



University Of Qom



Noncoaxial Response of Sands Influenced by Grain Shape and Anisotropy: Insights from Hollow Cylinder Testing

Salar Hafezan¹ , Hadi Bahadori²

1. Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran. E-mail: Hafezan.salar@urmia.ac.ir
2. Corresponding author, Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran. E-mail: h.bahadori@urmia.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 03 Jun 2025
Revised 12 Aug 2025
Accepted 13 Aug 2025
Published 13 Aug 2025

Keywords:
Noncoaxiality,
Sand,
Morphology,
Hollow Cylinder,
Anisotropy.

ABSTRACT

A comprehensive understanding of the noncoaxial behavior of sands, particularly under complex loading conditions, is critical for the safe and efficient design of geotechnical structures. Noncoaxiality refers to the deviation between the orientations of the principal stress and the principal plastic strain rate vectors during plastic deformation. This study investigates the influence of particle morphology, specifically shape and sphericity, on the noncoaxial response of granular soils. A series of hollow torsional cylinder tests were conducted on sands with distinct particle characteristics, including Hamedan, Chamkhale, Firoozkooh, Leighton Buzzard, and Ottawa sands. The specimens were subjected to monotonic loading paths under varying principal stress rotation angles of 15°, 30°, and 60° to evaluate the effect of stress directionality on their deformation behavior. The results reveal that both principal stress orientation and particle sphericity significantly affect the degree of noncoaxiality. Furthermore, a comparative analysis was performed to quantify the relative impact of these factors, providing valuable insights into the micromechanical origins of noncoaxial deformation in sands. These findings contribute to enhancing predictive models for soil behavior under multidirectional shear loading conditions.

Cite this article: Hafezan S, Bahadori H. Noncoaxial Response of Sands Influenced by Grain Shape and Anisotropy: Insights from Hollow Cylinder Testing. Civil Infrastructure Researches. 2025; 11(2): 31-45. <https://doi.org/10.22091/cer.2025.13107.1628>



Introduction

The study investigates the noncoaxial behavior of sands under complex loading conditions, focusing on the influence of grain shape and anisotropy. Noncoaxiality, defined as the deviation between principal stress and principal plastic strain rate vectors during deformation, is critical for understanding the mechanical response of granular soils. The research employs hollow cylinder torsional testing on five distinct sands-Hamedan, Chamkhale, Firoozkooh, Leighton Buzzard, and Ottawa to evaluate how particle morphology and stress rotation angles (15° , 30° , and 60°) affect deformation. By analyzing these factors, the study aims to enhance predictive models for soil behavior in geotechnical engineering applications, providing insights into the micromechanical origins of noncoaxial deformation.

Problem Statement

Despite the importance of noncoaxial behavior in geotechnical design, the direct impact of particle shape and anisotropy on this phenomenon remains underexplored. Existing research has primarily focused on mechanical properties like shear strength and dilatancy, with limited attention to how particle sphericity and stress directionality influence noncoaxial responses. This study addresses this gap by systematically examining sands with varying morphologies under controlled stress rotations. The challenge lies in quantifying the interplay between intrinsic particle characteristics and external loading conditions, which is essential for improving the accuracy of soil behavior models in scenarios involving multidirectional shear loading.

Methodology

The study employed hollow cylinder torsional shear (HCTS) testing to investigate noncoaxial behavior in five sands with varying particle morphologies (Hamedan, Chamkhale, Firoozkooh, Leighton Buzzard, and Ottawa).

Specimens were prepared using dry funnel pluviation to achieve consistent densities ($D_r \approx 60\%$) and isotropically consolidated to 100 kPa. The testing program applied controlled stress rotations ($\alpha = 15^\circ, 30^\circ, 60^\circ$) under drained conditions while maintaining a constant intermediate principal stress ratio ($b = 0.5$).

Particle morphology was quantified through SEM imaging and computational shape analysis (Fiji/ImageJ), measuring sphericity indices (SA, SP, SWI) for 2000+ grains per sand type. Noncoaxiality (ζ) was calculated as the angular deviation between principal stress (α) and plastic strain increment (α_{de}) directions. Strain components were derived from LVDT measurements and volume change data using hollow cylinder kinematics. The experimental matrix included 15 tests (3 rotation angles $\times$ 5 sands), with results validated against DEM simulations from literature. This approach enabled direct comparison of fabric-induced and stress-induced anisotropy effects on noncoaxial response.

Results

The experiments revealed that both principal stress orientation and particle sphericity significantly influence noncoaxiality. Sands with lower sphericity (e.g., Hamedan) exhibited higher noncoaxiality, while more spherical particles (e.g., Ottawa) showed greater resistance to deformation. The degree of noncoaxiality increased with larger stress rotation angles, with the most pronounced effects observed at 60° . Additionally, the study identified a transitional behavior from elastic to plastic deformation, where noncoaxiality stabilized at higher strain levels. These findings underscore the role of particle morphology and stress directionality in governing soil response, aligning with prior studies on granular material mechanics.

Conclusion

The research highlights the critical role of particle shape and stress anisotropy in determining the noncoaxial behavior of sands. Key findings include the direct correlation between particle sphericity and deformation

resistance, as well as the dependency of noncoaxiality on stress rotation angles. The study bridges a gap in understanding how micromechanical properties influence macroscopic soil behavior, offering valuable insights for geotechnical engineering. Future work could explore additional factors like grain size distribution and moisture content to further refine predictive models and enhance the design of structures subjected to complex loading conditions.

Funding Statement

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Declaration of Competing Interest

■ **No competing interests:** The authors declare that they have no known competing financial

interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors' Contributions

Salar Hafezan:

Conceptualization; Data curation; Formal analysis; Investigation; Methodology; Project administration; Resources; Software; Supervision; Validation; Visualization; Roles/Writing – original draft; Writing – review & editing.

Hadi Bahadori:

Conceptualization; Data curation; Formal analysis; Investigation; Methodology; Project administration; Resources; Software; Supervision; Validation; Visualization; Roles/Writing – original draft; Writing – review & editing.

بررسی اثر مورفولوژی ذرات و ناهمسانی بر رفتار ناهمراستای ماسه‌ها با استفاده از دستگاه برش سیلندر توخالی

سالار حافظان^۱، هادی بهادری^۲

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: Hafezan.salar@urmia.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: h.bahadori@urmia.ac.ir

چکیده

درک رفتار ناهمراستای ماسه‌ها، به‌ویژه تحت بارگذاری‌های پیچیده، برای طراحی ایمن و بهینه در مهندسی ژئوتکنیک ضروری است. رفتار ناهمراستا به عدم تطابق جهت‌های تنش اصلی و نرخ کرنش پلاستیک اصلی در طی تغییرشکل پلاستیک اشاره دارد. در این پژوهش، علاوه بر بررسی تأثیر ناهمسانی، اثر شکل و کرویت ذرات ماسه بر رفتار ناهمراستای آن‌ها بررسی شده است. به این منظور، آزمایش‌هایی بر روی ماسه‌های با اشکال مختلف ذرات (همدان، چمخاله، فیروزکوه، لیتون بازارد و اتاوا) با استفاده از دستگاه استوانه پیچشی توخالی انجام شد. نمونه‌ها تحت مسیرهای بارگذاری مونوتونیک و زوایای تنش اصلی ۱۵، ۳۰ و ۶۰ درجه قرار گرفتند تا اثر تغییرات جهت تنش اصلی بر رفتار ماسه ارزیابی شود. نتایج نشان داد که تغییرات جهت تنش‌های اصلی و همچنین تغییرات اندازه شاخص کرویت هر دو در مقدار ناهمراستایی، اثر بسزایی دارند. همچنین با اندازه‌گیری‌های انجام‌شده به مقایسه درجه اثرگذاری هر کدام از عوامل عنوان شده بر پدیده ناهمراستایی پرداخته شد.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۵/۲۲

کلیدواژه‌ها:

ناهمراستایی،

ماسه،

مورفولوژی،

استوانه پیچشی توخالی،

ناهمسانی.

استناد: حافظان سالار، بهادری هادی. بررسی اثر مورفولوژی ذرات و ناهمسانی بر رفتار ناهمراستای ماسه‌ها با استفاده از دستگاه برش سیلندر توخالی.

پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی، ۱۴۰۴؛ ۱۱(۲): ۳۱-۴۵. <https://doi.org/10.22091/cer.2025.13107.1628>

۱- مقدمه

ناهمراستایی در مصالح دانه‌ای مانند ماسه، پدیده‌ای مهم در مکانیک خاک است که در آن جهت‌های اصلی تنش و تغییر شکل (کرنش) در حین تغییر شکل، هم‌راستا نیستند. این رفتار تحت اثر عوامل مختلفی از جمله مورفولوژی ذرات، مسیر تنش و شرایط بارگذاری قرار می‌گیرد. یکی از عوامل کلیدی در این زمینه، کرویت ذرات است؛ معیاری که نشان می‌دهد شکل یک ذره تا چه حد به یک کره کامل شباهت دارد.

