# ارزیابی نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی در خاکهای دانهای از ویژگیهای دانهبندی و شکل ذرات

احسان پگاه\*۱

۱. استادیار، گروه زمین شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

تاریخ **پذیرش**: ۱۴۰۲/۰۳/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۰۷

#### چکیدہ

نسبتهای ناهمسانگردی سختی برشی کشسان و ناهمسانگردی ساختار بافتی در خاکهای دانهای از ویژگیهای بسیار مهم در مکانیک خاک میباشند که میتوانند مستقیماً بر بسیاری از مشخصههای ژئوتکنیکی تأثیر بگذارند. ناهمسانگردی سختی برشی در یک توده خاک در ارتباطی مستقیم با ناهمسانگردی موجود در ساختار بافتی خاک قرار دارد بهطوری که این ناهمسانگردی دارای نقشی موثر در میزان تغییرات مقادیر نسبت ناهمسانگردی سختی برشی میباشد. هدف این مطالعه، ارزیابی محدوده تغییرات نسبتهای ناهمسانگردی سختی برشی و ساختار بافتی داکهای شنی و ماسهای، و در ادامه ارائه رویکردی نوین برای تخمین نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی در خاکهای شنی و ماسهای، خاک میباشد. با فرض ناهمسانگردی متقاطع، مقادیر سختی برشی و ساختار بافتی در خاکهای شنی و ماسهای، آزمایشگاهی و صحرایی بر روی ۲۰۰ نمونه متفاوت از ۴۳ نوع خاک دانهای مختلف در دنیا، از پیشینه تحقیق گردآوری شدند. آنها سپس با مقادیر متناظر نسبتهای تخلخل، شرایط تنش حاکم بر آزمون، پارامترهای دانهبندی و شکل ذرات ترکیب شدند تا یک پایگاه داده جامع از مدولهای برشی ناهمسانگرد بر حسب شرایط آزمایش تهیه گردد. با تجزیه و محاسبه شدند. مقادیر حاصل برای نسبتهای تخلخل، شایط تنش حاکم بر آزمون، پارامترهای دانهبندی و شکل ذرات ترکیب شدند تا یک پایگاه داده جامع از مدولهای برشی ناهمسانگرد بر حسب شرایط آزمایش تهیه گردد. با تجزیه و ترکیب شدند تا یک پایگاه داده جامع از مدولهای برشی ناهمسانگرد بر حسب شرایط آزمایش تهیه گردد. با تجزیه و محاسبه شدند. مقادیر حاصل برای نسبت ناهمسانگردی سختی برشی و ساختار بافتی در خاکهای مورد مطالعه محاسبه شدند. مقادیر حاصل برای نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی سپس در برابر اطلاعات دانهبندی و شکل ذرات مطالعه میتوانند به عنوان یک تکنیک مناسب برای به دست آوردن تقریبهای مرتبه اول ناهمسانگردیهای ساختار

**کلید واژهها:** خاکهای دانهای، مشخصات شکل ذرات خاک، ناهمسانگردی سختی برشی، ناهمسانگردی ساختار بافتی، ناهمسانگردی متقاطع، ویژگیهای دانهبندی خاک.

#### مقدمه

پارامتر سختی برشی کشسان همواره به عنوان یکی از مشخصههای اساسی در انواع خاکها شناخته می شود. این پارامتر بیانگر رفتار کشسان خاک در محدوده کرنشی غالباً کمتر از <sup>۵</sup>-۱۰ می باشد که از اهمیتی سرشار در بسیاری از کاربردهای مهندسی ژئوتکنیک و زمین شناسی مهندسی برخوردار است. این پارامتر دارای سهمی مهم در مطالعات مسائلی چون اندرکنش خاک و سازه، تحلیل پاسخ زمین به زلزله، مدل سازی تغییر شکل خاک، ارزیابی مقاومت برشی، برآورد نشست، طراحی شالوده، ارزیابی حالت تنش در توده خاک در حال سکون و تخمین پیری می باشد ( Kim and Finno, 2014; Ku and Mayne , 2017; Ng and Yung, 2008; Pegah and Liu, 2016, 2020a, 2020b; (Pegah et al., 2016; Yoo et al., 2018

ناهمسانگردی سختی برشی کشسان در محیط خاک اساساً از دو عامل اصلی ناشی می شود. اولین عامل، ناهمسانگردی ساختار بافتی ذاتی است که حاصلِ فرآیندهای طبیعی رسوب گذاری درجا در صحرا یا روش های آمادهسازی نمونه در آزمایشگاه می باشد، و دیگری ناهمسانگردی حالت تنش ناشی از شرایط بار گذاری است ( Cudny and Staszewska, 2021; Gu et). به طور کلی، ساختار بافتی خاک به نظم هندسی می باشد، و دیگری ناهمسانگردی حالت تنش ناشی از شرایط بار گذاری است ( Cudny and Staszewska, 2021; Gu et). می باشد، و دیگری ناهمسانگردی حالت تنش ناشی از شرایط بار گذاری است ( Cudny and Staszewska, 2021; Gu et). می باشد، و دیگری ناهمسانگردی حالت تنش ناشی از شرایط بار گذاری است ( Cudny and Staszewska, 2021; Gu et). می باشد ما مندس قرار گیری ذرات خاک نسبت به یکدیگر شامل توزیع مکانی فضاهای خالی اشاره دارد ( Auter et al., 2014; Sun et). تمکن قرار گیری ذرات خاک نسبت به یکدیگر شامل توزیع مکانی فضاهای خالی اشاره دارد ( Cuter al., 2014; Sun et). می باشد که به اندازه، شکل، جهت گیری فضایی ذرات تشکیل دهنده و دیگر ویژگی معرف خواص ریز ساختاری یک توده خاک می باشد که به اندازه، شکل، بستگی دارد (Cuter al., 2013, 2022; Handy and Spangler, 2007; Quinteros and Carraro, 2023). به همین دلیل است که سهم بزرگی از تغییرات مشاهده شده در ناهمسانگردی سختی خاکهای دانهای را می توان مستقیماً به ویژگیهای ناهمسانگردی ساختار بافتی در صفحات مختلف خاک نسبت داد. علاوه بر تأثیر منحصر به فرد ناهمسانگردی ویژگیهای ناهمسانگردی سختی برشی و به تبع کاربردهای مرتبط با آن، این ناهمسانگردی همچنین به عنوان یک اروانگرایی، نفوذپذیری و طراحی شالودهها، خاکریزها و سدها معرفی شده است ( ;Handy and Spangler, 2007; Li et al., 2011; Liao and Yang, 2021; Yu et al., 2013). به منظور درک بهتری از مفهوم ناهمسانگردی ساختار بافتی و نمایش حضور این ناهمسانگردی در صفحات عمودی و افقی یک توده از خاک، در شکلهای ۱۵ و ۱۵ هندسه چینش دانهها در گستره دو مقطع عرضی متعامد برای یک نمونه مفروض نشان داده شده است. در واقع با فرض هم اندازه و بیضوی بودن ذرات و همچنین رسوبگذاری آنها به گونهای که محور طویل ذرات به موازات سطح افق قرار گیرد، شکل ۱۵ پیکربندی توده خاک و نتیجتاً ساختار اسکلتی حاصل را در یک صفحه عمودی، و شکل ۱۵ چنین نظامی را در یک صفحه افقی بیان می کند.



شکل ۱. نمایش الگوی هندسی قرارگیری دانههای خاک نسبت به یکدیگر در صفحات (a) عمودی و (b) افقی گذرا از یک توده مفروض شامل ذرات بیضوی هم اندازه و نهشته شده به ترتیبی که محور بلند ذرات افقی باشد

Fig 2. The illustration of geometrical arrangement and positioning of soil grains with respect to one another in (a) vertical and (b) horizontal cross-sections passing from an assumed soil mass with elliptical same-sized particles and deposited along the lengthy axis of grains

نسبت ناهمسانگردی سختی برشی در خاکهای دانه ی معمولاً توسط آزمونهای آزمایشگاهی المان خمشی یا پیزوالکتریک مسطح به واسطه انتشار امواج S در درون نمونه های بازیابی شده از رسوبات درجا اندازه گیری می شود ( ;2020; Dutta et al., 2020; Gao et al., 2015; He et al., 2022; Liu et al., 2022; Shi et al., 2021; 2022 (Escribano and Nash, 2015; Gao et al., 2015; He et al., 2022; Liu et al., 2022; Shi et al., 2021; 2022 در این راستا، مقادیر سرعت موج برشی در صفحات قائم ( $V_{SH}$ ) و افقی ( $V_{SH}$ ) نمونه های خاک با استفاده از مبدل های نصب شده در اطراف نمونه در یک سلول سه محوری محاسبه شده و در نهایت مدول های برشی متناظر  $G_{hh}$  و  $A_{vh}$  بر اساس نظریه کشسانی ناهمسانگرد متقاطع بدست می آیند. با این وجود، برخی اثرات نامطلوب حاصل از دست خوردگی در ساختار بافتی خاک، عدم هم ترازی و ناپایداری مبدل ها در طول فر آیند تغییر شکل نمونه، خطا در کالیبراسیون و تفسیر صحیح اولین زمانهای رسید هنوز به عنوان معایب روشهای آزمایشگاهی به قوت خود موجود میباشند ( Kuwano and Jardine, زمانهای رسید هنوز به عنوان معایب روشهای آزمایشگاهی به قوت خود موجود میباشند ( 2002; Gu et al., 2015; Xu et al., 2020; Pegah et al., 2022; Zamanian et al., 2021

بنابراین، هدف اصلی ما در این مطالعه ارائه رویکردی سودمند است که با استفاده از آن بتوان مقادیر ناهمسانگردی سختی در خاکهای دانهای را به طور غیر مستقیم از نسبتهای ناهمسانگردی ساختار بافتی که به نوبه خود از ویژگیهای دانهبندی و شکل ذرات محاسبه می شوند تعیین نمود. علاوه بر این، همچنین سعی گردید که محدوده تغییرات هر دو نسبت ناهمسانگردی سختی برشی و ناهمسانگردی ساختار بافتی در مقیاسی جهانی و بر مبنای تعداد زیادی از انواع خاکهای دانهای در سراسر دنیا شناسایی گردند. برای دستیابی به این اهداف، مقادیر پارامترهای کشسان ناهمسانگرد متقاطع از نتایج ازمونهای آزمایشگاهی و صحرایی گزارش شده در پیشینه تحقیق همراه با دیگر اطلاعات شرایط آزمایش گردآوری شدند تا یک پایگاه داده جامع از مدول های برشی ناهمسانگرد بر حسب نسبتهای تخلخل متناظر، حالت های تنش تحکیم، متغیرهای دانهبندی، شامل اندازه میانی دانهها (D<sub>50</sub>)، اندازه بیشینه دانهها (D<sub>max</sub>)، ضریب یکنواختی (C<sub>u</sub>) و ضریب دانهبندی (C<sub>r</sub>)، و ویژگیهای شکل ذرات، بیان شده در قالب پارامتر کُرویت (S)، تهیه گردد. دادههای جمعآوری شده در یک معادله تجربی معروف (معادله (۱)) که مدولهای برشی را به عنوان تابعی از نسبت تخلخل، شرایط تنش و ثابتهای ذاتی ماده (*A<sub>ij</sub> در مع*ادله (۱)) بیان میکند پیادهسازی شدند تا درجه ناهمسانگردی ساختار بافتی و مدل تغییرات ان در برابر نسبت تنش محاسبه شوند. نسبتهای ناهمسانگردی ساختار بافتی حاصل سپس در مقابل اطلاعات دانهبندی و شکل ذرات ترسیم شدند تا سطح وابستگی این نسبت به این ویژگیها بررسی شده و روابط بالقوه حاکم بر آنها استخراج گردند. نسبتهای محاسبه شده برای ناهمسانگردی ساختار بافتی از خواص ظاهر سطحی خاک میتوانند متعاقباً با اطلاعات وضعیت بارگذاری در یک توده خاک بهکار روند تا درجه ناهمسانگردی سختی برشی مربوطه را برآورد نمایند. رویکرد پیشنهاد شده در این مطالعه میتواند به عنوان یک روش جایگزین مناسب در مسیر حصول به تقریبهای مرتبه اول برای ناهمسانگردیهای ساختار بافتی و سختی برشي عمل نمايد. نقطه قوت اين مهم را ميتوان در قابليت محاسبه اين پارامترها صرفاً با استفاده از ويژگيهاي دانهبندي و شکل ذرات و بدون نیاز به آزمونهای آزمایشگاهی چالشبرانگیز خلاصه نمود.

