-0009-0>
- Gananathan N, "Partially drained response of sands", Doctoral dissertation, University of British Columbia, 2002. <https://doi.org/10.14288/1.0063669>
- Irani AE, Hajialilue-Bonab M, Assadi-Langroudi A, Tabrizi EM, "Pore-pressure-dependent performance of rocking foundations", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2024, 183, 108772. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.108772>
- Lashkari A, Falsafizadeh SR, Rahman MM, "Influence of linear coupling between volumetric and shear strains on instability and post-peak softening of sand in direct simple shear tests", Acta Geotechnica, 2021, 16 (11), 3467-3488. <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01288-5>
- Lashkari A, Yaghtin MS, "Sand flow liquefaction instability under shear-volume coupled strain paths", Géotechnique, 2018, 68 (11), 1002-1024. <https://doi.org/10.1680/jgeot.17.P.164>
- Logeswaran P, "Behaviour of sands under simultaneous changes in volume and pore pressure", Doctoral dissertation, Carleton University, 2005. <https://doi.org/10.22215/etd/2005-07628>
- Maleki Tabrizi E, Dibazar AA, Hajialilue-Bonab M, Esmatkahh Irani A, Assadi-Langroudi A, "The partially drained behaviour of dense fibre-reinforced sands", Sustainability, 2023, 15 (23), 16286. <https://doi.org/10.3390/su152316286>
- Miura S, Toki S, "A sample preparation method and its effect on static and cyclic deformation-strength properties of sand", Soils and Foundations, 1982, 22 (1), 61-77. <https://doi.org/10.3208/sandf1972.22.61>
- Roscoe KH, Schofield AN, Wroth AP, "On the yielding of soils", Géotechnique, 1958, 8 (1), 22-53. <https://doi.org/10.1680/geot.1958.8.1.22>
- Salomon J, Patino-Ramirez F, O'Sullivan C, "Stress-dilatancy and micromechanics of sand under partially drained conditions", Computers and Geotechnics, 2025, 183, 107200. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2025.107200>
- Sivathayalan S, Logeswaran P, "Behaviour of sands under generalized drainage boundary conditions", Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44 (2), 138-150. <https://doi.org/10.1139/t06-110>