کرویت بر مکانیک تماس بین ذرات، ساختار کلی مجموعه دانه‌ها و حرکت‌های بازآرایی ذرات تحت بارگذاری اثر می‌گذارد. ماسه‌هایی با کرویت بالاتر تمایل به ایجاد زنجیره‌های نیروی یکنواخت‌تر و مقاومت چرخشی کمتری دارند، درحالی‌که ذرات زاویه‌دار با کرویت پایین‌تر معمولاً باعث قفل‌شدگی بیشتر و پاسخ‌های تنش-کرنش پیچیده‌تری می‌شوند. این تفاوت‌های مورفولوژیکی به تغییرات در میزان ناهمراستایی مشاهده‌شده تحت شرایط بارگذاری مشابه منجر می‌شود.

درک اثر کرویت بر ناهمراستایی برای بهبود مدل‌های پیش‌بینی رفتار خاک، به‌ویژه در سناریوهایی با مسیرهای بارگذاری پیچیده، مانند کاربردهای مهندسی ژئوتکنیک و مطالعات جریان دانه‌ای، ضروری است. این مقاله به بررسی رابطه بین کرویت ذرات و رفتار ناهمراستایی ماسه‌ها پرداخته و بینش‌هایی در مورد مکانیزم‌های بنیادی و پیامدهای آن برای مدل‌سازی رفتاری ارائه می‌دهد.

در حال حاضر، تحقیقات مستقیمی که به‌طور خاص به اثر کرویت ذرات بر رفتار ناهمراستای ماسه‌ها پرداخته باشد، محدود است. با این حال، چندین مطالعه به جنبه‌های مرتبط با شکل ذرات و اثر آن بر رفتار مکانیکی مواد دانه‌ای پرداخته‌اند.

سای^۲ و همکاران [۱] با انجام سه سری آزمایش زهکشی شده که بر روی ماسه‌های پرتاوی و لیتون بازاریاد با استفاده از دستگاه سیلندر توخالی، نشان می‌دهند که درجه ناهمراستایی به سطح تنش انحرافی و جهت افزایش تنش بستگی دارد. این درجه تمایل دارد که زمانی که نمونه به حالت شکست نزدیک می‌شود کاهش یابد.

التوهافی^۳ و همکاران [۲] اثر شکل ذرات بر رفتار مکانیکی ماسه‌های طبیعی را بررسی کردند. نتایج نشان دادند که افزایش کرویت ذرات، تنش محوری پیک نمونه و زاویه اصطکاک داخلی را کاهش می‌دهد. هرچند این مطالعه به‌طور مستقیم به ناهمراستایی نمی‌پردازد، تغییرات مشاهده‌شده در رفتار مکانیکی به دلیل تغییرات کرویت می‌تواند پیامدهایی برای پاسخ‌های ناهمراستا داشته باشد.

چن^۴ و همکاران [۳] اثر کرویت ذرات ماسه بر عملکرد برش مستقیم ماسه با استفاده از روش عناصر گسسته^۵ (DEM) بررسی کردند و زمانی که شکل ذرات به سمت کره نزدیک می‌شود (صرف‌نظر از نسبت ذرات کروی و شکل ذرات)، زاویه چرخش متوسط ذرات درون و بیرون نوارهای برشی افزایش می‌یابد، درحالی‌که تعداد تماس دانه‌ها و ناهمسانی کاهش می‌یابد.

ژائو^۶ و همکاران [۴] با آزمایش‌های سه محوری زهکشی شده بر روی دو نوع ماسه مصنوعی شیشه‌ای گرد و خردشده نشان داد که مقاومت و زاویه اصطکاک خاک‌های دانه‌ای مستقیماً ناشی از افزایش زاویه‌داری است که در آن قفل شدن بین ذرات نقش مهمی ایفا می‌کند.

یانگ^۷ و همکاران [۵] با استفاده از دستگاه سیلندر توخالی به‌طور تجربی این ویژگی را بر روی مجموعه مصالح دانه‌ای مصنوعی با شکل‌های منظم ذرات و اندازه‌های یکنواخت ذرات بررسی می‌کند. نتایج تجربی نشان می‌دهند که پاسخ‌های تنش-کرنش آن‌ها به جهت‌گیری تنش اصلی بزرگ وابسته است. ناهمراستایی تابعی از نسبت تنش است.

⁵ Discrete element method

⁶ Xiao

⁷ Yang

² Cai

³ Altuhafi

⁴ Chen

۲- مصالح، دستگاه و روش‌ها

۲-۱- مشخصات مصالح

پنج نوع مصالح دانه‌ای مختلف که از نظر اندازه و شکل متنوع هستند، در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این مواد در جدول ۱ فهرست شده‌اند که ویژگی‌های فیزیکی مربوط به هر یک از آن‌ها را ارائه می‌دهد. تمام مواد آزمایش شده در دسته‌بندی ماسه‌های ریز تا متوسط قرار می‌گیرند که نسبت قابل توجهی از دانه‌ها متعلق به دسته ماسه‌های ریز می‌شود. ماسه‌های ریز به‌طور عمدی برای این مطالعه انتخاب شدند، زیرا تعیین میزان تختی این دانه‌ها تنها از طریق بازرسی بصری دشوار است. این دانه‌ها همچنین در معرض خطاهای بیشتری در اندازه‌گیری کروییت قرار دارند. باین‌حال، کروییت یک شاخص بدون بعد است، به این معنا که یافته‌های این مطالعه را می‌توان به دانه‌ها با اندازه‌های مختلف تعمیم داد. ماسه‌های فیروزکوه⁽¹⁰⁾، اتاوا⁽¹¹⁾ (OTW)، همدان⁽¹²⁾ (HAM) و لیتون بازارد⁽¹³⁾ (LBS) صنعتی هستند و ماسه چمخاله⁽¹⁴⁾ (CHM) از نوع طبیعی است. شکل ۱ نمودار منحنی دانه‌بندی این پنج نوع ماسه را نشان می‌دهد.

۲-۲- محاسبات کروییت خاک‌ها

اندازه‌گیری چالش‌برانگیز مساحت سه‌بعدی سطح دانه‌های خاک که توسط وادل [۸] پیشنهاد شده بود، منجر به ارائه چندین تعریف عملی بر اساس مساحت تصویر شده ذره (نسخه دوبعدی کروییت) شد. تلاش اولیه، قطر دایره‌ای با مساحت برابر با بزرگ‌ترین مساحت تصویر شده را تعریف کرد که بر قطر کوچک‌ترین دایره‌ای که می‌توانست تصویر ذره را دربر بگیرد تقسیم می‌شد. با گذشت زمان، تعاریف مختلف دیگری از کروییت ارائه شده است [۹-۱۱]. جدول ۲ نمای کلی از برخی از رایج‌ترین تعاریف کروییت دوبعدی

علاوه بر این، روند قابل توجهی وجود دارد که نشان می‌دهد این ویژگی به زاویه‌داری ذرات وابسته هستند. هرچه ذرات زاویه‌دارتر باشند، ناهمراستایی بیشتری ایجاد می‌شود.

هنگ^۸ و همکاران [۶] با استفاده از دستگاه برش پیچشی استوانه توخالی و شناسایی بافت اولیه نمونه‌های ماسه به مطالعه تاثیر شکل ماسه بر رفتار ناهمسان مصالح متنوع ماسه‌ای پرداختند. نتایج نشان داد که مقاومت اوج مصالح دانه‌ای به شدت به شکل ذره و زاویه آلفا وابسته است. همچنین ذرات نامنظم و دارای زبری سطح بیشتر مقاومت اوج بالاتری داشتند.

لیو^۹ و همکاران [۷] با استفاده از دستگاه استوانه پیچشی توخالی و آزمایش بر روی خاک باقی مانده از تراش سنگ‌های گرانیتی به بررسی تاثیر تغییر زاویه تنش اصلی بر رفتار ناهمراستا پرداختند. نتایج نشان دهنده وابستگی ناهمراستایی به دو عامل زاویه تنش اصلی و مقدار تنش انحرافی بود.

به‌طور خلاصه، درحالی که مطالعات مستقیمی درباره اثر کروییت ذرات بر رفتار ناهمراستای ماسه‌ها کم است، تحقیقات موجود درباره اثر شکل ذرات اطلاعات ارزشمندی ارائه می‌دهند. این مطالعات نشان می‌دهند که کروییت ذرات به‌طور قابل توجهی بر رفتار مکانیکی ماسه‌ها اثر می‌گذارد و احتمالاً بر پاسخ‌های ناهمراستایی تحت شرایط مختلف بارگذاری اثرگذار است.