# روش محاسبه نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی از مدولهای برشی ناهمسانگرد

برای بهدست آوردن درجه ناهمسانگردی ساختار بافتی در خاکهای دانهای، در این مطالعه از یک رابطه تجربی معتبر به شرح رابطه (۲) استفاده شده است. این رابطه، مولفههای ناهمسانگرد مدول برشی را که به نوبه خود از سرعتهای امواج برشی SV و SH محاسبه می شوند به تنشهای موثر اصلی واقع در جهتهای انتشار و قطبش موج مرتبط می کند ( ,Goudarzy et al.) :2020; Gu et al., 2022; Ku and Mayne, 2013b

$$G_{ij} = A_{ij} F(e) P_a \left(\frac{\sigma'_i + \sigma'_j}{2P_a}\right)^{n_{ij}}$$
(1)

که  $G_{ij}$  مدول برشی کشسان در صفحه *i-j* را نشان میدهد، و  $A_{ij}$  ثابت ذاتی ماده است که بیانگر ساختار بافتی خاک در صفحه  $G_{ij}$  میاشد. F(e) تابع نسبت تخلخل است و  $P_a$  نیز نمایشدهنده فشار مرجع، که در اینجا F(e) تابع نسبت تخلخل است و می شود،

است.  $\sigma'_j e_j'$  به ترتیب معرفی کننده تنشهای موثر در جهتهای انتشار و قطبش موج هستند و توان  $n_{ij}$  نیز درجه وابستگی به تنش برای مدول مربوطه است. از این معادله میتوان مدولهای برشی ناهمسانگرد  $G_{vh}$  و  $G_{hh}$  در یک محیط خاکی ناهمسانگرد متقاطع را به صورت روابط (۲) و (۳) نوشت:

$$G_{vh} = A_{vh} F(e) P_a \left(\frac{\sigma'_v + \sigma'_h}{2P_a}\right)^{n_{vh}}$$
<sup>(Y)</sup>

$$G_{hh} = A_{hh} F(e) P_a \left(\frac{\sigma'_h}{P_a}\right)^{n_{hh}} \tag{(7)}$$

با یک دستکاری ساده، معادلات (۲) و (۳) را میتوان به صورت رابطههای (۴) و (۵) بازنویسی کرد بهطوریکه که امکان استنتاج ثابتهای ۸<sub>۷</sub>h A<sub>hh</sub> A<sub>hh</sub> و ۸<sub>hh</sub> را از تحلیلهای برازش منحنی مقدور میسازد:

$$\frac{G_{vh}}{F(e)P_a} = A_{vh} \left(\frac{\sigma'_v + \sigma'_h}{2P_a}\right)^{n_{vh}} \tag{(f)}$$

$$\frac{G_{hh}}{F(e) P_a} = A_{hh} \left(\frac{\sigma'_h}{P_a}\right)^{n_{hh}} \tag{(\Delta)}$$

بر طبق معادله (۴)، با ترسیم  $\frac{G_{vh}}{F(e)}$  در مقابل  $\frac{A_vh}{2P_a}$ , مقادیر ثابتهای  $A_{vh}$  و  $h_vh$  و  $h_vh$  را می توان از برازش کردن یک تابع توانی بر این اطلاعات به دست آورد. به همین ترتیب، بر اساس معادله (۵) نیز قادر خواهیم بود که مقادیر ثابتهای  $h_h$  و  $h_h$  را با اجرای روندی مشابه از برازش نمودن یک منحنی توانی بر زوج دادههای  $\frac{A_v}{P_a} = \frac{G_{hh}}{F(e)P_a}$  نتیجه گرفت. مقادیر ثابتهای  $A_vh$  و  $h_h$  را اجرای در نهایت می توان برای محاسبه درجه ناهمسانگردی ساختار بافتی در یک توده خاک به صورت معادیر ثابتهای  $A_vh$  استفاده نمود. در نهایت می توان برای محاسبه درجه ناهمسانگردی ساختار بافتی در یک توده خاک به صورت محالی در ثابتهای  $A_vh$  استفاده نمود. معانطور که در ادامه در این مطالعه نشان داده خواهد شد، توانهای  $n_{vh}$  و  $h_{vh}$  معمولاً مقادیر یکسانی را نتیجه می دهند. مایوه بر این، مطالعات کو و همکاران (2017) (Ku et al., 2017) و سادک و همکاران (2017) معاد و می معادیر این بر روی خاکهای معاوه بر این، مطالعات کو و همکاران (2017) (Ku et al., 2017) و سادک و همکاران (2017) معادی می توان فرض نمود که  $\approx h_{vh}$  می از ماله که معانظور که متانظور که مقادیر این توانها با اختلافی اندک، در عمل تقریباً یکسان اند. بنابراین، می توان فرض نمود که  $\approx h_{vh}$  و المام که معادیر این توانها با اختلافی اندک، در عمل تقریباً یکسان اند. بنابراین، می توان فرض نمود که  $n_{vh}$  و  $h_{vh}$  که معان اند. بنابراین، می توان فرض نمود که  $n_{vh}$  و المام می یوان در را می می نوان در در وی خاکهای ندر در ماله که مایواند و این از براوی می به می تواند در ماله می نمون ماید که می تواند در اینه می تواند در این معادیر این می می توان فرض نمود که می تواند در از اطلاعات موجود به می نواند در مایو مسائل می المام این و می می تواند در مورد که می می تواند می می تواند می می تواند در ارزیابی مقدار دارد، یا زمانی که در در بررسی یک سری از مسائل می باشند به گونهای که می توان می می تواند دارد، یا زمانی که از اطلاعات موجود به می تواند در ارزیابی مقدار می در ار می یک می می توان فرض می می تواند در ارزیابی مقدار می می توانی که می تواند در ارزیابی مقدار می در می می توانی می می تواند در ارزیابی مقدارد، یا زمانی که در بر برسی یک سری از مسائل می می خانهای که درساز می می توا

$$\frac{G_{hh}}{G_{vh}} = \frac{A_{hh}}{A_{vh}} \left(\frac{2\sigma'_h}{\sigma'_v + \sigma'_h}\right)^{n_{avg}} \tag{(7)}$$

که مقادیر *Ahh/Avh* و *navg* را میتوان به سادگی از روش برازش منحنی تعیین نمود. آزمونهای آزمایشگاهی و عددی انجام شده توسط کووانو و جاردین (Kuwano and Jardine, 2002) و گو و همکاران ( Gu نمان (et al., 2013, 2017, 2022) نشان دادند مادامی که نسبت تنش  $\sigma'_v/\sigma'_h$  بر روی یک نمونه خاک از یک مقدار آستانه تجاوز نکند، ساختار بافتی طبیعی خاک بدون هر گونه تغییر قابل ملاحظهای تقریباً ثابت باقی خواهد ماند. با این حال، هنگامی که این نسبت به اندازه کافی بزرگ شود به طوری که از مقدار آستانه بگذرد، نمونه خاک دچار پدیده اتساع شده که به معنای ایجاد تغییرات قابل توجه در ساختار بافتی نمونه است. این تغییرات به طور پیوسته تا گسیختگی نهایی نمونه ادامه خواهد داشت به طوری که هیچ مقدار مشخصی را نمیتوان برای ساختار بافتی خاک در این مرحله ارائه کرد. در قالب یک نتیجه گیری میتوان ادعا نمود، مادامی که یک توده خاک رفتاری غیر اتساعی را نشان می دهد، مقادیر محاسبه شده برای ناهمسانگردی ساختار بافتی از روش پیشنهاد شده در این مطالعه به اندازه کافی معتبر هستند به طوری که میتوان آنها را به عنوان شاخص

اعمال رویکرد ارائه شده بر روی خاکهای دانهای

# ایجاد یک پایگاه داده از ویژگیهای کشسان ناهمسانگرد متقاطع و خواص دانهبندی و شکل ذرات خاکهای دانهای

استخراج گردیدند. آنها با نصب اِلمانهای خمشی در تعدادی از دستگاههای سه محوری، مدولهای *G*vh و *G*vh را در ۱۳۴ مقدار مختلف از فشار محفظهای محدودکننده بهدست آوردند. به همین ترتیب، مقادیر کشسان حاصل از ۴۸ آزمون لرزهای انجام شده تحت شرایط بارگذاری متمایز بر روی ۸ نوع مختلف از نمونههای خاک ماسهای بازسازی شده نیز توسط فیوراوانته (Fioravante, 2000) ارائه شد. به منظور فهم تأثیر ناهمسانگردیهای ساختار بافتی و تنشی بر ویژگیهای سختی برشی خاکهای داده ای در ۲۰ ماسهای بازسازی شده نیز توسط فیوراوانته (Fioravante, 2000) ارائه شد. به منظور فهم تأثیر ناهمسانگردیهای ساختار بافتی و تنشی بر ویژگیهای سختی برشی خاکهای دانهای، یاماشیتا و همکاران (Yamashita et al., 2005) چندین آزمون المان خمشی را در ۷۸ حالت تنش همسانگرد بر روی ۸۸ نمونه خاک ماسهای بازمان در ۲۸ حالت تنش همسانگردیهای متفاوت در ژاپن اجرا نمودند. آنها در آزمایشات خود از دو روش مختلف برای تهیه نمونهها در آزمایشات خود از نمونه مان معان مان تروی مان از مانه در ازمای مان خوا دانهای مامان ته در ای از در ۲۸ حالت تنش همسانگرد بر روی ۸۸ نمونه خاک ماسه مای بازیابی شده از دو ساختگاه متفاوت در ژاپن اجرا نمودند. آنها در آزمایشات خود از دو روش مختلف منهای مان مان تر مونه مای ماسه محفودهای با حکنده مای گوناگون در فرآیند آماده سازی نمونه های ماسه مرا از دو ماختگاه متفاوت در ژاپن اجرا نمودند. آنها در آزمایشات خود از دو روش مختلف برای تهیه نمونه هایی با ساختارها و تراکمهای گوناگون در فرآیند آماده سازی نمونه هایی با ساختارها و تراکمهای گوناگون در فرآیند آماده سازی نمونه ها بهره گرفتند تا بازهای دو روش مختلف برای تهیه نمونه های را ارائه نمایند.

سادک و همکاران (Sadek et al., 2007) با تأکید بر استفاده از آزمونهای لرزهای آزمایشگاهی به عنوان تکنیکی دقیق در استنباط ویژگیهای تغییرشکلپذیری مصالح زمینی، یک مجموعه کامل از المان های خمشی و کششی را حول یک سلول مکعبی چند محوری نصب نمودند تا خواص ناهمسانگرد ماسه هوستون را تحت ۶ فشار محفظهای محدودکننده متمایز همسانگرد تعیین نمایند. به منظور ارزیابی اثرات حالت تنش و ساختار بافتی طبیعی خاک بر ناهمسانگردی سختی برشی، وانگ و موک (Wang and Mok, 2008) ترکیبی از آزمونهای آزمایشگاهی و عددی را بر روی ۸ نمونه متفاوت از مصالح دانهای اجرا کردند تا اطلاعات *Gwl* و *Gwl* آنها را در گسترهای از ۴۴ حالت تنش همسانگرد و ناهمسانگرد بهدست آورند. علاوه بر این، مدولهای برشی ناهمسانگرد متعلق به ۶ نمونه بازسازی شده مختلف نیز از مطالعات ازائوی و دیبندتو ( Ezaou بر این، مدولهای برشی ناهمسانگرد متعلق به ۶ نمونه بازسازی شده مختلف نیز از مطالعات ازائوی و دیبندتو ( addet وروس آزمونهای آزمایشگاهی سهموری کرنش-کوچک برای تعیین مشخصات کشسان در ۵۴ سطح تحکیم متفاوت برای سه نوع مختلف از ساختار بافتی استفاده کردند.

فیوراوانته و همکاران (Eoria et al., 2013) نشان دادند که میتوان تمامی ضرایب کشسان ناهمسانگرد متقلطع در خاکهای دانهای را از بررسیهای لرزهای آزمایشگاهی بهدست آورد. آنها از طریق اندازه گیری مولفههای مختلف سرعت موج S در ۶ نمونه خاک ماسهای کربناته، مدولهای *Gvh* و *Ghh* را تحت ۶۸ حالت تحکیم متمایز در یک محفظه کالیبراسیون تعیین نمودند. استفاده کردن از تکنیکهای اندازه گیری سرعت موج S در دستگاههای سهمحوری مرسوم به منظور توصیف ویژگیهای سختی مصالح زمینی، در مطالعات اسکریبانو و نش (Escribano and Nash, 2015) نیز گزارش شد. آنها درجه ناهمسانگردی سختی مصالح زمینی، در مطالعات اسکریبانو و نش (Escribano and Nash, 2015) نیز گزارش شد. آنها درجه ناهمسانگردی سختی داتی در ۵ نمونه خاک ماسهای اشباع با نسبتهای تخلخل متفاوت را برای حالت تنش موثر همسانگرد برشی سه نوع متمایز از خاکهای ماسهای را میتوان توسط مقادیر سرعت اندازه گیری شده از آزمونهای آلمان خمشی در O'Donovan) بر روی یک مدل مصنوعی از یک محیط دانهای یکنواخت، اطلاعات کشسان یک نمونه خاک ماسهای از یک دستگاه سهمحوری واقعی بهدست آورد. بر طبق بررسیهای عددی انجام شده بوسیله ادونووان و همکاران (et al., 2015) بر می مالاعات مدول های مرشی سه نوع متمایز از خاکهای ماسهای را میتوان توسط مقادیر سرعت اندازه گیری شده از آزمونهای آلمان خمشی در محیاه اسهمحوری واقعی بهدست آورد. بر طبق بررسیهای عددی انجام شده بوسیله ادونووان و همکاران ( coo tal., 2015) بر می می مالاعات مدول های مرین مالاعات کشمان در میتوان را رای روش آلمان گسسته (DEM) استخراج گردید. علاوه بر این، گو و شبیه سازیهای آزمون آلمان خمشی مبتنی بر مدل سازی روش آلمان گسسته (DEM) استخراج گردید. علاوه بر این، گو و شده از ماسه خشک تویورا را منتشر کردند که به واسطه استفاده از ذرات کروی بر پایه روش المان گسسته صورت گرفت. آنها مدولهای یانگ، مدولهای برشی، و نسبتهای پواسون ناهمسانگرد را از طریق شبیهسازی آزمونهای برشی مستقیم و سهمحوری زهکشی شده در ۲۴ حالت تنش متفاوت اندازه گیری کردند.

بر اساس نتایج بررسیهای صحرایی گزارش شده توسط پگاه و همکاران (Pegah et al., 2017) و پگاه و لیو ( Pegah and Liu, 2020b)، أنها توانستند مقاير سرعت امواج SV و SH را در ۴۳ عمق مختلف از رسوبات خاکهای شنی و ماسهای در سه مکان متمایز در ایران تعیین نمایند. این مقادیر سپس با اطلاعات مربوط به چگالیهای خاک به کار گرفته شدند تا ضرایب و  $G_{hh}$  و  $G_{hh}$  در لایههای گوناگون ستون خاک مشخص گردند. در اقدامی دیگر، دوتا و همکاران (Dutta et al., 2020)،  $G_{hh}$ دستگاههای پیشرفته سهمحوری مجهز به حسگرهای اندازهگیری سرعت موج را بهکار گرفتند تا ویژگیهای کشسان مربوط به نمونههای تهیه شده از سه خاک ماسهای متنوع را در ۱۵ مقدار مختلف از فشار محفظهای محدودکننده مشخص نمایند. علاوه بر این، به منظور ارزیابی اثر شکل و نحوه رسوبگذاری ذرات خاک بر ناهمسانگردی سختی برشی، اُتسوبو و همکاران (Otsubo et al., 2020) چندین آزمایش عددی را بر روی ۴ نمونه خاک مصنوعی شبیه سازی شده از روش المان گسسته انجام دادند. همچنین، برای بررسی اثر توأمان توزیع اندازه و شکل ذرات بر سختی مصالح دانهای در کرنشهای کوچک، گو و همکاران (Gu et al., 2021) نتایج تجربی حاصل از آزمونهای انتشار امواج لرزهای در ۱۴ نمونه از خاکهای ماسهای را منتشر ساختند. آنها مودهای  $G_{vh}$  و  $G_{hh}$  را در ۴۱ حالت تحکیم متفاوت با استفاده از مبدل های پیزوالکتریک واقع بر محیط نمونهها اندازه گیری کردند.

بر اساس یک سری از دیگر تلاشهای انجام شده توسط شی و هیگمن (Shi and Haegeman, 2021) و شی و همکاران (Shi et al., 2020, 2021, 2022)، مولفههای ناهمسانگرد مدول برشی در ۴۶ نمونه بازسازی شده از ۱۰ نوع خاک ماسهای متنوع، توسط المانهای خمشی نصب شده پیرامون سلولهای سهمحوری آزمایشگاهی اندازه گیری شدند. آنها از پنج روش گوناگون برای آمادهسازی نمونهها استفاده کردند تا مقادیر سختی را در یک گستره جامع از ساختارهای بافتی مختلف تحت ۳۳۸ حالت تنش همسانگرد و ناهمسانگرد تعیین نمایند. هی و همکاران (He et al., 2022) به منظور محاسبه مدولهای سختی کرنش-کوچک در تنوعی از ماسههای سیلیکاته و کربناته با منشأهای زمینشناسی متمایز در دنیا، از روشهای آزمایشگاهی مطمئن استفاده کردند. آنها مودهای گوناگون مدول برشی را توسط ابزارهای سنجش سرعت موج S متصل به یک دستگاه سهمحوری در ۱۸ حالت تنش ناهمسانگرد بهدست آوردند. به طور مشابه، مقادیر  $G_{vh}$  و  $G_{hh}$  مربوط به یک ماسه طبیعی نیز از اندازه گیری های ازمایشگاهی سرعت موج برشی بر روی ۸ نمونه بازسازی شده توسط روش های امادهسازی گوناگون، بوسیله لی و همکاران (Li et al., 2022) مورد بررسی قرار گرفتند. علاوه بر این، مدولهای برشی تعدادی از مصالح دانهای طبیعی و مصنوعی نیز از مطالعات لیو و همکاران (Liu et al., 2022) استخراج شدند. آنها یک سری از آزمایشات انتشار سرعت موج S را بر روی ۹ نمونه مکعبی مختلف با استفاده از مبدلهای مسطح واقع در جهات عمودی و افقی اجرا نمودند تا پارامترهای  $G_{vh}$  و  $G_{hh}$  را در یک تنش همسانگرد محدودکننده محاسبه کنند.

در مجموع، اطلاعات ناهمسانگردی سختی برشی ۱۰۴۲ آزمایش انجام شده بر روی ۲۰۰ نمونه متنوع ماسهای و شنی حاصل از ۴۳ نوع خاک منتسب به مکانهای گوناگون در دنیا از متون و مقالات معتبر گردآوری شدند. باید توجه نمود که فرآیند محاسبه تعداد انواع خاک در این مطالعه بر مبنای اصالت خاک انجام گرفت بهطوری که خاکهای با نام یا منشأ یکسان در مطالعات متمایز، تنها یک بار شمارش شدند حتی اگر دارای خواص فیزیکی متفاوت بودند. برای مثال، در جدول ۱ اطلاعات مربوط به شرایط بارگذاری، مقادیر ثابتهای برشی کشسان، نسبتهای تخلخل و مقادیر تابع نسبت تخلخل برای ماسه کنیا  $d = - F(e) = e^{2d}$  که  $d = - F(e) = e^{2d}$  که معایش داده شده است. همچنین، لازم به ذکر است که تابع نسبت تخلخل برای این خاک به صورت  $F(e) = e^{2d}$ .

Soil type	Test/sample name	$\sigma'_{v}$ (kPa)	$\sigma'_h$ (kPa)	$G_{hh}$ (MPa)	$G_{vh}$ (MPa)	e	F(e)
		50	25	35.1	36.6	1.617	0.559
		100	50	50.1	52.8	1.609	0.562
		150	75	61.9	65.6	1.603	0.564
		200	100	71.8	76.4	1.598	0.567
		251	125	80.8	86.2	1.594	0.568
	461	300	150	88.8	95.0	1.589	0.570
	401	350	175	96.1	103.1	1.585	0.572
		400	200	103.1	110.7	1.582	0.574
		450	225	109.5	117.8	1.578	0.575
		500	250	115.8	124.8	1.574	0.577
		549	275	121.6	131.2	1.571	0.578
		599	300	127.5	137.7	1.567	0.580
		50	51	45.7	40.6	1.623	0.556
		100	100	67.0	59.3	1.614	0.560
Kenya sand		150	151	84.2	74.4	1.607	0.563
		200	200	98.9	87.2	1.601	0.565
		249	250	112.0	98.6	1.596	0.567
	460	300	300	124.2	109.3	1.591	0.570
	400	350	351	135.5	119.1	1.587	0.571
		400	400	146.3	128.4	1.582	0.574
		450	450	156.3	137.2	1.578	0.575
		499	500	165.9	145.5	1.574	0.577
		549	550	175.0	153.4	1.571	0.578
		599	599	183.9	161.1	1.567	0.580
		25	50	45.7	37.4	1.624	0.556
		50	100	67.6	54.1	1.615	0.559
	469	75	150	85.0	67.1	1.608	0.562
		100	200	100.2	78.3	1.603	0.564
		125	250	113.7	88.2	1.598	0.567

جدول ۱. یک پایگاه داده ایجاد شده از سختیهای برشی ناهمسانگرد کرنش-کوچک متعلق به ماسه کنیا Table 1. A developed database of anisotropic small-strain shear stiffnesses relating to Kenva sand

Soil type	Test/sample name	$\sigma'_v$ (kPa)	$\sigma'_h$ (kPa)	$G_{hh}$ (MPa)	$G_{vh}$ (MPa)	е	F(e)
		151	300	126.6	97.6	1.593	0.569
		174	350	137.9	105.8	1.589	0.570
		200	400	149.1	113.9	1.585	0.572
		50	25	57.8	54.6	1.333	0.706
		100	51	81.5	75.9	1.329	0.708
		150	75	99.1	91.6	1.327	0.710
		200	100	114.1	104.7	1.325	0.711
		250	125	127.4	116.4	1.323	0.712
	462	300	150	139.4	126.9	1.321	0.714
	463	350	175	150.3	136.5	1.319	0.715
		400	200	160.7	145.4	1.317	0.716
		449	225	170.2	153.6	1.316	0.717
		500	250	179.5	161.7	1.314	0.718
		550	275	188.0	169.0	1.313	0.719
		599	300	196.4	176.2	1.311	0.720
		49	51	75.0	61.8	1.344	0.699
		100	101	106.3	86.8	1.340	0.701
		151	152	130.5	106.0	1.336	0.704
		201	201	150.3	121.6	1.334	0.705
		250	250	167.8	135.4	1.331	0.707
	462	300	301	184.1	148.2	1.329	0.708
	402	350	351	199.2	160.0	1.326	0.710
		400	401	213.1	170.9	1.324	0.712
		449	450	225.8	180.8	1.322	0.713
		499	500	238.1	190.4	1.320	0.714
		549	549	249.7	199.4	1.318	0.716
		599	600	261.2	208.3	1.316	0.717
		13	25	54.5	43.3	1.349	0.696
		26	51	77.0	59.6	1.347	0.697
		50	100	106.6	80.5	1.344	0.699
		76	151	131.0	97.4	1.339	0.702
		100	200	150.3	110.6	1.337	0.703
	466	126	250	168.1	122.7	1.333	0.706
		150	299	183.6	133.1	1.331	0.707
		175	350	198.5	143.1	1.328	0.709
		200	401	212.0	152.1	1.326	0.710
		225	450	224.8	160.6	1.324	0.712
		250	500	236.5	168.2	1.323	0.712

Soil type	Test/sample name	$\sigma'_v$ (kPa)	$\sigma'_h$ (kPa)	$G_{hh}$ (MPa)	$G_{vh}$ (MPa)	е	F(e)
		275	549	248.0	175.8	1.321	0.714

# محاسبه نسبتهای ناهمسانگردیهای سختی و ساختار بافتی برای خاکهای دانهای مورد مطالعه

همانگونه که در قسمت مقدمه ذکر شد، نسبت ناهمسانگردی سختی در سطوح کرنشی کوچک را می توان از تقسیم مدول های برشی ناهمسانگرد  $G_{hh}/G_{vh}$  در کلیه خاک های مورد برشی ناهمسانگرد  $G_{hh}/G_{vh}$  در کلیه خاک های مورد بررسی، یک گستره وسیع از تغییرات کمی را در بازهای متشکل از شرایط تنش گوناگون نشان دادند. به منظور تجزیه و تحلیل هدفمند ویژگی های تغییرپذیری ناهمسانگردی سختی در خاک های دانه ای، نسبت  $G_{hh}/G_{vh}$  به عنوان تابعی از نسبت تنش مدفمند ویژگی های تغییرپذیری ناهمسانگردی سختی در خاک های دانه ای، نسبت  $G_{hh}/G_{vh}$  به عنوان تابعی از نسبت تنش هدفمند ویژگی های تغییرپذیری ناهمسانگردی سختی در خاک های دانه ای، نسبت  $\sigma_{vh}/\sigma_{vh}$  به عنوان تابعی از نسبت تنش مدفمند ویژگی های تغییرپذیری ناهمسانگردی سختی در خاک های دانه ای، نسبت  $\sigma_{vh}/\sigma_{vh}$  به عنوان تابعی از نسبت تنش  $\sigma_{v}/\sigma_{v}$  در شکل ۲ ترسیم شد. مشاهده می شود که نسبت های مدول برشی، طیف گسترده ای از مقادیر را از ۲۹۳۲ تا ۲/۶۴۰ تا ۲/۶۴۰ و ۲/۶۴۰ در می گیرند. به همین ترتیب، نسبت های تنش متناظر نیز یک بازه وسیع از حالات بارگذاری متنوع را با تغییر بین ۲۵۰/۰ و ۲/۶۴۰ شامل می شوند. در این شکل به وضوح دیده می شود که به طور کلی با افزایش نسبت تنش  $\sigma_{h}/\sigma_{v}$ ، ناهمسانگردی سختی برشی یک روند صعودی را نشان می دهد. به منظور تعیین وابستگی درجه  $M_{0}/\sigma_{vh}$  با همسانگردی در بر می گیرند. به همین ترتیب، نسبت های تنش موثر، یک تحلیل و ۲۰/۴ شامل می شوند. در این شکل به وضوح دیده می شود که به طور کلی با افزایش نسبت تنش  $\sigma_{h}/\sigma_{v}$ ، ناهمسانگردی سختی برشی یک روند صعودی را نشان می دهد. به منظور تعیین وابستگی درجه  $M_{0}/\sigma_{vh}$  به نسبت تنش موثر، یک تحلیل رکز دی مرختی برشی یک روند صعودی را نشان می دهد. به منظور تعیین وابستگی درجه مرام می دادند که همبستگی بین این دو رکسیون جام وری کره می توانی دو ترین مان دادند که همبستگی بین این دو ررگرسیون جامع بر روی کلیه زوج داده ای " $\sigma_{h}/\sigma_{v} - \sigma_{h}/\sigma_{v}$ " مرور زیر نشان داد:

$$\frac{G_{hh}}{G_{vh}} = 1.163 \left(\frac{\sigma_h}{\sigma_v'}\right)^{0.320}; R^2 = 0.321, N = 1042 \tag{Y}$$

که  $R^2$  بیانگر ضریب تعیین و N تعداد نقاط داده سهیم در تحلیل را میباشد. این معادله نشان میدهد که حدود  $N^2$  از تغییرات ناهمسانگردی سختی را میتوان به تغییرات  $\sigma_h'/\sigma_v'$  روی یک توده خاک نسبت داد درحالی که  $N^2$  باقیمانده را میتوان ناشی از دیگر عوامل نظیر خواص ناهمسانگردی ساختار بافتی دانست.