این مقاله به‌طور تجربی هدف دارد تا ناهمراستایی مجموعه‌ای از خاک‌های طبیعی با اشکال منظم ذرات و اندازه‌های یکنواخت ذرات را با استفاده از دستگاه سیلندر توخالی بررسی کند. این تحقیق بینش‌های بیشتری را در مورد اثر ویژگی‌های ذرات بر این ویژگی مهم فراهم خواهد کرد. خاک‌های دانه‌ای با اشکال مختلف ذرات استفاده می‌شوند که شامل ماسه‌های همدان، چمخاله، فیروزکوه، لیتون بازارد و اتاوا هستند.

¹² Hamedan

¹³ Leighton Buzzard

¹⁴ Chamkhaleh

⁸ Heng

⁹ Liu

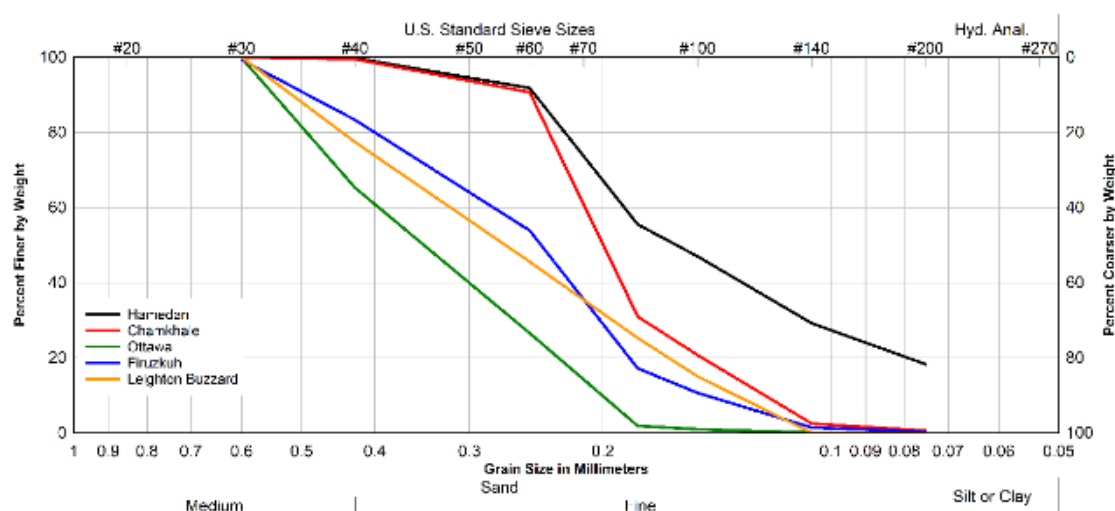
¹⁰ Firoozkuh

¹¹ Ottawa

و سه‌بعدی موجود در متون علمی را ارائه می‌دهد. این جدول شامل مجموعه‌ای از تعاریف کرویت دوبعدی و سه‌بعدی متوسط [۹، ۱۲] است. پارامترهای به کاررفته در هر جدول ۲ توضیح داده شده‌اند.

جدول ۱- مشخصات مصالح

خصوصیات بنیادین						نوع ماسه
e_{min}	e_{max}	D_{50}	C_u	C_c	G_s	
۰/۷۲	۱/۱۳	۰/۴۹	۱/۹۷	۱/۵۵	۲/۶۴	همدان
۰/۷	۱/۰۳	۰/۱۸	۱/۴	۰/۹۵	۲/۶۶	چمخاله
۰/۵۹	۰/۹۳	۰/۲۶	۱/۵۳	۱/۰۷	۲/۶۵	فیروزکوه
۰/۵۸	۰/۸۱	۰/۷۸	۰/۵۲	۳/۱۲	۲/۶۶	لیتون بازارد
۰/۵۲	۰/۷۴	۰/۳۶	۱/۸۱	۱/۱۴	۲/۶۳	اتاوا



شکل ۱ - منحنی دانه‌بندی مصالح

انجام شد، که این روش یک ابزار آستانه گذاری مختصاتی^{۱۸} استفاده شده است. شکل (۲ ب) تصویر SEM پردازش شده شکل (۲ الف) را پس از اعمال آستانه گذاری مختصاتی و پر کردن حفره‌های احتمالی نشان می‌دهد. این تصویر، یک تصویر باینری است که در آن سطح خارجی هر ذره با استفاده از مازول تحلیل اجزا^{۱۹} تعریف می‌شود. هر ذره برچسب گذاری شده و توصیف می‌گردد، همان‌طور که در شکل ۲- ج نشان داده شده است.

برای هر کدام از مصالح، حداقل ۲۰۰۰ دانه به صورت جداگانه (از نظر پارامترهای S_D ، S_C ، S_P و S_{WI} ، همان‌طور که در جدول ۱ توضیح داده شده) توصیف می‌شوند. شاخص میزان کرویت به عنوان مد منحنی توزیع

برای تعیین میزان کرویت دوبعدی ذرات، چندین تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM^{۱۵}) گرفته شده از ماسه‌های مختلف (شکل ۲) با استفاده از نرم افزار فی جی ارزیابی شدند. فی جی^{۱۶} یک نرم افزار پردازش تصویر متن باز است که بر پایه ایمج ۲^{۱۷} توسعه یافته است. در این روش، کرویت و سایر توصیف کننده‌های شکل به صورت پوششی که توسط تمام نقاط سطح خارجی ذره تشکیل می‌شود تعریف می‌شوند.

تحقیقات گسترده‌ای در زمینه توصیف شکل دوبعدی ذرات در ادبیات علمی گزارش شده است (به عنوان مثال [۱۳-۱۷]) در این مطالعه، شناسایی ذرات با استفاده از روش‌های آستانه گذاری محلی خودکار فانسالکار [۱۸]

¹⁸ Local Thresholding¹⁹ Analyse Particle¹⁵ Scanning electron microscope¹⁶ Fiji¹⁷ Image2

کرویت دانه‌ها تعریف می‌شود، که نشان‌دهنده رایج‌ترین مقدار کرویت در میان دانه‌ها است. جدول ۳ شامل شاخص‌های اندازه‌گیری شده کرویت مصالح مورد آزمایش است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تنوع خوبی در شاخص‌های کرویت دانه‌ها وجود دارد.

جدول ۲- توصیف شاخص‌های کرویت

شاخص‌های کرویت	فرمولاسیون	توصیف فرمولاسیون	مرجع
S_A	$S_A = \frac{A_s}{A_{cir}}$	A_s : مساحت ذره خاک A_{cir} : مساحت کوچک‌ترین دایره محیطی	Reviewed by Mitchell and [۹] and Soga [۱۲] Rodriguez et al
S_D	$S_D = \frac{D_c}{D_{cir}}$	D_c : قطر دایره‌ای با مساحت برابر با ذره خاک D_{cir} : قطر کوچک‌ترین دایره محیطی	-
S_C	$S_C = \frac{D_{ins}}{D_{cir}}$	D_{ins} : قطر بزرگ‌ترین دایره محاطی	-
S_P	$S_P = \frac{P_c}{P_s}$	P_c : محیط دایره‌ای با مساحت برابر با ذره خاک P_s : محیط ذره خاک	-
S_{wl}	$S_{wl} = \frac{D}{L}$	D : کوچک‌ترین اندازه فره (Feret) L : بزرگ‌ترین اندازه فره (Feret)	-
SP_1	$SP_1 = \sqrt[3]{\frac{b \times c}{a^2}}$	a : طولی‌ترین بُعد ذره b : بُعد میانی ذره c : کوتاه‌ترین بُعد ذره V : حجم ذره S : مساحت سطحی ذره	Krumbein [۱۹] Wadell [۸] Reviewed by Zheng et al [۲۰]
SP_2	$SP_2 = \frac{\sqrt[3]{36 \times \pi \times V^2}}{S}$	-	-
SP_3	$SP_3 = \frac{4}{3 \times \pi \times (\frac{c}{2})^3}$	-	-
SP_4	$SP_4 = \frac{c}{\sqrt{a \times b}}$	-	-
SP_5	$SP_5 = \frac{12.8 \times \sqrt[3]{(\frac{b}{a}) \times (\frac{c}{b})}}{1 + (\frac{c}{b}) \times (1 + (\frac{b}{a})) + 6 \times \sqrt{1 + (\frac{c}{b})^2 \times (1 + (\frac{b}{a}))^2}}$	-	-
SP_6	$SP_6 = \frac{(b+c)}{2 \times a}$	-	-
SP_7	$SP_7 = \frac{9 \times S}{\pi \times (a+b+c)^2}$	-	-

۳-۲- دستگاه استوانه پیچشی توخالی

حالت تنش سه‌بعدی ناهمسان و تنش‌های اصلی نابرابر، در اکثر سازه‌های ژئوتکنیکی در خاک القا می‌شود. این حالت پیچیده شامل چرخش جهت تنش اصلی α ، مقادیر مختلف پارامتر نسبت تنش اصلی میانی b است. در

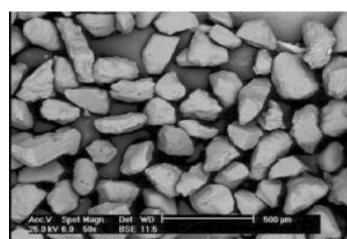
۳-۲-۱- مشخصات کلی

دستگاه برش سه محوری مرسوم کنترل بر جهت‌های تنش اصلی امکان‌پذیر نیست لیکن دستگاه برشی پیچشی استوانه

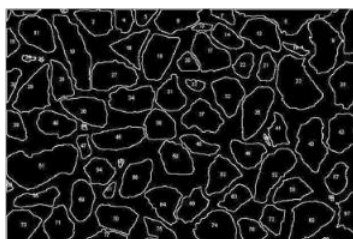
توخالی ($HCTA^{20}$) امکان اعمال هم‌زمان بارمحوری، گشتاور، فشارهای داخلی و خارجی را فراهم می‌کند.