شکل ۲. نمایش تغییرات  $G_{hh}/G_{vh}$  در مقابل نسبت تنش  $\sigma'_h/\sigma'_v$  در خاکهای دانهای Fig 2. The variations of  $G_{hh}/G_{vh}$  against the stress ratio  $\sigma'_h/\sigma'_v$  in granular geomaterials

به منظور محاسبه درجه ناهمسانگردی ساختار بافتی مصالح زمینی مورد نظر، دادههای مربوطه مطابق با روش پیشنهادی در این مطالعه بر حسب تنوع ساختار بافتی در خاکهای مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در خاکهایی که مودهای ناهمسانگرد مدول برشی برای آنها به طور جداگانه گزارش شده بود، ثابت های  $A_{vh}$  و  $A_{hh}$  به ترتیب از اجرای تحلیلهای رگرسیون بر روی زوج دادههای " $\frac{h'}{D} + \frac{\sigma_h}{P}$ " و  $\frac{\sigma_h}{P_a} - \frac{\sigma_h}{P_a}$ " بر طبق معادلات (۴) و (۵) تعیین شدند. مقادیر حاصل سپس به کار گرفته شدند تا نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی  $A_{vh}$  را برای خاکهای متناظر نتیجه دهند. با این وجود، برای خاکهایی که دادههای " $\frac{G_{vh}}{P_e} - \frac{\sigma_h}{P_a}$ " و  $\frac{G_{hh}}{P_a} - \frac{\sigma_h}{P_a}$ " را بای خاکهای متناظر نتیجه دهند. با این رگرسیون بر روی زوج دادههای " $\frac{G_{hh}}{A_{vh}} - \frac{\sigma_h}{P_e}$ " مطابق با معادله (۶) مشخص گردیدند. برای مثال، در شکلهای A وجود، برای خاکهایی که دادههای مرتبط با سختی آنها به صورت  $\frac{G_{vh}}{G_{vh}}$  را برای خاکهای متناظر نتیجه دهند. با این برازش منحنی بر زوج دادههای " $\frac{G_{hh}}{\sigma_{vh}} - \frac{2\sigma'_{h}}{\sigma_{v}} - \frac{\sigma_{h}}{\sigma_{v}+\sigma_{h}}$ " مطابق با معادله (۶) مشخص گردیدند. برای مثال، در شکلهای A ورازش منحنی بر زوج دادههای " $\frac{A_{hh}}{\sigma_{vh}} - \frac{2\sigma'_{h}}{\sigma_{v}+\sigma_{h}}$ " مطابق با معادله (۶) مشخص گردیدند. برای مثال، در شکلهای A ورازش منحنی بر زوج دادههای " $\frac{A_{hh}}{\sigma_{vh}} - \frac{2\sigma'_{h}}{\sigma_{v}+\sigma_{h}}$ " مطابق با معادله (۶) مشخص گردیدند. برای مثال، در شکلهای A ورازش منحنی بر زوج دادههای " $\frac{A_{vh}}{\sigma_{v}+\sigma_{h}}$ " مطابق با معادله (۶) مشخص گردیدند. برای مثال، در شکلهای A ورازش منحنی بر زوج دادههای " $\frac{A_{vh}}{\sigma_{v}+\sigma_{h}}$ " مطابق با معادله (۶) مشخص گردیدند. برای مثال، در شکلهای می می و مرازش منحنی بر زوج دادههای مرازم در حاکه مرازم و مورت ترسیمی نشان داده شده است. از شکل A م می می در می که به صورت A<sub>vh</sub> و A<sub>vh</sub> از مکل A اجرا شده در شکل به صورت A<sub>vh</sub> و A<sub>vh</sub> و P<sub>0</sub> از می مرازم داند، که به نوبه خود اثبات کنده دوت بالای همبستگیها و ثابتها است. نتایج نشان دادند که درجه ناهمسانگردی ساختار بافتی در این ماسه ۲۰/۱۰ =  $A_{vh}$ 

![](_page_12_Figure_1.jpeg)

(b) (A<sub>νh</sub> برای استنتاج  $G_{vh}/F(e)P_a$  در برابر  $G_{vh}/2P_a$  برای استنتاج  $A_{vh}$  برای استنتاج (b) (b) (a)  $A_{vh}$  برای استنتاج  $A_{vh}$  برای استنتاج (b)  $A_{vh}/2P_a$  برای استنتاج (b)  $A_{vh}/2P_a$  برای استنتاج (b)  $A_{vh}/2P_a$  برای استنتاج (c)  $A_{vh}/2P_a$  برای (c)  $A_{vh}/2P_a$  برای (c)  $A_{vh}/2P_a$  (c)  $A_{vh}/2P_a$ 

Fig 3. The derivation process of constants  $A_{vh}$  and  $A_{hh}$  for Kenya sand. (a) Depicting  $G_{vh}/F(e)P_a$  versus  $(\sigma'_v + \sigma'_h)/2P_a$  for extraction of  $A_{vh}$ ; (b) Depicting  $G_{hh}/F(e)P_a$  versus  $\sigma'_h/P_a$  for extraction of  $A_{hh}$ 

به طور کلی، به منظور ارائه یک پایگاه داده جهانی در خصوص ویژگیهای ساختار بافتی خاکهای دانه ای، مقادیر نتیجه گیری شده  $A_{hh}/A_{vh}$  و  $p_{avg}$  برای تمامی مصالح مورد بررسی در این مطالعه، در ستونهای سوم و چهارم جدول ۲ نمایش داده شدند. خاطر نشان می گردد که برای تعداد اندکی از خاکها، به دلیل محدودیتهایی از قبیل انجام آزمایش در شرایط تنش همسانگرد، امکان برازش یک تابع توانی بر دادههای مربوطه به منظور استخراج مقادیر  $A_{vh}$  و  $p_{avg}$  وجود نداشت. در این موارد، نسبتهای  $A_{hh}/A_{vh}$  و  $p_{avg}$  وجود نداشت. در این موارد، نسبتهای  $A_{hh}/A_{vh}$  و  $p_{avg}$  وجود نداشت. در این موارد، نسبتهای برازش یک تابع توانی بر دادههای مربوطه به منظور استخراج مقادیر  $A_{vh}/A_{vh}$  و  $p_{avg}$  وجود نداشت. در این موارد، نسبتهای  $A_{hh}/A_{vh}$  و  $p_{avg}$  وجود نداشت. در این موارد، نسبتهای  $A_{hh}/A_{vh}$  و  $p_{avg}$  وجود نداشت. در این موارد، نسبتهای  $A_{hh}/A_{vh}$  و  $p_{avg}$  و  $p_{avg}$ 

علاوه بر این، به منظور تشخیص میزان حساسیت ناهمسانگردی ساختار بافتی در خاکهای دانهای به شرایط بارگذاری، مقادیر  $\sigma'_h/\sigma'_v o G_{hh'}/G_{vh}$  برای هر حالت تنش نیز به صورت جداگانه محاسبه شدند. بدین منظور، برای هر خاک، مقادیر  $G_{vh}/G_{vh}$  و  $\sigma'_h/A_{vh}/A_{vh}$ در هر حالت تحکیم به همراه  $n_{avg}$  متناظر در معادله (۶) پیادهسازی شدند تا نسبت  $A_{hh'}/A_{vh}$  مربوطه را ارائه دهند. دادههای بهدست آمده برای  $A_{hh'}/A_{vh}$  سپس در برابر نسبتهای تنش  $\sigma'_h/\sigma'_v$  ترسیم شدند تا مدل تغییرپذیری ناهمسانگردی ساختار بافتی بر حسب وضعیت تنش بیان شود (شکل ۴). اگرچه  $A_{hh'}/A_{vh}$  یک روند صعودی ملایم را با افزایش  $\sigma'_h/\sigma'_v$  از ۲۰/۰ تا بافتی بر حسب وضعیت تنش بیان شود (شکل ۴). اگرچه  $A_{hh'}/A_{vh}$  در عمل بدون تغییر باقی میماند. این خصیصه، بافتی بر مستمر ساختار بافتی خاک در برابر حالت تنش تحمیلی را مادامی که  $\sigma'_h/\sigma'_v$  بین ۲۵/۰ و ۲۰/۰ است اثبات می کند، کد، مستمر ساختار بافتی خاک در برابر حالت تنش تحمیلی را مادامی که  $\sigma'_h/\sigma'_v$  و همکاران ( , 2013) Gu et al., 2013) و گو و همکاران ( , Kuwano and Jardine, 2002) که به نوبه خود با مشاهدات تجربی کووانو و جاردین (کاری است.

![](_page_14_Figure_1.jpeg)

(N = 1.47) شکل ۴. ترسیم تغییرات  $A_{hh}/A_{vh}$  در مقابل نسبت تنش  $\sigma'_h/\sigma'_v$  در خاکهای دانهای (N = 1.47) Fig 4. The variations of  $A_{hh}/A_{vh}$  against the stress ratio  $\sigma'_h/\sigma'_v$  in granular geomaterials (N = 1042)

Soil/sample type	Test/sample name	A <sub>hh</sub> /A <sub>vh</sub>	n <sub>avg</sub>	D <sub>50</sub> (mm)	$D_{max}$ (mm)	$C_u$	$C_c$	S	Reference	
Glass spheres	Test No. 1	0.981	0.155	N/A	0.256	N/A	N/A	1.000	Agarwal and Ishibashi (1992)	
	390									
Ticino sand	383	1 1 7 0	0.232	0 538	0.831	1 583	1 020	0 732	Bellotti et al. (1996)	
Tiento salid	384	1.170	0.232	0.550	0.031	1.565	1.020	0.752	Denotit et al. (1990)	
	385									
	H304									
Ham river sand (new HDS)	H935	1.051	0.240	0.270	0 507	1 670	0.000	0 705		
Ham fiver said (new-fixes)	H601	1.051	0.240	0.270	0.397	1.070	0.990	0.705		
	H508									
Dupkergue and (DKS)	D902	1 454	0.271	0.270	1.020	1 820	0.006	N/A	Kuwano (1999); Kuwano and Jardine (2002)	
Dunkerque sand (DKS)	D903	1.434	0.271	0.270	1.950	1.820	0.900	IN/A		
	G911	1.044	0.281	0.270	0.412	1 280	1.024	1 000		
Glass beads (GB)	G912		0.281	0.270	0.412	1.280	1.034	1.000		
	G922	1.010	0.260	0.140	0.247	1.630	0.967	1.000		
	Tx CI PA3						1.046			
Ticing and	TS - K = 0.5	1 100	0.224	0.550	1.005	1 600		0 722		
Tiemo sand	TS - K = 1.0	1.100	0.234	0.550	1.005	1.000	1.040	0.752		
	TS - K = 2.0								E	
	Tx CI P14								Floravante (2000)	
V	KS - K = 0.5	1.270	0.220	0.120	0 422	1.960	0.970	NT/A		
Kenya sand	KS - K = 1.0	1.270	0.229	0.130	0.455	1.800	0.879	N/A		
	KS - K = 2.0	-								
Towayra cand	TO/DV/Dr = 40%	1.072	0.216	0.108	0.422	1 220	1 000	0.742	Vemeshite et al. (2005)	
i oyoura sand	TO/DV/Dr = 60%	1.073	0.210	0.198	0.422	1.220	1.000	0.743	i ainasnita et al. (2005)	

جدول ۲. مقادیر محاسبه شده برای نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی (Ahh/Avh) و توان تنش میانگین (navg)، همراه با ویژگیهای دانهبندی و شکل ذرات متعلق به خاکهای مورد بررسی در این مطالعه Table 2. The resulting values for fabric anisotropy ratio (Ahh/Avh) and average stress exponent (navg) alongside with grading and particles shape features relating to the investigated soils

Soil/sample type	Test/sample name	Ahh/Avh	navg	D <sub>50</sub> (mm)	$D_{max}$ (mm)	$C_u$	$C_c$	S	Reference
	TO/DV/Dr = 80%								
	TO/MSP-F/V- specimen/Dr = 40% TO/MSP-F/V- specimen/Dr = 60% TO/MSP-F/V- specimen/Dr = 80%	1.123	0.218	0.198	0.422	1.220	1.000	0.743	
	TO/MSP-F/H1- specimen/Dr = 40% TO/MSP-F/H1- specimen/Dr = 60% TO/MSP-F/H1- specimen/Dr = 80%	1.067	0.222	0.198	0.422	1.220	1.000	0.743	
	TO/MSP-F/H2- specimen/Dr = 40% TO/MSP-F/H2- specimen/Dr = 60% TO/MSP-F/H2- specimen/Dr = 80%	0.925	0.224	0.198	0.422	1.220	1.000	0.743	
	KU/DV/Dr = 60% KU/DV/Dr = 80%	1.244	0.279	0.473	1.995	4.460	1.114	N/A	
Kussharo sand	KU/MSP-F/V- specimen/Dr = 80%	1.273	0.251	0.473	1.995	4.460	1.114	N/A	
	KU/MSP-F/H1- specimen/Dr = 80%	0.886	0.247	0.473	1.995	4.460	1.114	N/A	
	KU/MSP-F/H2- specimen/Dr = 80%	0.738	0.246	0.473	1.995	4.460	1.114	N/A	
Hostun sand	BE-K1	1.231	0.243	0.340	0.807	1.500	1.020	0.869	Sadek et al. (2007)
	Simple cubic packing	1.003	0.165	N/A	N/A	N/A	N/A	1.000	
Synthetic assemblies of spherical and clumped aggregates	Face-centered cubic packing	0.942	0.191	N/A	N/A	N/A	N/A	1.000	
	Random packing	1.018	0.183	N/A	N/A	N/A	N/A	1.000	Wang and Mok (2008)
	Spheres set	1.002	0.178	N/A	N/A	N/A	N/A	1.000	
	Three-particle clumps	1.102	0.199	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	

Soil/sample type	Test/sample name	Ahh/Avh	navg	D <sub>50</sub> (mm)	$D_{max}$ (mm)	$C_u$	$C_c$	S	Reference
	Four-particle clumps	1.188	0.196	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
Toyoura sand	Toyoura sand	1.119	0.281	0.170	N/A	1.590	0.960	N/A	
Rice	Rice	1.938	0.204	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
	TC_H400.82p	1 170	0.014	0.249	0.629	1.420	1.000	0.722	
	TE_H400.80p	1.179	0.214	0.348	0.628	1.420	1.060	0.723	
Heatun cond	TC_H400.73p+v	1.217	0.216	0.249	0.628	1 420	1.060	0 722	Ezaoui and Di Benedetto
Hostun sand	TE_H400.74p+v	1.217	0.216	0.348	0.628	1.420	1.060	0.723	(2009
	TC_H400.74p+t	1 1 1 2	0.228	0.249	0.628	1 420	1.060	0 722	
	TE_H400.73p+t	1.112	0.228	0.348	0.028	1.420	1.000	0.725	
	461								
	460								
Kenya sand	469	1 1 5 4	0.244	0.130	0.462	1.860	0.820	N/A	Eigenvante et al. $(2013)$
Kenya salu	463	1.154	0.244	0.150	0.402				1 lofuvunte et ul. (2013)
	462								
	466								
	IC01	_							
	IC02	_							
Hostun RF sand	IC03	1.114	N/A	0.350	0.630	1.978	1.046	0.705	Escribano and Nash (2015)
	IC04								
	AC								
	clean Toyoura sand (0% fines content)	1.066	0.137	0.210	N/A	1.530	N/A	N/A	
Toyoura sand and fines mixtures	Toyoura sand with 2% fines content	1.111	0.191	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Gao et al. (2015)
	Toyoura sand with 8% fines content	1.119	0.279	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
A collection of synthetic crystalline spheres	Face-centered cubic assembly	0.960	0.159	N/A	N/A	N/A	N/A	1.000	O'Donovan et al. (2015)
Toyoura sand simulated by DEM	Isotropic consolidation (IC)	1.025	0.225	0.215	0.334	1.383	1.011	1.000	Gu et al. (2017)

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2024-05-28 ]

Soil/sample type	Test/sample name	Ahh/Avh	navg	D <sub>50</sub> (mm)	$D_{max}$ (mm)	$C_u$	$C_c$	S	Reference
	triaxial extension (TE)								
	triaxial compression (TC)								
	P1						NI/A		
	P2	1.049	0.250	NT/A	NT/ A	N/A		NT/A	
Sandy and graveny geomaterials	P3	1.048	0.259	IN/A	N/A		N/A	N/A	
	P4								
	P1								
	P2								
	P3			N/A					
	P4				N/A	N/A	N/A	N/A	Pegah et al. (2017); Pegah
Sand and gravel combinations with	P5	1.088	0.217						and Liu (2020b)
intre volume of sit	P6								
	P7								
	P8								
	Р9								
	P2		0.272		3.220				
Sand and silty sand	P3	1.031		0.590		3.411	1 1.080	.080 0.921	
	P4								
Toyoura sand	TS	1.228	0.209	0.240	0.357	1.360	0.939	N/A	
Kashima river sand	RS	1.043	0.224	1.720	4.642	1.250	0.959	N/A	Dutta et al. (2020)
Glass beads	GB	1.104	0.246	1.800	2.247	1.140	0.979	1.000	
	R1	0.980	0.206	N/A	2.200	N/A	N/A	N/A	
Artificial groups of spherical glass	R2	1.020	0.172	N/A	3.492	N/A	N/A	N/A	
beads and non-spherical clumps	R4	1.469	0.205	N/A	5.544	N/A	N/A	N/A	Otsubo et al. (2020)
	R6	2.079	0.288	N/A	7.266	N/A	N/A	N/A	
Crushed glass	CG/Cu = 5/Dr = 0.90	1.072	0.176	0.450	0.004	5.000 1	1.257		G ( 1 (2021)
	CG/Cu = 5/q = 300  kPa	1.073	0.176	0.450	0.994			IN/A	Gu et al. (2021)

Soil/sample type	Test/sample name	Ahh/Avh	navg	D <sub>50</sub> (mm)	$D_{max}$ (mm)	$C_u$	$C_c$	S	Reference
	RS/Cu = 5/Dr = 0.90								
Dhain cond	RS/Cu = 5/q = 300  kPa	0.897	0.248	0.450	0.994	5.000	1.203	N/A	
Knem sand	RS/Cu = 5/Dr = 0.45								
	RS/Cu = 1.25/Dr = 0.45	1.043	0.247	0.450	0.500	1.250	1.054	N/A	
Class boods	GB/Cu = 5/Dr = 0.90	0.969	0.202	0.450	0.004	5 000	1 1 1 2	1 000	
Glass beaus	GB/Cu = 5/q = 300  kPa	0.808	0.295	0.430	0.994	5.000	1.112	1.000	
	Series-S1-60-DT								
	Series-S1-40-DT								
	S1-dry tamping/K = 1	1 2 4 5	0.205	0.602	4.001	2 800	1 154	0.454	
	S1-dt/Dr = 57%	1.345	0.295	0.602	4.001	3.890	1.154	0.454	
	S1-dt/Dr = 60%								
	$S1\text{-}DT/Dr = 75 \pm 3\%$								
	Series-S1-60-DFD		0.295	0.602					Shi and Haegeman (2021); Shi et al. (2020, 2021, 2022)
	Series-S1-40-DFD	1.261							
	S1-dry funnel				4.001	3.890	1.154	0.454	
	S1-dfd/Dr = 62% (e0 =							0.454	
S1 sand	0.885) S1-dfd/Dr = 62% (e0 =								
	0.882)								
	Series-S1-60-AP								
	Series-S1-40-AP								
	S1-air pluviation/K = $0.5$								
	S1-air pluviation/K = 2	1.605	0.280	0.602	4.001	3.890	1.154	0.454	
	S1-air pluviation/K = 1								
	S1-ap/Dr = 57%								
	S1-ap/Dr = 62%								
	Series-S1-60-WP	1 537	0.277	0.602	4 001	3 890	1 1 54	0.454	
	Series-S1-40-WP	1.557	0.277	0.002	4.001	5.070	1.1.54	0.434	

Soil/sample type	Test/sample name	Ahh/Avh	navg	D <sub>50</sub> (mm)	$D_{max}$ (mm)	Cu	$C_c$	S	Reference
	S1-water pluviation/K = $\frac{1}{1}$								
	$\frac{1}{\text{S1-wn/Dr} - 61\%}$								
	$S1 \cdot wp/Dr = 60\%$								
	Series-S1-60-MT								
	Series-S1-40-MT								
	S1-moist tamping/K = $1$	1.326	0.245	0.602	4.001	3.890	1.154	0.454	
	S1-mt/Dr = 62%								
	S1-mt/Dr = 58%								
S1+10% FC	$S1+10\% \text{ FC-DT/Dr} = 75$ $\pm 3\%$	1.267	0.288	0.546	4.000	10.606	2.491	N/A	
S1+20% FC	S1+20% FC-DT/Dr = 75 ± 3%	1.269	0.298	0.479	4.000	27.688	3.561	N/A	
S1+30% FC	$S1+30\% \text{ FC-DT/Dr} = 75$ $\pm 3\%$	1.263	0.309	0.379	4.000	43.084	0.602	N/A	
	Series-Mol-60-DT	1.001	0.241	0.170	0.625	1.550	0.952	0.625	
	Series-Mol-40-DT	1.081	0.241	0.179	0.035	1.550	0.852	0.055	
	Series-Mol-60-DFD	1.012	0.244	0.179	0.625	1.550	0.852	0.625	
	Series-Mol-40-DFD	1.015			0.635		0.852	0.635	
Molsand	Series-Mol-60-AP	1 091	0.225	0.170	0.625	1 550	0.852	0.625	
ivioi sanu	Series-Mol-40-AP	1.081	0.225	0.179	0.035	1.550	0.852	0.035	
	Series-Mol-60-WP	0.008	0.235	0 179	0.635	1 550	0.852	0.635	
	Series-Mol-40-WP	0.998	0.235	0.179	0.035	1.550	0.852	0.035	
	Series-Mol-60-MT	0.041	0.236	0.170	0.635	1 550	0.852	0.635	
	Series-Mol-40-MT	0.941	0.230	0.179	0.035	1.550	0.852	0.035	
SMol	Series-SMol-60-AP	1.299	N/A	0.179	0.635	1.550	0.852	0.485	
SD1	Series-SD1-60-AP	1.535	N/A	0.354	1.255	1.550	0.845	0.472	
SD2	Series-SD2-60-AP	1.734	N/A	0.709	2.673	1.550	0.845	0.445	
SCU1	Series-SCU1-60-AP	1.640	N/A	0.600	1.992	1.700	1.134	0.451	

Soil/sample type	Test/sample name	Ahh/Avh	navg	D <sub>50</sub> (mm)	$D_{max}$ (mm)	$C_u$	$C_c$	S	Reference
SCU2	Series-SCU2-60-AP	1.725	N/A	0.600	5.020	7.760	1.265	0.456	
Philippines sand	PH-2	0.979	0.169	0.500	1.178	1.850	0.880	0.530	Us at al. $(2022)$
Leighton Buzzard sand	LBS	1.014	0.224	0.410	1.178	1.870	1.110	0.770	ne et al. (2022)
Dhua can d	2/3/4/5/28/29	1.001	0.236	0.990	4.760	5.840	1.220	0.540	$\mathbf{L}$ is at al. (2022)
Blue sand	35/36	0.985	0.226	0.990	4.760	5.840	1.220	0.540	Li et al. (2022)
	F1	1.015	N/A	0.200	N/A	N/A	N/A	N/A	
Class bands	F2	0.972	N/A	0.200	N/A	N/A	N/A	N/A	
Glass beads	F3	1.006	N/A	0.200	N/A	N/A	N/A	N/A	
	F4	1.076	N/A	0.200	N/A	N/A	N/A	N/A	
Tarran and	F5	1.020	N/A	0.240	N/A	N/A	N/A	N/A	Liu et al. (2022)
Toyoura sand	F6	1.140	N/A	0.240	N/A	N/A	N/A	N/A	
Basmati rice	F7	1.491	N/A	7.100	N/A	N/A	N/A	N/A	
<b>TT</b> 7'1 1 '	F8	1.778	N/A	11.270	N/A	N/A	N/A	N/A	
wild fice	F9	1.486	N/A	11.270	N/A	N/A	N/A	N/A	

### تجزیه و تحلیل دادهها و نتایج حاصل

برای تعیین میزان وابستگی نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی در خاکهای دانهای به ویژگیهای ظاهر سطحی خاکها، اطلاعات مربوط به دانهبندی و شکل کلیه مصالح مورد بررسی در این مطالعه از منابع مربوطه استخراج شدند. ستونهای پنجم تا هشتم جدول ۲، به ترتیب مقادیر استخراج شده برای پارامترهای دانهبندی شامل اندازه میانی دانهها (D<sub>50</sub>)، اندازه بیشینه دانهها (D<sub>max</sub>)، ضریب یکنواختی (C<sub>u</sub>) و ضریب دانهبندی (C<sub>c</sub>) را نشان میدهند. ستون نهم نیز بیانگر ویژگی منتسب به شکل ذرات یعنی کُرویت (S) است. در ادامه، مقادیر محاسبه شده برای A<sub>hh</sub>/A<sub>vh</sub> با این اطلاعات ادغام خواهند شد تا سطح

وابستگی نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی به خواص دانهبندی

در اولین اقدام به منظور حصول به روابط احتمالی بین نسبت  $A_{hh}/A_{vh}$  در خاکهای دانهای و پارامترهای شاخص ویژگیهای دانه بندی، این نسبت همانگونه که در شکلهای ۵۵ تا ۵۵ نشان داده شده است در قابهایی مجزا در برابر پارامترهای  $D_{50}$  دانه بندی، این نسبت همانگونه که در شکلهای ۵۵ تا ۵۵ نشان داده شده است در قابهایی مجزا در برابر پارامترهای  $D_{50}$  م*u D*<sub>0</sub> *u D u D*<sub>0</sub> *u D u D*<sub>0</sub> *u D*<sub>0</sub> *u D u D u D u D u D u D u D u D u D u D u D u D u <i>u D u u D u D u D u D u D u D u D u D u D u D u D u D u D u D u D u u D* 