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۲- پردازش تصویر تصاویر SEM (الف) یک تصویر معمولی SEM؛ (ب) تصاویر دودویی (ذرات به رنگ سفید و نواحی خالی به رنگ سیاه)؛ (ج) برجسب‌گذاری ذرات و ارزیابی

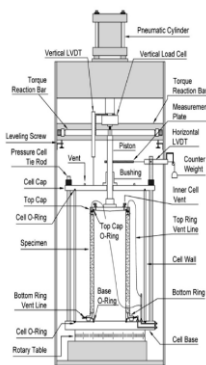
جدول ۳- مشخصات کرویت اندازه‌گیری شده مصالح

S_A	S_D	S_C	S_P	S_{wl}	SP_1	SP_2	SP_3	SP_4	SP_5	SP_6	SP_7	
۰/۶۰۴	۰/۸۰۲	۰/۶۸۷	۰/۸۷۴	۰/۶۴۳	۰/۷۳۳	۰/۶۰۶	۱/۶۰۸	۰/۸۳۷	۰/۹۲	۰/۶۶	۰/۸۹	همدان
۰/۷۳	۰/۸۵۴	۰/۷۶۱	۰/۹۱۵	۰/۷۳۱	۰/۷۳	۰/۵۸۵	۰/۶۲۱	۰/۸۱	۰/۸۸	۰/۶۵	۰/۸۸۸	چمخاله
۰/۷۴۹	۰/۸۶۵	۰/۷۸۳	۰/۹۱۴	۰/۷۴۹	۰/۷۲۶	۰/۵۰۵	۱/۷۲۱	۰/۷۹	۰/۸۶۱	۰/۶۳۳	۰/۸۸۴	فیروزکوه
۰/۷۵۶	۰/۸۶۹	۰/۷۸	۰/۸۸۲	۰/۷۵۶	۰/۷۱۷	۰/۴۹۵	۱/۸۲۱	۰/۷۸۲	۰/۸۶۳	۰/۶۲	۰/۸۸	لیتون بازارد
۰/۷۷۸	۰/۸۸۲	۰/۸۰۱	۰/۹۲۷	۰/۷۷۸	۰/۶۲۷	۰/۴۰۷	۲/۸۴۵	۰/۵۸۹	۰/۸۳۱	۰/۴۷۷	۰/۸۷۷	اتاوا

بنابراین، این دستگاه کنترل بر جهت تنش‌های اصلی و همچنین تنش اصلی میانی را در رویکرد مسیر تنش ممکن می‌سازد $HCTA$. فرصتی برای درک بهتر ویژگی‌های خاک و پیامدهای آن بر رفتار تنش-کرنش (پس از اوج) فراهم می‌کند. شکل ۳ دستگاه $HCTA$ دانشگاه ارومیه مورد استفاده در این مطالعه و شکل شماتیک آن را همراه با نمونه خاک نشان می‌دهد. در این دستگاه برای ثبت رفتار خاک پس از نقطه اوج، از موتوری برای آزمایش کنترل کرنش پیچشی استفاده می‌شود که سرعت گشتاور ۰/۵ درجه در دقیقه در تمام آزمایش‌ها اعمال می‌شود. به‌منظور مطالعه اثر ناهمسانی ذاتی، زاویه α و پارامتر نسبت

تنش میانی b در طول برش پیچشی ثابت نگه داشته می‌شوند. به‌منظور کنترل α و b برای رسیدن به مسیرهای تنش موردنظر، معادلات کلی دستگاه پیچشی استوانه توخالی طی برنامه‌نویسی توسط بهادری و همکاران [۲۱] در دستگاه تعریف شده‌اند که این معادلات در جدول ۴ به‌طور خلاصه ارائه شده است. ویژگی‌های هندسی، بارهای مرزی و شرایط تنش در دستگاه پیچشی استوانه توخالی در شکل ۴ نشان داده شده است. در معادلات جدول ۴، مشخصات هندسی و بارهای مرزی در شکل ۴ تعریف شده است.

²⁰ Hollow cylinder torsional shear apparatus



(ب)



(الف)

شکل ۳- الف) تصویر دستگاه استوانه پیچشی توخالی دانشگاه ارومیه و ب) تصویر شماتیک عملکرد دستگاه استوانه پیچشی توخالی

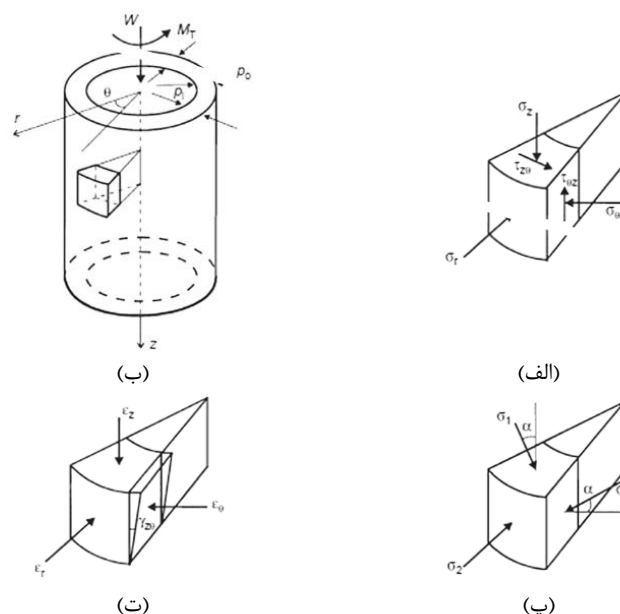
جدول ۴- معادلات کلی دستگاه استوانه پیچشی توخالی

معادله	پارامتر
$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$	نسبت تنش میانی (Intermediate principal stress ratio)
$\sigma_1 = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \tau_{z\theta}^2}$	تنش اصلی بیشینه Major principal stresses (σ_1)
$\sigma_2 = \sigma_r$	تنش اصلی میانی Intermediate principal stresses (σ_2)
$\sigma_3 = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \tau_{z\theta}^2}$	تنش اصلی کمینه Minor principal stresses (σ_3)
$\sigma_\theta = \sigma_z - \frac{2\tau_{z\theta}}{\tan 2\alpha}$	تنش نرمال محیطی Circumferential normal stress
$\sigma_r = \sigma_z - \frac{\sigma_{z\theta}(\cos 2\alpha - 2b + 1)}{\sin 2\alpha}$	تنش نرمال شعاعی Radial normal stress
$\tau_{z\theta} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{3T}{2\pi(r_o^3 - r_i^3)} + \frac{T}{\pi(r_o^2 + r_i^2)(r_o - r_i)} \right\}$	تنش برشی Shear stress
$\sigma_z = \frac{F_v + \pi(p_o r_o^2 - p_i r_i^2) - A_r p_o}{A_s}$	تنش نرمال عمودی Vertical normal stress
$p_i = \frac{\sigma_r(r_o + r_i) - \sigma_\theta(r_o - r_i)}{2r_i}$	فشار داخلی سلول Inner cell pressure (P_i)
$p_o = \frac{\sigma_r(r_o + r_i) - \sigma_\theta(r_o - r_i)}{2r_\theta}$	فشار خارجی سلول Outer cell pressure (P_o)

نمونه‌های باکیفیت خاک‌های چسبنده به راحتی با استفاده دقیق از تکنیک‌های معمول نمونه‌برداری قابل دستیابی هستند. مشکل زمانی ایجاد می‌شود که بخواهیم نمونه‌های دست‌نخورده از خاک‌های ماسه‌ای تهیه کنیم. از آنجا که هزینه تهیه نمونه‌های دست‌نخورده و باکیفیت از خاک‌های دانه‌ای با استفاده از روش انجماد زمین بسیار زیاد است [۲۲].