با این حال، بررسیهای همبستگی بین نسبت  $A_{hh}/A_{vh}$  و خواص دانهبندی  $D_{50}$  و  $D_{max}$ ، سطوحی از وابستگی را آشکار نمودند. در این بین، مطالعات مربوطه بر روی زوج اطلاعات " $A_{hh}/A_{vh} - D_{50}$ " و " $A_{hh}/A_{vh} - D_{max}$ "، روندهای افزایشی را برای  $A_{hh}/A_{vh}$  در برابر هر دو پارامتر  $D_{50}$  و  $m_{max}$  نشان دادند. همانگونه که در شکل ۵۵ به تصویر کشیده شده است، به رغم کمبود دادهها در بازه ۲  $S_{50}$ ، نسبت  $A_{hh}/A_{vh}$  را میتوان در قالب تابعی توانی از اندازه میانی دانهها ارائه نمود:  $\frac{A_{hh}}{A_{vh}} = 1.242 D_{50}^{0.084}; R^2 = 0.211, N = 63$  (۸)

$$\frac{A_{hh}}{A_{vh}} = 1.038 \exp\left(0.055D_{max}\right); R^2 = 0.291, N = 57$$
(9)

در مجموع، نتایج بهدست آمده نشان دادند که نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی در خاکهای دانهای، وابستگی بسیار بالایی به اندازه ذرات و توزیع دانهبندی ندارد. اگرچه تغییرات *Ahh/Avh* در این مصالح درجاتی از وابستگی را به *D*50 و *Cu* و نشان داد، اما آنها به اندازه کافی بزرگ نیستند که منجر به خلق نتایج قاطعانهای شوند. با این وجود، همین سطوح از وابستگی اثبات نمودند که با افزایش قطر ذرات و یکنواختی بافت خاک، نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی در مصالح دانهای افزایش می ابد. از آنجایی که کمبود اطلاعات مشکلسازترین موضوع در اینجا برای نتیجه گیری در مورد سطح واقعی پراکندگی دادهها بود، ممکن است چندان منطقی نباشد که بر روی این نتیجه قویاً تأکید شود. نتیجه گیری قاطعانه در خصوص این مسئله نیازمند بررسیهای بیشتر با حجم به مراتب وسیعتری از دادهاست. با این حال، میتوان آن را به عنوان یک نتیجه مسئله نیازمند در خاکهای در اینجا میتوان آن را به عنوان یک نتیجه تعییرات در وی به محافظه کارانه در کنار این واقعیت در نظر گرفت که ناهمسانگردی ساختار بافتی در خاکهای دانهای تنها تا حدودی به محافظه کارانه در کنار این واقعیت در نظر گرفت که ناهمسانگردی ساختار بافتی در خاکهای دانهای تنها تا حدودی به تغییرات در ویژگیهای دانه دانه کنه به مراتب وسیعتری از دادهاست. با این حال، میتوان آن را به عنوان یک نتیجه محافظه کارانه در کنار این واقعیت در نظر گرفت که ناهمسانگردی ساختار بافتی در خاکهای دانهای تنها تا حدودی به تغییرات در ویژگیهای دانه دانه میتوان آست.

![](_page_23_Figure_2.jpeg)

![](_page_24_Figure_1.jpeg)

![](_page_25_Figure_1.jpeg)

![](_page_26_Figure_1.jpeg)

شکل ۵. بررسی همبستگی بین نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی *Ahh/Avh* و ویژگیهای دانهبندی خاکهای دانهای. (a) الگوی تغییرات *Ahh/Avh* در مقابل اندازه میانی دانهها *500 (N = S*M)؛ (b) الگوی تغییرات *Ahh/Avh د*ر برابر اندازه بیشینه دانهها xahk (C = ۵۲) (c) الگوی تغییرات Ahh/Avh در مقابل ضریب یکنواختی C (A = ۵۴)؛ (b) الگوی تغییرات *Ahh/Avh د*ر برابر ضریب دانهبندی C (۵ = ۳)؛ (c) الگوی تغییرات Ahh/Avh در

Fig 5. The correlation inspection between fabric anisotropy ratio  $A_{hh/}A_{vh}$  and grading particularities of granular geomaterials. (a) The variation pattern of  $A_{hh}/A_{vh}$  in terms of median grain size  $D_{50}$  (N = 63); (b) The variation pattern of  $A_{hh}/A_{vh}$  with respect to maximum grain size  $D_{max}$  (N = 57); (c) The variation pattern of  $A_{hh}/A_{vh}$  in terms of uniformity coefficient  $C_u$  (N = 54); (d) The variation pattern of  $A_{hh}/A_{vh}$  with respect to coefficient of gradation  $C_c$  (N = 53)

مشابه عملیات انجام شده در قسمت قبل، به منظور شناسایی رابطه احتمالی بین  $A_{vh}$  *Avh* و *C*، مقادیر نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی همچنین بر حسب شاخص بیان کننده شکل ذرات مورد بررسی قرار گرفتند. بدین منظور، نسبتهای  $A_{hh}/A_{vh}$ در مقابل مقادیر متناظر *C* در یک قاب نگاشته شدند (شکل *P*) و در ادامه تجزیه و تحلیل همبستگی بین آنها انجام گرفت. در مقایسه با نتایج بهدست آمده از قسمت قبل، به وضوح دیده می شود که یک پیوستگی معقول بین دادهها بدون هر گونه شکاف قابل توجهی وجود دارد به طوری *C hhh/Avh* را می توان به خوبی به پارامتر معرف ویژگی شکل ذرات مرتبط دانست. شکل *P* نشان می دهد که نسبت ناهمسانگردی *hhh/Avh* یک روند کاهشی را با افزایش کرویت داراست. هر قدر که مقدار این پارامتر از واحد فاصله می گیرد، بیانگر این است که دانههای خاک شکل کروی خود را از دست داده و در راستای خاصی طویل می شوند. این موضوع باعث می شود که در فرآیند رسوب گذاری این ذرات، نظم هندسی، وسعت سطوح تماس و به طور کلی می شوند. این موضوع باعث می شود که در فرآیند رسوب گذاری این ذرات، نظم هندسی، وسعت سطوح تماس و به طور کلی الگوی ساختاری خاک در جهات افقی و قائم بسیار متفاوت از آنچه دانههای کروی ایجاد می کنند باشد، که نتیجتاً نیز منجر راستای افقی، این امر معمولاً باعث ایجاد یک ساختار بافتی خواهند شد. با توجه به تمایل قرار گیری محور طویل ذرات در راستای افقی، این امر معمولاً باعث ایجاد یک ساختار بافتی قوی تر در این راستا در قیاس با راستای قائم خواهد شد، که به به خود نیز منجر به ارائه ۱ *حام A h م* موارد می شود (شکل ۶ را بینید).

S تحلیل رگرسیون اعمال شده بر روی زوج اطلاعات " $A_{hh}/A_{vh}$  - S" نشان داد که  $A_{hh}/A_{vh}$  را می توان به خوبی بر حسب S توسط تابع زیر بیان نمود:

$$\frac{A_{hh}}{A_{vh}} = 0.964 \, S^{-0.433}; \, R^2 = 0.536, \, N = 43 \tag{1.}$$

این معادله بیان می دارد که مقادیر نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی در خاکهای دانهای را می توان در قالب یک تقریب مرتبه اول از شاخص معرف شکل ذرات بر آورد نمود. با این وجود باید توجه داشت که محدودیت موجود در تعداد اطلاعات کماکان می تواند به عنوان مانعی بر مسیر دستیابی به یک نتیجه گیری صریح ایفای نقش کند.

![](_page_28_Figure_1.jpeg)

 $(N = 4\pi) S$  شکل ۶. مدل تغییرات نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی  $A_{hh}/A_{vh}$  در برابر کرویت S (N = 43) Fig 6. The variations model of  $A_{hh}/A_{vh}$  against the sphericity S (N = 43)

نتايج و بحث

تعیین نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی و شناسایی محدوده تغییرات آن در مصالح دانهای از اهداف اصلی در این مطالعه بود. بدین منظور، اطلاعات مربوط به تعداد زیادی از خاکها از مقالات و گزارشات معتبر گردآوری شده و بر حسب تنوع ساختار بافتی در خاکهای مختلف طبقهبندی گردیدند. در راستای اجرای این امر فرض گردید که تراکم نسبی Dr دارای تأثیر قابل توجهی بر تغییرپذیری ناهمسانگردی ساختار بافتی نمونههای بازسازی شده برای یک خاک با تکنیکی یکسان تمیاشد. صحت این ادعا، با ارزیابی مقادیر مله *A*<sub>hh</sub>/*A*<sub>vh</sub> به طور جداگانه برای نمونههای بازسازی شده برای یک خاک با تکنیکی یکسان قابل اثبات است. برای مثال، در شکلهای ۲۵ تا که تراکم نسبی *A*<sub>hh</sub>/*A*<sub>vh</sub> به طور جداگانه برای نمونههای با راهای متفاوت در خاکهای مختلف قابل اثبات است. برای مثال، در شکلهای ۲۵ تا که فرآیند استنتاج ثابتهای *A*<sub>vh</sub> و *A*<sub>hh</sub> *A*<sub>v</sub>ای نمونههای ماسه کنیا با ٪۰۴-نمی باشد. صحت این ادعا، با ارزیابی مقادیر ۲۵ که ۲۵ تا ۷ فرآیند استنتاج ثابتهای *A*<sub>vh</sub> و *A*<sub>hh</sub> برای نمونههای ماسه کنیا با ٪۰۶-نمی باشد. صحت این ادعا، با ارزیابی مقادیر ۲۵ که تا ۷۵ فرآیند استنتاج ثابتهای *A*<sub>vh</sub> و *A*<sub>hh</sub> برای نمونههای ماسه کنیا با ٪۰۶-نمی اثبال اثبات است. برای مثال، در شکلهای ۷۵ تا ۷۵ فرآیند استنتاج ثابتهای *A*<sub>vh</sub> و نتیجتاً ۲۰۱۲ زمکارهای ۵۵ و ۷۵ می توان قابل اثبات است. برای مثال، در شکلهای ۲۵ تا که مرا در اینهای متراکم نشان داده شده است. از شکلهای ۲۵ و ۷۵ می توان مرا نمونههای نسبتاً شُل و ٪۹۵ – ۱۰۹ *L*<sub>0</sub> ۲۰۷۸/۲۲۲ الم و نتیجتاً ۲۰۱۲ از شکلهای ۵۵ و ۷۵ می توان شکلهای ۷۵ و ۷۵ این مقادیر را برای نمونههای متراکم به صورت ۱۲۶۴/۲۵۸ و نتیجتاً ۱۷۵۲ از بافتی عملاً بدون هیچ شکلهای ۷۵ و ۷۱ این مقادیر را برای نمونههای متراکم به صورت ۱۲۶۴/۲۵۸ و نتیجتاً ۲۰۵۸ از بافتی عملاً بدون هیچ گونه خطای قابل ملاحظهای مستقل از سطح تراکم نسبی است. همین امر موجب گردید که برای نمونههایی با مقادیر متمایز *م*ونه خطای قابل ملاحظهای مستقل از سطح تراکم نسبی است. همین امر موجب گردید که برای نمونههایی با مقادیر متمایز

![](_page_29_Figure_1.jpeg)

![](_page_30_Figure_1.jpeg)

شکل ۷. فرآیند بهدست آوردن ثابتهای  $A_{vh}$  و  $A_{vh}$  برای ماسه کنیا در حالتهای نسبتاً شُل و متراکم. (a) ترسیم  $G_{vh}/F(e)P_a$  در برابر  $G_{vh}/F(e)P_a$  در برابر  $\sigma'_h/P_a$  به منظور استنتاج  $A_{vh}$  برای (b)  $D_r = \pi - \epsilon + 2$ , (b) ترسیم  $G_{vh}/F(e)P_a$  در برابر  $\sigma'_v + \sigma'_h/2P_a$  (c) ترسیم  $C_v + \sigma'_h/2P_a$  به منظور استنتاج  $A_{vh}$  برای نمونههایی با  $C_v + \sigma'_h/2P_a$  برای نمونه می با  $C_v + \sigma'_h/2P_a$  به منظور استنتاج  $C_v + \sigma'_h/2P_a$  برای نمونه می با  $C_v + \sigma'_h/2P_a$  به منظور استنتاج  $C_v + \sigma'_h/2P_a$  برای  $C_v + \sigma'_h/2P_a$  به منظور استنتاج  $C_v + \sigma'_h/2P_a$  برای  $C_v + \sigma'_h/2P_a$  برای  $C_v + \sigma'_h/2P_a$  برای  $C_v + \sigma'_h/2P_a$  برای  $C_v + \sigma'_h/2P_a$  برای (c)  $C_v + \sigma'_h/2P_a$  (c)  $C_v$ 

Fig 3. The derivation process of constants Avh and Ahh for Kenya sand in relatively loose and dense states. (a) Depicting  $G_{vh'}F(e)P_a$  versus  $(\sigma'_v + \sigma'_h)/2P_a$  to extract  $A_{vh}$  for samples with  $D_r = 30-40\%$ ; (b) Depicting  $G_{hh'}F(e)P_a$  versus  $\sigma'_h/P_a$  to extract  $A_{hh}$  for samples with  $D_r = 30-40\%$ ; (c) Depicting  $G_{vh'}F(e)P_a$  versus  $(\sigma'_v + \sigma'_h)/2P_a$  to extract  $A_{vh}$  for samples with  $D_r = 85-95\%$ ; (d) Depicting  $G_{hh'}F(e)P_a$  versus  $\sigma'_h/P_a$  to extract  $A_{hh}$  for samples with  $D_r = 85-95\%$ 

همچنین، در یک بررسی مشابه مشخص گردید که نسبت *Ahh/Avh*، تقریباً مستقل از مسیر تنش اعمال شده بر نمونه خاک است. به عبارت دیگر، اگرچه بسته به شرایط بارگذاری یا باربرداری مقادیر متفاوتی برای ثابتهای *Avh* و *A*hh بهدست خواهند آمد، اما نسبت آنها با اختلافی اندک در عمل بدون تغییر باقی می ماند. برای مثال، نسبت *Ahh/Avh* از آزمایشات بارگذاری بر ماسههای فیلیپین و بوزارد در هی و همکاران (He et al., 2022) به ترتیب برابر با ۱/۰۳۱ و ۱/۰۲۱ بهدست آمد درحالی که آزمایشات باربرداری این نسبت را به صورت ۱/۹۲۶ و ۱/۰۲۲ ارائه دادند. بنابراین، در اینجا نیز میانگین نسبتهای *Ahh/Avh* به عنوان مقدار معرف ناهمسانگردی ساختار بافتی صرفنظر از مسیر بارگذاری تجربه شده در نظر گرفته شد. رویههای مورد به عنوان مقدار معرف ناهمسانگردی ساختار بافتی صرفنظر از مسیر بارگذاری تجربه شده در نظر گرفته شد. رویههای مورد بحث در بالا موجب جلوگیری از افزونگی نامطلوب اطلاعات *Ahh/Avh* شدند که به نوبه خود می توانست بر نتایج بررسیهای انجام شده اثری منفی داشته باشد.