σ_θ ، σ_z ، σ_r و $\tau_{z\theta}$ به ترتیب تنش نرمال محیطی، تنش نرمال عمودی، تنش نرمال شعاعی و تنش برشی هستند. T گشتاور یکنواخت و r_o و r_i شعاع داخلی و خارجی نمونه هستند. F_v ، A_r و A_s به ترتیب بارمحوری، سطح مقطع میله محوری و سطح مقطع نمونه می‌باشند.

۴-۲- نمونه سازی و روش آزمایش



شکل ۴ - اجزای تنش و کرنش ایده‌آل شده درون استوانه توخالی تحت بار محوری W ، گشتاور پیچشی M_T ، فشار داخلی P_i و فشار خارجی P_o : (الف) مختصات و بارهای استوانه توخالی؛ (ب) تنش‌های مؤلفه‌ای المان؛ (پ) کرنش‌های مؤلفه‌ای المان؛ (ت) تنش‌های اصلی المان

جلوگیری شود ($P'_c = 200$ کیلوپاسکال). تمام آزمایش‌ها به روش تحکیم یافته زهکشی نشده (CU) انجام شدند. مرحله برش پس از مرحله تحکیم آغاز شد، جایی که نرخ سرعت گشتاور 0.5° درجه در دقیقه بود، که کمترین سرعت قابل اعمال به سیستم است. در پایان آزمایش‌ها، تخلخل نمونه‌ها اندازه‌گیری شد.

۳- نتایج آزمایش‌ها

از نتایج آزمایش‌های برشی پیچشی استوانه‌ای توخالی زهکشی نشده برای بررسی اثر شکل و اندازه دانه بر رفتار ناهمسان ماسه‌های اشباع استفاده می‌شود. این آزمایش‌ها با فشار تحکیم اولیه 100 کیلوپاسکال، در سه زاویه شیب تنش اصلی 15° ، 30° و 60° درجه و نسبت تنش اصلی میانی 0.5 انجام می‌شود. جدول ۵ مشخصات آزمایش‌های انجام شده را نشان می‌دهد. زاویه شیب مربوط به بارگذاری (عمودی) (α°)، نسبت تنش میانی (b)، نسبت تخلخل پس از تحکیم (e) و تراکم نسبی (D_r) متغیرهای آزمایش بودند.

بسیاری از پژوهشگران به تهیه نمونه‌های بازسازی‌شده از خاک‌های ماسه‌ای از طریق بارش خشک یا مرطوب، رسوب‌دهی دوغابی، ایجاد ارتعاش، یا تراکم لایه‌ای مرطوب با کوبش هر لایه نسبت به لایه بعدی متکی هستند [۲۳ و ۲۴]. علاوه بر این، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که نرخ رسوب‌دهی خاک در طول تهیه نمونه نیز بر چگالی خشک نمونه اثر می‌گذارد [۲۵ و ۲۶]. همچنین در برخی موارد از روش بارش خشک با استفاده از قیف، با نگرداشتن قیف در ارتفاع ثابت بالای پایه قالب‌هایی به طول 76 تا 100 میلی‌متر، به دلیل کوچکی دستگاه استفاده شده است [۲۷ و ۲۸]. در این مطالعه، از روش بارش خشک با قیف به‌عنوان تکنیک آماده‌سازی نمونه استفاده شد. ابعاد نمونه 12 سانتی‌متر ارتفاع، 6 سانتی‌متر قطر داخلی و 10 سانتی‌متر قطر خارجی بود. پیش از مرحله اشباع‌سازی، گاز دی‌اکسید کربن (CO_2) و آب بدون هوا از درون نمونه عبور داده شد. پس از آماده‌سازی نمونه، مرحله اشباع‌سازی تا زمانی که مقدار B اسکمپتون به عدد 0.96 یا بیشتر برسد ادامه می‌یابد. نمونه‌ها به‌صورت همسانگرد (ایزوتروپیک) تحکیم شدند تا از اثر ناهمسانگردی القائی

جدول ۵- مشخصات آزمایش‌های انجام شده

	Sand	%D _r	e	b	α°	P' _c
۱	HAM	۶۱	۰/۸۸	۰/۵	۱۵	۱۰۰
۲	HAM	۵۹	۰/۸۹	۰/۵	۳۰	۱۰۰
۳	HAM	۶۰	۰/۸۹	۰/۵	۶۰	۱۰۰
۴	CHM	۶۱	۰/۸۹	۰/۵	۱۵	۱۰۰
۵	CHM	۶۰	۰/۹	۰/۵	۳۰	۱۰۰
۶	CHM	۵۹	۰/۹	۰/۵	۶۰	۱۰۰
۷	FIR	۶۰	۰/۷۶	۰/۵	۱۵	۱۰۰
۸	FIR	۵۹	۰/۷۶	۰/۵	۳۰	۱۰۰
۹	FIR	۵۹	۰/۷۷	۰/۵	۶۰	۱۰۰
۱۰	LBZ	۶۰	۰/۶۶	۰/۵	۱۵	۱۰۰
۱۱	LBZ	۶۱	۰/۶۶	۰/۵	۳۰	۱۰۰
۱۲	LBZ	۶۰	۰/۶۶	۰/۵	۶۰	۱۰۰
۱۳	OTW	۶۰	۰/۶	۰/۵	۱۵	۱۰۰
۱۴	OTW	۶۰	۰/۶	۰/۵	۳۰	۱۰۰
۱۵	OTW	۶۱	۰/۶	۰/۵	۶۰	۱۰۰

۳-۱- اثر ناهمسانی بر رفتار ناهمراستای مصالح

زاویه ناهمراستایی، α ، به عنوان عدم انطباق (تفاوت مطلق) بین محورهای تنش اصلی و جهت افزایش کرنش پلاستیک اصلی، $\alpha_{d\varepsilon}$ ، تعریف می‌شود (معادله ۱).

$$\zeta = |\alpha - \alpha_{d\varepsilon}| \quad (۱)$$

در شکل ۵، تغییرات ناهمراستایی در هر نوع از خاک که مورد آزمایش قرار گرفته نشان داده شده است. شکل ۵-الف برای ماسه همدان بیانگر افزایش درصد کرنش با افزایش اندازه زاویه اعمال بار است. به طوری که برای زاویه ۱۵ درجه درصد کرنش مورد نیاز برای همگرایی زاویه نمو تنش و کرنش در حدود ۴/۷٪ کرنش، برای زاویه بارگذاری ۳۰ درجه در حدود ۷٪ کرنش و برای زاویه بارگذاری ۶۰ درجه در حدود ۱۰٪ کرنش است.

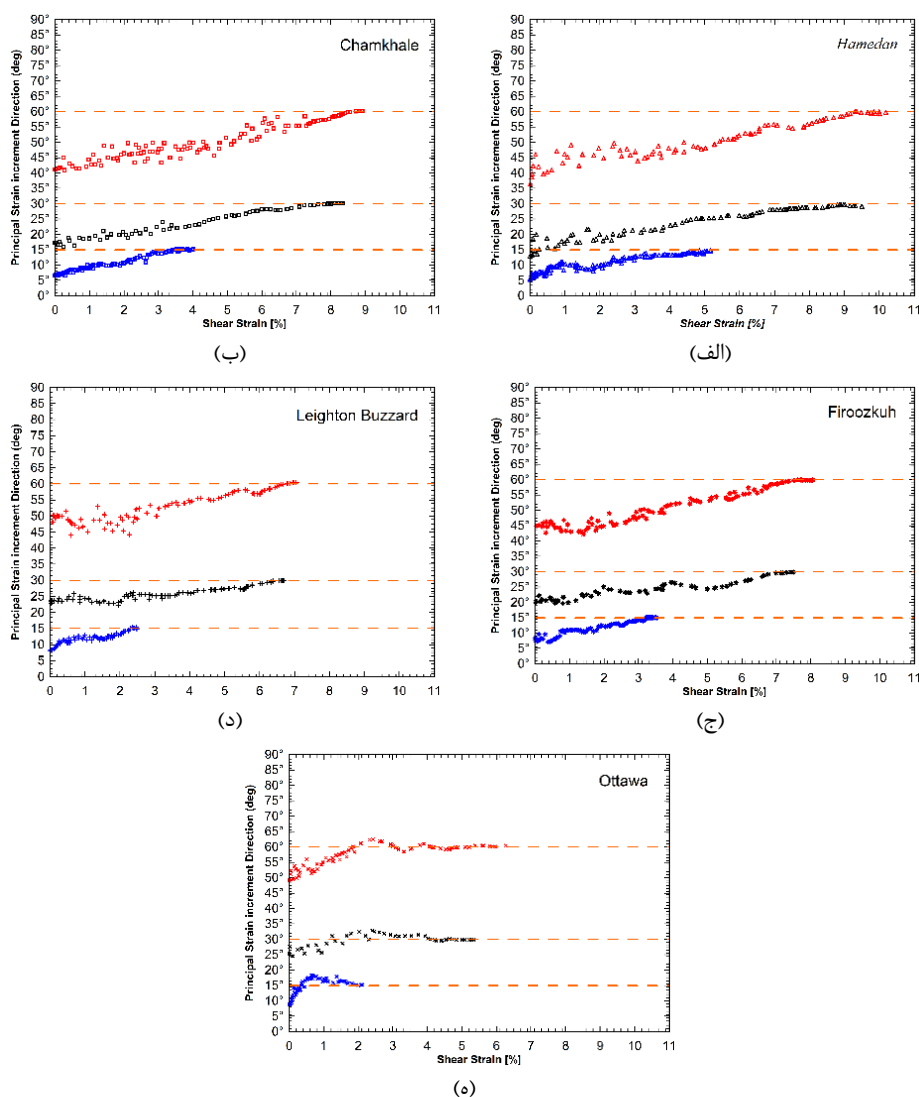
در ادامه شکل‌های ۵-ب، ۵-ج، ۵-د و ۵-ه به ترتیب برای خاک‌های چمخاله، فیروزکوه، لیتون بازارد و اتاوا هستند. در جدول ۶ مقادیر درصد کرنش هر کدام از خاک‌ها آورده شده است.

محاسبات دقیق تنش و کرنش در پیوست ارائه شده است. لازم به ذکر است که مقدار ناهمراستایی براساس نرخ کرنش پلاستیک محاسبه می‌شود، به این معنی که کرنش الاستیک باید حذف شود. با این حال، سهم کرنش الاستیک در کرنش کل ماسه‌ها که در معرض سطوح کرنش متوسط تا بزرگ قرار دارند، ناچیز است؛ بنابراین، نیازی به تفکیک بین آن‌ها نیست [۵ و ۲۹-۳۲].

مقادیر ناهمراستایی برای افزایش‌های کوچک در تنش یا کرنش محاسبه شدند. در آزمایش‌های یکنواخت، ناهمراستایی هر ۰/۱ دقیقه محاسبه شد.

اگرچه کرنش زمانی که نوارهای برشی شروع به شکل‌گیری کردند به شدت غیریکنواخت بود، نقاط داده قبل از تشکیل نوار برشی محدود بودند. تغییر محور نرخ کرنش اصلی، $\alpha - \alpha_{d\varepsilon}$ ، کرنش برشی در شکل ۶ برای نمونه‌های آزمایش شده در جهت‌های مختلف تنش اصلی ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، انحراف قابل توجهی بین محورهای اصلی تنش و جهت افزایش کرنش اصلی قبل از اوج مقاومت برشی رخ داد، اما این جهت‌ها تمایل به

همگرایی پس از اوج مقاومت برشی داشتند که با مطالعات شائو‌هنگ و همکاران مطابقت دارد [۶].



شکل ۵- اثر ناهمسانی ذاتی بر رفتار ناهمراستای مصالح

جدول ۶- درصد کرنش برای همگرایی جهت نمو تنش و کرنش

۶۰	۳۰	۱۵	
۱۰/۵	۶/۹۴	۴/۷۲	همدان
۱۰/۲۵	۶/۳۶	۴	چمخاله
۹/۰۳	۵/۸۵	۳/۱۱	فیروزکوه
۷/۴۴	۴/۱۸	۲/۸۹	لیتون بازارد
۵/۰۷	۳/۰۲	۲/۰۴	اتاوا

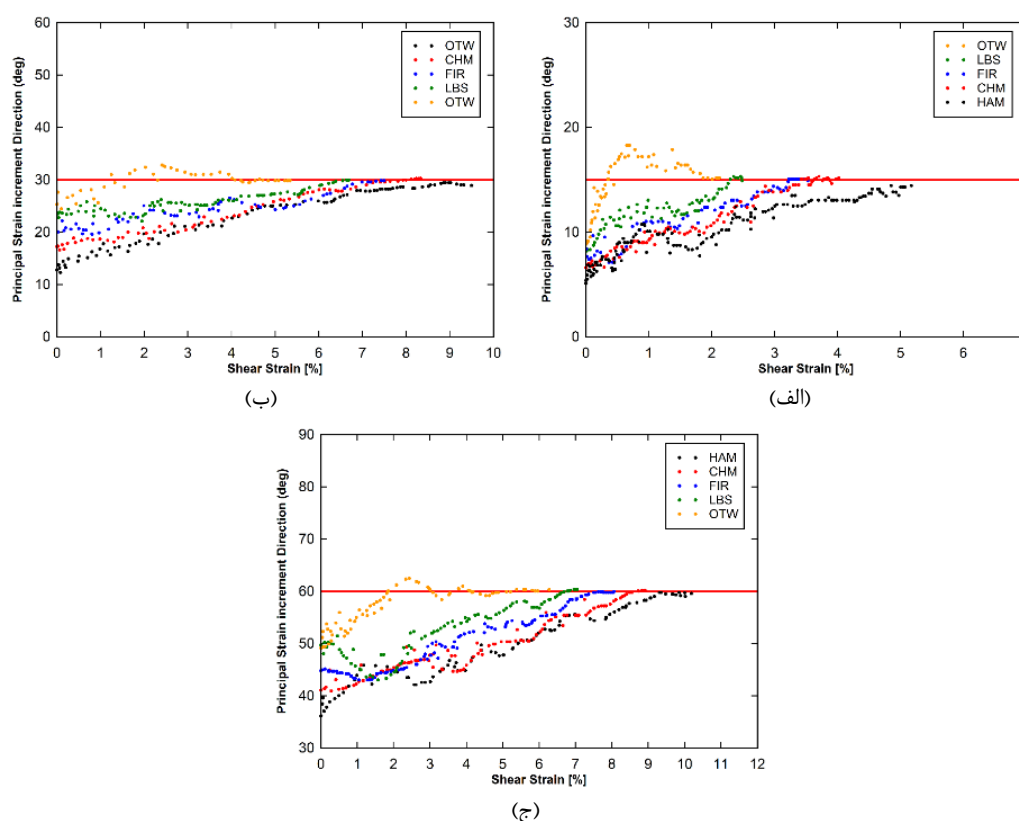
۳-۲- اثر شاخص کرویت بر رفتار ناهمراستای مصالح

از توجه به نمودارهای شکل ۶ مشخص می‌شود که ماسه همدان (HAM) بیشترین مقدار ناهمراستایی را در تمام زوایا دارد. این نشان می‌دهد که این نوع ماسه

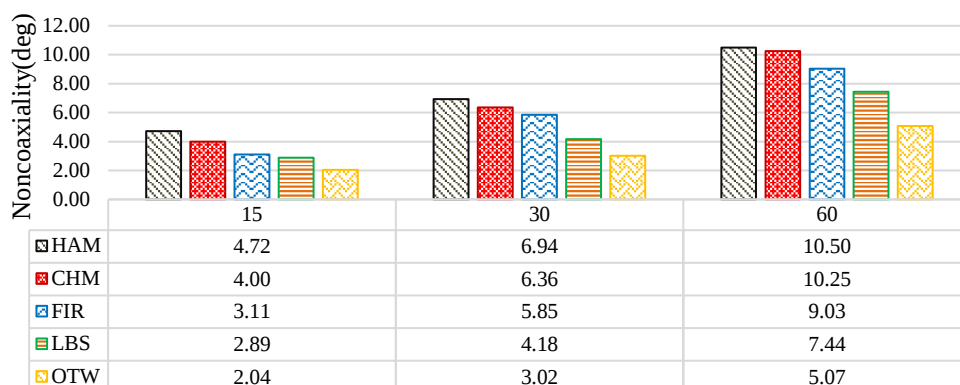
تفاوت بین ماسه‌ها بیشتر است اما در کرنش‌های بالا، رفتار ناهمراستایی بین آن‌ها یکسان‌تر می‌شود. مقادیر متوسط ناهمراستایی $\alpha - \alpha_{dE}$ در مسیرهای تنش مشخص در شکل ۷ ارائه شده‌اند. برای هر دو نوع ماسه، جهت افزایش کرنش با انحراف قابل توجهی از جهت تنش اصلی شروع شد که قبل از اوج مقاومت برشی به‌طور معقولی در محدوده ۴ تا ۱۰ درجه ثابت بود. پس از اوج تنش، جهت α_{dE} به سمت α متمایل شد. این مسئله را می‌توان به قفل‌شدگی ذرات نسبت داد که نقش مهمی در رفتار خاک قبل از اوج مقاومت برشی دارد. قبل از اوج مقاومت برشی، پاسخ نمونه عمدتاً توسط کرنش الاستیک ناشی از ساختار اولیه خاک کنترل می‌شد. با این حال، پس از اوج مقاومت برشی، کرنش پلاستیک غالب شد، زمانی که قفل‌شدگی ذرات شروع به کاهش کرد.