پدیده پیری مسئله دیگری بود که مشخص گردید تأثیر آن بر نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی تقریباً ناچیز است. مشاهده شد که مقادیر  $A_{hh}/A_{vh}$  متعلق به نمونههای قرار گرفته در معرض پیری به خوبی با مقادیر بهدست آمده از آزمایشات تحت Gao et al. مثال، متعلق به نمونههای قرار گرفته در معرض پیری به خوبی با مقادیر بهدست آمده از آزمایشات تحت  $A_{hh}/A_{vh}$  مطابقت داشتند. برای مثال، آزمونهای انجام شده بر روی ماسه تمیز تویورا توسط گائو و همکاران ( ., Gao et al بعد پیری مطابقت داشتند. برای مثال، آزمونهای انجام شده بر روی ماسه تمیز تویورا توسط گائو و همکاران ( ,, Gao et al بعد پیری مطابقت داشتند. برای مثال، آزمونهای انجام شده بر روی ماسه تمیز تویورا توسط گائو و همکاران ( ,, Ahh/ $A_{vh} = 1/\cdot S$  بنان دادند که تحت شرایط پیری ۲۰۷۲ =  $A_{hh}/A_{vh}$  حال آنکه برای حالت عدم پیری ۲۰۶۱ =  $A_{hh}/A_{vh}$  بود. بنابراین، در این مطالعه، بررسی ناهمسانگردی ساختار بافتی در خاکهای دانهای بدون در نظر گرفتن وضعیت پیری انجام گرفت. همچنین در مقایسه با ماسههای تمیز مشخص شد مادامی که میزان خاکهای ریزدانه در ترکیبات ماسهها با ریزدانهها از یک مقدار آستانه کمتر باشد، نسبتهای تمیز مشابه با مقادیر حاصل برای مصالح دانهای خالص هستند. گرفت. همچنین در مقایسه با ماسههای تمیز مشخص شد مادامی که میزان خاکهای ریزدانه در ترکیبات ماسهها با ریزدانهها از یک مقدار آستانه کمتر باشد، نسبتهای محمد مادامی که میزان خاکهای ریزدانه در ترکیبات ماسهها با ریزدانهها باز یک مقدار آستانه کمتر باشد، نسبتهای تمان مهناه برای آنها مشابه با مقادیر حاصل برای مصالح دانهای خالص هستند. دانهای خالص می خال می منای فرضیه ناهمسانگردی متقاطح، برای خاکهای کانهای خالسای فرضیه ناهمسانگردی متقاطح، برای خاکهای که بر مبنای فرضیه ناهمسانگردی متقاطح، برای خاکهای که بزرگی خالی مان گرفت. همچنین لازم به ذکر است که بر مبنای فرضیه ناهمسانگردی متقاطح، برای خاکهای که بر مراز گرفت شد و مره مر کر در نظر گرفته شد (رکوفت هم و مره مره) در نظر گرفته شد و می مره می مرد می می میزان قرار گرفته شد و مره مران کر ای کردنا مر مرونه مای می مرفی مره مره مر می مرد می مره می مر

# نتيجهگيرى

خاک رخ نخواهد داد. نتایج بهدست آمده از تحلیلهای رگرسیونی در واکاوی سطح وابستگی Ahh/Avh به خواص دانهبندی و شکل دانهها، نشان دادند که پارامترهای S و D<sub>max</sub> و D<sub>50</sub> به ترتیب بیشترین تأثیر نسبی را بر Ahh/Avh دارا میباشند. مقادیر Ahh/Avh حاصل از معادلات ارائه شده در این مطالعه میتوانند همراه با اطلاعات معرف شرایط تنش استفاده شوند تا تقریبهای مرتبه اول را برای درجه ناهمسانگردی سختی در خاکهای دانهای از ویژگیهای ظاهر سطحی آنها ارائه نمایند. **قدر دانی** 

# این مطالعه تحت حمایت مالی بنیاد ملی علوم طبیعی چین اجرا و تکمیل گردید (شماره گرنت: ۵۲۲۵۰۴۱۰۳۴۷). نویسنده این مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از بنیاد مذکور اعلام میدارد.

#### منابع

- Agarwal, T. K., Ishibashi, I., 1992. Anisotropic elastic constants of granular assembly from wave velocity measurements. Studies in Applied Mechanics, 31, 51-60.
- Bellotti, R., Jamiolkowski, M., Lo Presti, D. C. F., O'Neill, D. A., 1996. Anisotropy of small strain stiffness in Ticino sand. Geotechnique, 46, 1, 115-131.
- Bo, L., Xiangwu, Z., 2014. Effects of fabric anisotropy on elastic shear modulus of granular soils. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 13, 2, 269-278.
- Clayton, C. R. I., 2011. Stiffness at small strain: research and practice. Geotechnique, 61, 1, 5-37.
- Cudny, M., Staszewska, K., 2021. A hyperelastic model for soils with stress-induced and inherent anisotropy. Acta Geotechnica, 16, 1983-2001.
- Das, B. M., 2008. Advanced Soil Mechanics, 3rd ed. Taylor and Francis, New York, USA.
- Das, B. M., Sobhan, K., 2014. Principles of Geotechnical Engineering, 4<sup>th</sup> ed. Cengage Learning, Stamford, USA.
- Dutta, T. T., Otsubo, M., Kuwano, R., Sato, T., 2020. Estimating multidirectional stiffness of soils using planar piezoelectric transducers in a large triaxial apparatus. Soils and Foundations, 60, 5, 1269-1286.
- Escribano, D. E., Nash, D. F. T., 2015. Changing anisotropy of G0 in Hostun sand during drained monotonic and cyclic loading. Soils and Foundations, 55, 5, 974-984.
- Ezaoui, A., Di Benedetto, H., 2009. Experimental measurements of the global anisotropic elastic behaviour of dry Hostun sand during triaxial tests, and effect of sample preparation. Geotechnique, 59, 7, 621-635.
- Fioravante, V., 2000. Anisotropy of small strain stiffness of Ticino and Kenya sands from seismic wave propagation measured in triaxial testing. Soils and Foundations, 40, 4, 129-142.
- Fioravante, V., Giretti, D., Jamiolkowski, M., 2013. Small strain stiffness of carbonate Kenya Sand. Engineering Geology, 161, 65-80.
- Gao, Y., Wang, Y. H., Su, J. C. P., 2015. Experimental characterization of the influence of fines on the stiffness of sand with inherent fabric anisotropy. Soils and Foundations, 55, 5, 1148-1157.
- Goudarzy, M., Magnanimo, V., Konig, D., Schanz, T., 2020. Anisotropic stress state and small strain stiffness in granular materials: RC experiments and DEM simulations. Meccanica, https://doi.org/10.1007/s11012-020-01229-8.
- Gu, Q., Sarkar, D., Goudarzy, M., Wichtmann, T., 2021. Combined effect of grain shape and grading on the small-strain stiffness of granular soils at different densities and stress states. Conference: 3. Bodenmechanik Tagung.
- Gu, X. Q., Hu, J., Huang, M., 2017. Anisotropy of elasticity and fabric of granular soils. Granular Matter, 19:33.

- Gu, X. Q., Li, Y., Hu, J., Shi, Z., Liang, F., Huang, M., 2022. Elastic shear stiffness anisotropy and fabric anisotropy of natural clays. Acta Geotechnica, 17, 3229-3243.
- Gu, X. Q., Yang, J., Huang, M., 2013. DEM simulations of the small strain stiffness of granular soils: effect of stress ratio. Granular Matter, 15, 287-298.
- Gu, X. Q., Yang, J., Huang, M., Gao, G., 2015. Bender element tests in dry and saturated sand: Signal interpretation and result comparison. Soils and Foundations, 55, 5, 951-962.
- Handy, R. L., Spangler, M. G., 2007. Geotechnical Engineering: Soil and Foundation Principles and Practice. 5th ed. The McGraw-Hill Companies, New York, USA.
- He, H., Li, S., Senetakis, K., Coop, M. R., Liu, S., 2022. Influence of anisotropic stress path and stress history on stiffness of calcareous sands from Western Australia and the Philippines. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 14, 197-209.
- Kim, T., Finno, R. J., 2014. Elastic shear modulus of compressible Chicago clay. KSCE Journal of Civil Engineering, 18, 7, 1996-2006.
- Ku, T., Mayne, P. W., 2013a. Profiling of K<sub>0</sub> lateral earth coefficient in soils using paired directional G<sub>0</sub> ratios. Journal of Applied Geophysics, 94, 15-21.
- Ku, T., Mayne, P. W., 2013b. Evaluating the in situ lateral stress coefficient (*K*<sub>0</sub>) of soils via paired shear wave velocity modes. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 139, 5, 775-787.
- Ku, T., Subramanian, S., Moo, S. W., Jung, J., 2017. Stress dependency of shear-wave velocity measurements in soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 143, 2, 04016092.
- Kuwano, R., 1999. The stiffness and yielding anisotropy of sand. PhD Thesis, University of London (Imperial College).
- Kuwano, R., Jardine, R. J., 2002. On the applicability of cross-anisotropic elasticity to granular materials at very small strains. Geotechnique, 52, 10, 727-749.
- Lee, C. J., Huang, H. Y., 2007. Wave velocities and their relation to fabric evolution during the shearing of sands. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 27, 1-13.
- L'Heureux, J. S., Long, M., 2017. Relationship between shear-wave velocity and geotechnical parameters for Norwegian clays. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 143, 6, 04017013.
- Li, B., Zeng, X., Yu, H., 2011. Effect of fabric anisotropy on seismic response of strip foundations. Geo-Risk 2011, ASCE, https://doi.org/10.1061/41183(418)27.
- Li, H., Ren, J., Senetakis, K., Coop, M. R., 2022. A study of wave propagation and stiffness anisotropy in anisotropically loaded granular material-synthetic fiber binary systems. Granular Matter, 24:85.
- Liao, D., Yang, Z. X., 2021. Effect of fabric anisotropy on bearing capacity and failure mode of strip footing on sand: An anisotropic model perspective. Computers and Geotechnics, 138, 104330.
- Liu, J., Otsubo, M., Kawaguchi, Y., Kuwano, R., 2022. Anisotropy in small-strain shear modulus of granular materials: Effets of particle properties and experimental conditions. Soils and Foundations, 62, 101105.
- Masin, D., Rott, J., 2014. Small strain stiffness anisotropy of natural sedimentary clays: review and model. Acta Geotechnica, 9, 299-312.
- Ng, C. W. W., Yung, S. Y., 2008. Determination of the anisotropic shear stiffness of an unsaturated decomposed soil, Geotechnique, 58, 1, 23-35.
- O'Donovan, J., O'Sullivan, C. O., Marketos, G., Wood, D. M., 2015. Anisotropic stress and shear wave velocity: DEM studies of a crystalline granular material. Geotechnique Letters, 5, 224-230.
- Otsubo, M., Liu, J., Kawaguchi, Y., Dutta, T. T., Kuwano, R., 2020. Anisotropy of elastic wave velocity influenced by particle shape and fabric anisotropy under  $K_0$  condition. Computers and Geotechnics, 128, 103775.
- Pegah, E., Liu, H., 2016. Application of near-surface seismic refraction tomography and multichannel analysis of surface waves for geotechnical site characterizations: A case study. Engineering Geology, 208, 100-113.