حساس‌ترین نوع نسبت به تغییرات برشی است. همچنین ماسه اتاوا (OTW) کمترین مقدار ناهمراستایی را دارد، یعنی این ماسه مقاومت بیشتری در برابر تغییرات ناهمراستایی نشان می‌دهد. ماسه‌های چمخاله (CHM)، فیروزکوه (FIR) و لیتون‌بازارد (LBS) مقدار ناهمراستایی متوسطی دارند و در زوایای بالاتر رفتار آن‌ها به هم نزدیک‌تر می‌شود. در کرنش‌های کم (۰ تا ۲ درصد)، مقدار ناهمراستایی کم است و بین انواع ماسه تفاوت بیشتری وجود دارد. با افزایش کرنش برشی (۲ تا ۶ درصد)، مقدار ناهمراستایی به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد. این نتیجه با مطالعات هو سازگار است [۳۳].

در کرنش‌های بالا (بیش از ۶ درصد)، مقدار ناهمراستایی به مقدار تقریباً ثابتی همگرا می‌شود، به‌ویژه در زوایای ۳۰ و ۶۰ درجه. در نتیجه در کرنش‌های کم،



شکل ۶- تغییر محور نرخ کرنش اصلی، $\alpha - \alpha_{dE}$ ، با کرنش برشی، (الف) $\alpha = 15^\circ$ ، (ب) $\alpha = 30^\circ$ و (ج) $\alpha = 60^\circ$



شکل ۷- نمودار میزان متوسط ناهمراستایی هر خاک در زوایای تنش اصلی

نشان‌دهنده‌ی رفتار ناهمراستای کرنش است که در مصالح دانه‌ای و خاک‌های چسبیده در بارگذاری برشی دیده می‌شود.

۳- نوسانات در کرنش‌های کم و تثبیت در کرنش‌های بالا؛ در محدوده کرنش‌های کم (صفر تا ۲ درصد)، مقدار زاویه کرنش دارای نوسان‌های شدیدی است، اما با افزایش کرنش برشی (بیش از ۳ درصد)، مقدار زاویه کرنش برای اکثر خاک‌ها به یک مقدار نسبتاً پایدار می‌رسد. این پدیده معمولاً نشان‌دهنده یک رفتار انتقالی از فاز الاستیک به فاز پلاستیک در خاک‌ها است.

۴- برابری تقریبی اثرگذاری شاخص کرویت و تغییر جهت زاویه تنش اصلی، اثر تغییر زاویه تنش اصلی بر مقدار ناهمراستایی تقریباً برابر با تغییرات شاخص کرویت است. به‌طوری که با افزایش اندازه زاویه تنش اصلی از ۱۵ تا ۶۰ درجه سبب تغییرات ناهمراستایی اندازه‌گیری شده در بازه ۳ تا ۶ درجه در خاک‌ها شد، در حالی که اثر تغییرات شاخص کرویت در مقدار ناهمراستایی در بازه ۳ تا ۵ درصد قرار می‌گیرد و از مقایسه آن‌ها باهم به برابری تقریبی مقادیر اندازه‌گیری شده می‌رسیم.

۵- در پایان، این مطالعه بر نقش حیاتی جهت تنش اصلی و مورفولوژی خاک‌های دانه‌ای در تعیین

گوو^{۲۱} و سو [۳۲] نیز گزارش دادند که قفل‌شدگی ذرات عمدتاً تا اوج تنش ادامه دارد و در حالت بحرانی کاهش می‌یابد. مشاهده شد که مقادیر ناهمراستایی مستقیماً با سطح قفل‌شدگی ذرات مرتبط است. اثر قفل‌شدگی ذرات بر رفتار مکانیکی ماسه در مطالعات قبلی نیز گزارش شده است [۳۴-۴۰].

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

یک سری آزمایش‌های برشی پیچشی بر روی ماسه‌های همدان، چمخاله، فیروزکوه، لیتون بازارد و اتاوا با اندازه کرویت‌های متفاوت انجام شد تا اثر جهت تنش اصلی α و سطح تنش بر ناهمراستایی جهت تنش اصلی و محور افزایش کرنش اصلی بررسی شود. پانزده آزمایش مونوتونیک تحت شرایط کنترل‌شده در جهت تنش اصلی ۱۵، ۳۰ و ۶۰ درجه، تنش همه‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال و چگالی نسبی متوسط انجام شدند. نتایج زیر به دست آمدند:

۱- افزایش میزان ناهمراستایی با افزایش زاویه بارگذاری؛ میزان ناهمراستایی کرنش اصلی به زاویه بارگذاری بستگی دارد و با افزایش زاویه بارگذاری، مقدار ناهمراستایی بیشتر می‌شود.

۲- افزایش زاویه کرنش اصلی با کرنش برشی؛ در تمامی خاک‌ها، با افزایش کرنش برشی، زاویه افزایش کرنش اصلی نیز بیشتر می‌شود. این روند

²¹ Guo and Su

تحقیقات آینده می‌توانند اثر عوامل دیگری مانند توزیع اندازه دانه، شکل ذرات و میزان رطوبت را بر رفتار ناهمراستای خاک مورد بررسی قرار دهند. این موضوع می‌تواند به بهبود مدل‌های پیش‌بینی کمک کرده و توانایی ما را در پیش‌بینی دقیق رفتار خاک تحت شرایط مختلف بارگذاری افزایش دهد.

رفتار ناهمراستای آن‌ها تأکید دارد. یافته‌های این تحقیق درک ما را از چگونگی اثر جهت تنش اعمال‌شده و شکل ذرات بر مکانیزم‌های تغییر شکل در مصالح دانه‌ای عمیق‌تر می‌کند. این بینش‌ها برای مکانیک خاک اهمیت زیادی دارند و پیامدهای مهمی برای طراحی سازه‌های ژئوتکنیکی تحت بارگذاری برشی به همراه دارند.

References

- [1] Cai Y, Yu HS, Wanatowski D, Li X. Noncoaxial behavior of sand under various stress paths. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2013 Aug 1; 139(8): 1381-1395. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000854
- [2] Altuhafi, F.N., M.R. Coop, and V.N. Georgiannou, Effect of particle shape on the mechanical behavior of natural sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2016. 142(12): p. 04016071. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001569
- [3] Chen C, Gu J, Peng Z, Dai X, Liu Q, Zhu GQ. Discrete element modeling of particles sphericity effect on sand direct shear performance. *Scientific Reports*. 2022 Mar 31; 12(1): 5490. doi: 10.1038/s41598-022-09543-9
- [4] Xiao Y, Fang Q, Stuedlein AW, Matthew Evans T. Effect of particle morphology on strength of glass sands. *International Journal of Geomechanics*. 2023 Aug 1; 23(8): 04023117. doi: 10.1061/IJGNALGMENG-8661
- [5] Yang Y, Fei W, Yu HS, Ooi J, Rotter M. Experimental study of anisotropy and non-coaxiality of granular solids. *Granular Matter*. 2015 Apr; 17(2): 189-196. doi: 10.1007/s10035-015-0551-7
- [6] He SH, Yin ZY, Ding Z, Li RD. Particle morphology and principal stress direction dependent strength anisotropy through torsional shear testing. *Canadian Geotechnical Journal*. 2024 Oct 16; 62: 1-23. doi: 10.1139/cgj-2023-0717
- [7] Liu X, Zhang X, Kong L, Zhang S, Wang G. Experimental investigation of noncoaxial behavior of natural granite residual soil. *Acta Geotechnica*. 2023 Mar; 18(3): 1289-303. doi: 10.1007/s11440-022-01660-z
- [8] Wadell H. Volume, shape, and roundness of rock particles. *The Journal of Geology*. 1932 Jul 1; 40(5): 443-4451. doi: 10.1086/624040
- [9] Mitchell, J.K., Soga, K.: others: *Fundamentals of soil behavior*. Wiley, New York (2005).
- [10] Krumbein WC, Sloss LL. *Stratigraphy and sedimentation*. LWW; 1951 May 1.
- [11] Altuhafi F, O'Sullivan C, Cavarretta I. Analysis of an image-based method to quantify the size and shape of sand particles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2013 Aug 1; 139(8): 1290-1307. doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000855
- [12] Rodriguez J, Johansson J, Edeskär T. Particle shape determination by two-dimensional image analysis in geotechnical engineering. In *Nordic Geotechnical Meeting*; 09/05/2012-12/05/2012 2012. 207-218.
- [13] Wadell H. Sphericity and roundness of rock particles. *The Journal of Geology*. 1933 Apr 1; 41(3): 310-331. doi: 10.1086/624040
- [14] Wei LM, Yang J. On the role of grain shape in static liquefaction of sand-fines mixtures. *Géotechnique*. 2014 Jul; 64(9): 740-745. doi: 10.1680/geot.14.T.013
- [15] Xiao Y, Long L, Matthew Evans T, Zhou H, Liu H, Stuedlein AW. Effect of particle shape on stress-dilatancy responses of medium-dense sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2019 Feb 1; 145(2): 04018105. doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001994
- [16] Zheng J, Hryciw RD. Traditional soil particle sphericity, roundness and surface roughness by computational geometry. *Géotechnique*. 2015 Jun; 65(6): 494-506. doi: 10.1680/geot.14.P.192
- [17] Yang J, Luo XD. Exploring the relationship between critical state and particle shape for granular materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2015 Nov 1; 84: 196-213. doi: 10.1016/j.jmps.2015.08.001
- [18] Phansalkar N, More S, Sabale A, Joshi M. Adaptive local thresholding for detection of nuclei in diversity-stained cytology images. In *2011 International conference on communications and signal processing* 2011 Feb 10; 218-220. doi: 10.1109/ICCSP.2011.5739305
- [19] Krumbein WC. Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Research*. 1941 Aug 1; 11(2): 64-72. doi: 10.1306/D42690F3-2B26-11D78648000102C1865D

- [20] Zheng W, Hu X, Tannant DD. Shape characterization of fragmented sand grains via X-ray computed tomography imaging. *International Journal of Geomechanics*. 2020 Mar 1; 20(3): 04020003. doi: **10.1061/(asce)gm.1943-5622.0001599**
- [21] Bahadori H, Ghalandarzadeh A, Towhata I. Effect of non-plastic silt on the anisotropic behavior of sand. *Soils and foundations*. 2008; 48(4): 531-545. doi: **10.3208/sandf.48.531**
- [22] Yoshimi Y, Tokimatsu J, Ohara AN. In situ liquefaction resistance of clean sands over a wide density range. *Geotechnique*. 1994 Sep; 44(3): 479-494. doi: **10.1680/geot.1994.44.3.479**
- [23] Ladd RS. Specimen preparation and liquefaction of sands. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1974 Oct; 100(10): 1180-1184. doi: **10.1061/AJGEB6.0000117**
- [24] Amini F, Qi GZ. Liquefaction testing of stratified silty sands. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. 2000 Mar; 126(3): 208-217. doi: **10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:3(208)**
- [25] Vaid YP, Sivathayalan S, Stedman D. Influence of specimen-reconstituting method on the undrained response of sand. *Geotechnical Testing Journal*. 1999 Sep 1; 22(3): 187-195. doi: **10.1520/GTJ11110J**
- [26] Ghionna VN, Porcino D. Liquefaction resistance of undisturbed and reconstituted samples of a natural coarse sand from undrained cyclic triaxial tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2006 Feb; 132(2): 194-202. doi: **10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:2(194)**
- [27] DeGregorio VB. Loading systems, sample preparation, and liquefaction. *Journal of Geotechnical Engineering*. 1990 May; 116(5): 805-821. doi: **10.1061/(ASCE)0733-9410(1990)116:5(805)**
- [28] Mulilis JP, Seed HB, Chan CK, Mitchell JK, Arulanandan K. Effects of sample preparation on sand liquefaction. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1977 Feb; 103(2): 91-108. doi: **10.1061/AJGEB6.0000387**
- [29] Cai Y. *An experimental study of non-coaxial soil behaviour using hollow cylinder testing*. Doctoral dissertation, University of Nottingham.
- [30] Jiang M, Li L, Yang Q. Experimental investigation on deformation behavior of TJ-1 lunar soil simulant subjected to principal stress rotation. *Advances in Space Research*. 2013 Jul 1; 52(1): 136-146. doi: **10.1016/j.asr.2013.02.001**
- [31] Rodriguez NM, Lade PV. Non-coaxiality of strain increment and stress directions in cross-anisotropic sand. *International Journal of Solids and Structures*. 2014 Mar 1; 51(5): 1103-1114. doi: **10.1016/j.ijsolstr.2013.12.003**
- [32] Gutierrez M, Ishihara K, Towhata I. Flow theory for sand during rotation of principal stress direction. *Soils and foundations*. 1991 Dec 15; 31(4): 121-132. doi: **10.3208/sandf1972.31.4-121**
- [33] Huo Y. Micro-mechanical study of the particle shape effect on shearing of sands.
- [34] Guo P, Su X. Shear strength, interparticle locking, and dilatancy of granular materials. *Canadian Geotechnical Journal*. 2007 May 1; 44(5): 579-591. doi: **10.1139/t07-010**
- [35] Cresswell A, Powrie W. Triaxial tests on an unbonded locked sand. *Géotechnique*. 2004 Mar; 54(2): 107-115. doi: **10.1680/geot.2004.54.2.107**
- [36] Cuccovillo T, Coop MR. On the mechanics of structured sands. *Géotechnique*. 1999 Dec; 49(6): 741-760. doi: **10.1680/geot.1999.49.6.741**
- [37] Cresswell AW, Barton ME. Direct shear tests on an uncemented, and a very slightly cemented, locked sand. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 2003 May 1; 36(2): 119-132. doi: **10.1144/1470-923601-042**
- [38] Ding Z, Chen Y, He SH, Sun MM. Investigating the long-term deformation behaviour and non-coaxiality of siliceous sand under traffic cyclic loading. *Construction and Building Materials*. 2023 Dec 8; 408: 133672. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2023.133672**
- [39] Chang J, Li S, Wang W, Niu Q. A study of non-coaxial effects on strain localization via micropolar plasticity model. *Acta Geotechnica*. 2022 Mar; 17(3): 721-739. doi: **10.1007/s11440-021-01291-w**
- [40] Triantafyllou PK, Georgiannou VN, Georgopoulos IO. Novel insights into the dilatancy and non-coaxiality of sand under generalised constant- η loading. *Acta Geotechnica*. 2025 Mar; 20(3): 1103-1139. doi: **10.1007/s11440-024-02465-y**

پیوست- محاسبات مرتبط با اندازه‌گیری کرنش در دستگاه استوانه پیچشی توخالی

معادله	پارامتر
$\varepsilon_z = \frac{\Delta H}{H_0}$	کرنش قائم Vertical strain H_0 ارتفاع اولیه نمونه ΔH تغییرات ارتفاع نمونه
$\varepsilon_r = -\frac{l_o - l_i}{r_o - r_i}$	کرنش شعاعی Radial strain
$\varepsilon_\theta = -\frac{l_o + l_i}{r_o + r_i}$	کرنش مماسی Tangential strain
$l_o = \sqrt{\frac{\pi(H_0 r_o^2) + \Delta I_{vol} + \Delta V}{\pi H}} - r_o$ $l_i = \sqrt{\frac{\pi(H_0 r_i^2) + \Delta I_{vol}}{\pi H}} - r_i$	l_o تغییرات شعاع خارجی l_i تغییرات شعاع داخلی ΔI_{vol} تغییرات حجمی سلول داخلی ΔV تغییرات حجمی نمونه
$\varepsilon_{z\theta} = \frac{\Delta\theta(r_o^3 - r_i^3)}{3H(r_o^2 - r_i^2)}$ $\Delta\theta = \frac{\Delta H_{LVDT}}{r_{measurement\ plate}}$	کرنش برشی Shear strain ΔH_{LVDT} قرائت طولی LVDT
$\gamma_{z\theta} = 2 \times \varepsilon_{z\theta}$	کرنش برشی مهندسی Engineering shear strain
$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_z + \varepsilon_\theta}{2} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_z - \varepsilon_\theta}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{z\theta}}{2}\right)^2}$	کرنش برشی بزرگ Major shear strain
$\varepsilon_2 = \varepsilon_r$	کرنش برشی میانی Intermediate shear strain
$\varepsilon_3 = \frac{\varepsilon_z + \varepsilon_\theta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_z - \varepsilon_\theta}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{z\theta}}{2}\right)^2}$	کرنش برشی کوچک minor shear strain
$\alpha = \frac{1}{2} \tan^{-1}\left(\frac{2\tau_{z\theta}}{\sigma_z - \sigma_\theta}\right)$	جهت تنش اصلی بزرگ نسبت به محور عمودی Direction of major principal stress to the vertical axis
$\alpha_{d\varepsilon} = \frac{1}{2} \tan^{-1}\left(\frac{d\gamma_{z\theta}}{d\varepsilon_z - d\varepsilon_\theta}\right) = \frac{1}{2} \tan^{-1}\left(\frac{2d\varepsilon_{z\theta}}{d\varepsilon_z - d\varepsilon_\theta}\right)$	جهت کرنش پلاستیک اصلی بر روی محور عمودی با در نظر گرفتن کرنش الاستیک ناچیز Direction of principal plastic strain on the vertical axis considering negligible elastic strain