- Pegah, E., Liu, H., 2020a. Evaluation of hyperbolic stress-strain and bulk-modulus model parameters in granular soil mass using seismic surveying. Engineering Geology, 266, 105456.
- Pegah, E., Liu, H., 2020b. Evaluating the overconsolidation ratios and peak friction angles of granular soil deposits using noninvasive seismic surveying. Acta Geotechnica, 15, 3193-3209.
- Pegah, E., Liu, H., Dastanboo, N., 2017. Evaluation of the lateral earth pressure coefficients at-rest in granular soil deposits using the anisotropic components of S-wave velocity. Engineering Geology, 230, 55-63.
- Pegah, E., Liu, H., Gholami, A., 2021. Estimating drained cross-anisotropic elastic parameters in saturated clays using the undrained properties. Engineering Geology, 293, 106340.
- Pegah, E., Liu, H., Gu, X. Q., Gholami, A., 2022. A semi-analytical approach for efficient calculation of drained cross-anisotropic elastic moduli in saturated granular soils from undrained attributes. Computers and Geotechnics, 148, 104794.
- Pegah, E., Mahmoodi, M., Siavashpoo, A., 2016. Evaluation of seismic hazard and site geodynamic properties by using geophysical methods in the north of Iran. Journal of Civil Engineering and Construction, 5, 2, 126-142.
- Quinteros, V. S., Carraro, J. A. H., 2023. The initial fabric of undisturbed and reconstituted fluvial sand. Geotechnique, 73, 1, 1-15.
- Sadek, T., Lings, M., Dihoru, L., Wood, D. M., 2007. Wave transmission in Hostun sand: multiaxial experiments. RIVISTA ITALIANA DI GEOTECNICA, 2, 69-84.
- Shi, J., Haegeman, W., 2021. Predicting the small strain stiffness of a calcareous sand considering sample preparation method and stress path. GeoChina 2021: Smart and Green Solutions for Civil Infrastructures Incorporating Geological and Geotechnical Aspects, 70-77.
- Shi, J., Haegeman, W., Cnudde, V., 2021. Anisotropic small-strain stiffness of calcareous sand affected by sample preparation, particle characteristic and gradation. Geotechnique, 71, 4, 305-319.
- Shi, J., Haegeman, W., Xu, T., 2020, Effect of non-plastic fines on the anisotropic small strain stiffness of a calcareous sand. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 139, 106381.
- Shi, J., Xiao, Y., Hu, J., Wu, H., Liu, H., Haegeman, W., 2022. Small-strain shear modulus of calcareous sand under anisotropic consolidation. Canadian Geotechnical Journal, 59, 878-888.
- Sun, Q., Dong, Q., Cai, Y., Wang, J., Song, X., 2021. Drained deformation characteristics of granular soil under pure principal stress axis rotation: impact of sample preparation. Acta Geotechnica, 16, 1755-1772.
- Teachavorasinskun, S., 2014. Combined Inherent and Stress Induced Anisotropy on the Initial Shear Modulus of Sand. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 19, 8861-8869.
- Wang, Y. H., Mok, C. M. B., 2008. Mechanisms of small-strain shear-modulus anisotropy in soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 134, 10, 1516-1530.
- Wei, J., Zhang, Y., 2020. The relationship between contact-based and void-based fabrics of granular media. Computers and Geotechnics, 125, 103677.
- Xu, K., Gu, X. Q., Hu, C., Lu, L., 2020. Comparison of small-strain shear modulus and Young's modulus of dry sand measured by resonant column and bender–extender element. Canadian Geotechnical Journal, 57, 1745-1753.
- Yamashita, S., Hori, T., Suzuki, T., 2005. Effects of initial and induced anisotropy on initial stiffness of sand by triaxial and bender elements tests. Geomechanics: Testing, Modeling, and Simulation, ASCE, 350-369.
- Yoo, J. K., Park, D., Baxter, C. D. P., 2018. Estimation of drained shear strength of granular soil from shear wave velocity and confining stress. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 144, 6, 04018207.
- Yu. H., Zeng, X., Li, B., Ming, H., 2013. Effect of Fabric Anisotropy on Liquefaction of Sand. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 139, 5, 1-10.

- Zamanian, M., Payan, M., Jafarzadeh, F., Ranjbar, N., Senetakis, K., 2021. Evolution of dynamic properties of cross-anisotropic sand subjected to stress anisotropy. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 147, 7, 04021048.
- Zuo, L., Xu, L., Baudet, B. A., Gao, C., Huang, C., 2022. Small-strain shear stiffness anisotropy of a saturated clayey loess. Geotechnique, https://doi.org/10.1680/jgeot.21.00179.

# Appraisal of Fabric Anisotropy Ratio in Granular Soils Based on Grading and Grains Shape Attributes

Ehsan Pegah\*1

1. Assistant Professor, Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

Received: 27 Mar 2023

Accepted: 07 Jun 2023

### Abstract

The ratios of elastic shear stiffness anisotropy and fabric anisotropy in granular soils are of very important characteristics in soil mechanics, which can influence directly lots of geotechnical engineering attributes. The shear stiffness anisotropy in a soil mass is directly related to the soil fabric anisotropy, which in turn has a fundamental contribution in variations model of shear stiffness anisotropy ratio. The main objective of this study is to evaluate the variations ranges of shear stiffness and fabric anisotropy ratios in granular soils by developing a novel approach for estimating fabric anisotropy ratio from soil grading and particles shape properties. By presuming cross-anisotropy, the anisotropic shear stiffness values of 1042 conducted tests on 200 distinct sandy and gravelly soil specimens from 43 various soil types of diverse sites throughout the world were acquired from literature. Those were then integrated with their associated void ratios, stress conditions, grading parameters and particles shape specifications to produce a comprehensive database of anisotropic shear moduli with respect to testing conditions. The collected data were analyzed, from which the shear stiffness and fabric anisotropy ratios could be calculated for examined geomaterials. The resulting values for fabric anisotropy ratio were then depicted versus grading and particles shape information to inspect the level of dependences through deriving the respective correlations. The findings of this study may serve as a suitable technique to obtain first-order approximations for fabric and shear stiffness anisotropies from soil grading and particles shape characteristics.

**Keywords:** Cross-anisotropy, Fabric anisotropy, Granular soils, Shear stiffness anisotropy, Soil grading properties, Soil particles shape characteristics.

#### Introduction

The elastic shear stiffness parameter is known as the vital feature in various soil types. It is the indicative of elastic soil behavior within the imposed shear strain levels smaller than  $10^{-5}$ , which is of great significance in lots of geotechnical and geological engineering projects. By assuming cross-anisotropy in soils, there exist two distinct values of elastic shear stiffness in a soil medium shown by  $G_{vh}$  (or  $G_{hv}$ ) and  $G_{hh}$ . The ratio of  $G_{hh}/G_{vh}$ , is considered as the degree of elastic shear stiffness anisotropy. Deviation of this ratio from unity reveals the magnitude of anisotropy in the soil mass (Gu et al., 2017; He et al., 2022; Shi et al., 2021; Zuo et al., 2022). The small-strain shear stiffness anisotropy is fundamentally caused by two principal factors: the natural fabric anisotropy and the stress status anisotropy (Cudny and Staszewska, 2021; Gu et al., 2017; Lee and Huang, 2007;

<sup>\*</sup>Corresponding author: e.pegah@khu.ac.ir

DOI: http://doi.org/10.22034/JEG.2023.17.1.1019161

Teachavorasinskun, 2014). A big part of the observed variabilities in stiffness anisotropy of granular geomaterials is attributed to the fabric anisotropy properties in diverse soil planes. Moreover, it has been also emphasized as an important factor on appraisal of engineering particularities including strength, bearing capacity, liquefaction resistance, permeability, and design of footings, embankments and dams (e.g., Bo and Xiangwu, 2014; Das, 2008; Handy and Spangler, 2007; Li et al., 2011; Liao and Yang, 2021; Yu et al., 2013).

The primary goal of this study is to develop a useful approach for determining the shear stiffness anisotropy in granular soils based using on fabric anisotropy ratios, which in turn could be attained from the grading and grains shape characteristics. Furthermore, the variability amplitude of shear stiffness anisotropy and fabric anisotropy ratio were also given on a global scale by employing a huge number of distinguished granular soils in the worldwide.

#### The Computation Method of Fabric Anisotropy Ratio from Anisotropic Shear Moduli

To achieve the fabric anisotropy ratio in granular materials, a well-known experimental relation was employed by this study. It correlates the different modes of shear moduli to the principal effective stresses exerted in the wave propagation and oscillation directions (Goudarzy et al., 2020; Gu et al., 2022; Ku and Mayne, 2013b):

$$G_{ij} = A_{ij} F(e) P_a \left(\frac{\sigma'_i + \sigma'_j}{2P_a}\right)^{n_{ij}}$$
(1)

Where  $G_{ij}$  is the small-strain shear modulus in *i*-*j* plan,  $A_{ij}$  indicates soil fabric in the plan, F(e) is void ratio function,  $P_a = 100$  kPa considered as the reference pressure,  $\sigma'_i$  and  $\sigma'_j$  introduce effective stresses for travelling and oscillation orientations, and  $n_{ij}$  indicates stress exponent. According to this equation, the shear moduli  $G_{vh}$  and  $G_{hh}$  can be given as (Note: the *v* and *h* notations present vertical and horizontal directions, respectively):

$$\frac{G_{vh}}{F(e)P_a} = A_{vh} \left(\frac{\sigma'_v + \sigma'_h}{2P_a}\right)^{n_{vh}}$$
(2)

$$\frac{G_{hh}}{F(e)P_a} = A_{hh} \left(\frac{\sigma'_h}{P_a}\right)^{n_{hh}}$$
(3)

By depicting  $\frac{G_{vh}}{F(e)P_a}$  against  $\frac{\sigma'_v + \sigma'_h}{2P_a}$  from Eq. (2) as well as  $\frac{G_{hh}}{F(e)P_a}$  versus  $\frac{\sigma'_h}{P_a}$  from Eq. (3), the  $A_{vh}$ ,  $A_{hh}$ ,  $n_{vh}$  and  $n_{hh}$  constants might be determined from curve fitting analyses. The  $A_{vh}$  and  $A_{hh}$  is then used to provide the degree of fabric anisotropy as  $A_{hh}/A_{vh}$ .

# A database creation on cross-anisotropic elastic anisotropic attributes and soil grains features For recognizing the degree of shear stiffness and fabric anisotropies in granular materials, the anisotropic shear moduli information of many sandy and gravelly soils was extracted from the given reports in literature. This information was subsequently combined with the respective data on void ratio, stress state, soil grading and particles shape specifications to produce a comprehensive database for conduction of all the required analyses in this study. It caused to identify the variability of $G_{hh}/G_{vh}$ and $A_{hh}/A_{vh}$ ratios, and then represent the $A_{hh}/A_{vh}$ in terms of grading and soil grains particularities. Overall, the necessary data relating to 1042 conducted tests on 200 various specimens belonged to 43 distinguished soil types of miscellaneous locations throughout the world were collected from literature.

#### **Data Analyses and Results**

The  $G_{hh}/G_{vh}$  results displayed a broad area of variations for the investigated soils within a great category of different stress conditions. It is evident that the shear moduli ratios possess an increasing trend limited between 0.392 to 2.640 as long as the stress ratio  $\sigma'_h/\sigma'_v$  varies from 0.250 to 4.00. On the other hand, 80 distinct magnitudes for ratio  $A_{hh}/A_{vh}$  could be attained among all the soils with respect to fabric variety ranging from 0.738 to 2.079. In addition, to identify the susceptibility of fabric anisotropy in granular soils to stress situation, the  $A_{hh}/A_{vh}$  ratios at individual stress states were computed for all soils. Those were subsequently depicted versus stress ratio  $\sigma'_h/\sigma'_v$  to reveal the variations pattern of fabric anisotropy with respect to stress state. The results showed that the  $A_{hh}/A_{vh}$  grew very lightly by rising  $\sigma'_h/\sigma'_v$  from 0.25 to 4.00 so that stays constant in general. This character demonstrates the durability of soil fabric versus the applied stresses provided that  $\sigma'_h/\sigma'_v$  lies within 0.25 to 4.00.

The inspection of possible correlations among  $A_{hh}/A_{vh}$  to grading and particle shapes features (Figs. 1a to 1c) proved a series of dependences, which the best results were given as:

$$\frac{A_{hh}}{A_{vh}} = 1.242 \, D_{50}^{0.084}; R^2 = 0.211, N = 63 \tag{4}$$

$$\frac{A_{hh}}{A_{vh}} = 1.038 \exp(0.055D_{max}); R^2 = 0.291, N = 57$$
(5)

$$\frac{A_{hh}}{A_{vh}} = 0.964 \, S^{-0.433}; R^2 = 0.536, N = 43 \tag{6}$$

Where  $D_{50}$  and  $D_{max}$  are the median and maximum grain sizes, respectively; and S is sphericity. The  $R^2$  and N represents also the statistical information as the coefficient of determination and number of contributed data points in regression analyses, respectively.

![](_page_39_Figure_1.jpeg)

Fig 1. The variations model of  $A_{hh}/A_{vh}$  against (a) the median grain size  $D_{50}$ ; (b) the maximum grain size  $D_{max}$ ; and (c) the sphericity S

#### Conclusions

The principal aim of this study was to recommend a beneficial approach for assessing the fabric anisotropy ratio in cohesionless materials using corresponding information to grading and grains shape attributes. By assuming cross-anisotropy, a large number of acquired data were analyzed accordingly, from which the ratios of fabric anisotropy and their variations range in soils could be deduced. The performed regression analyses on the resulting  $A_{hh}/A_{vh}$  values against grading and

particle shape characteristics indicated some degrees of dependences. It was observed that this ratio possesses the most dependency on S,  $D_{max}$  and  $D_{50}$  variables, respectively, which were expressed by three different correlations for practical applications.

# Acknowledgements

The study is supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52250410347). The support is gratefully acknowledged.