# 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 دریافت:** ۱۴۰۲/۰۱/۰۷ تاریخ **پذیرش:** ۱۴۰۲/۰۳/۱۷

## چکیده

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 به‌طوری‌که 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 در خاک‌های شنی و ماسه‌ای، و در ادامه ارائه رویکردی نوین برای تخمین نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی از مشخصات دانه‌بندی و شکل ذرات خاک می‌باشد. با فرض ناهمسانگردی متقاطع، مقادیر سختی برشی ناهمسانگرد حاصل از ۱۰۴۲ آزمون عددی، 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 تحلیل داده‌های گردآوری شده، نسبت‌های 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 ترسیم گشتند تا سطح وابستگی‌های موجود بررسی شده و روابط بالقوه حاکم بر آنها استخراج گردند. یافته‌های این مطالعه می‌توانند به عنوان یک تکنیک مناسب برای به‌دست آوردن تقریب‌های مرتبه اول ناهمسانگردی‌های ساختار بافتی و سختی برشی از ویژگی‌های دانه‌بندی و شکل ذرات عمل نمایند.

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

* نویسنده مسئول: e.pegah@khu.ac.ir

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

[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]

[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]

## مقدمه

پارامتر سختی برشی کشسان همواره به عنوان یکی از مشخصه‌های اساسی در انواع خاک‌ها شناخته می‌شود. این پارامتر بیانگر رفتار کشسان خاک در محدوده کرنشی غالباً کمتر از $10^{-5}$ می‌باشد که از اهمیتی سرشار در بسیاری از کاربردهای مهندسی ژئوتکنیک و زمین‌شناسی مهندسی برخوردار است. این پارامتر دارای سهمی مهم در مطالعات مسائلی چون اندرکنش خاک و سازه، تحلیل پاسخ زمین به زلزله، مدل‌سازی تغییر شکل خاک، ارزیابی مقاومت برشی، برآورد نشست، طراحی شالوده، ارزیابی حالت تنش در توده خاک در حال سکون و تخمین پیری می‌باشد (Kim and Finno, 2014; Ku and Mayne, 2013a, 2013b, L'Heureux and Long, 2017; Ng and Yung, 2008; Pegah and Liu, 2016, 2020a, 2020b; Pegah et al., 2016; Yoo et al., 2018).

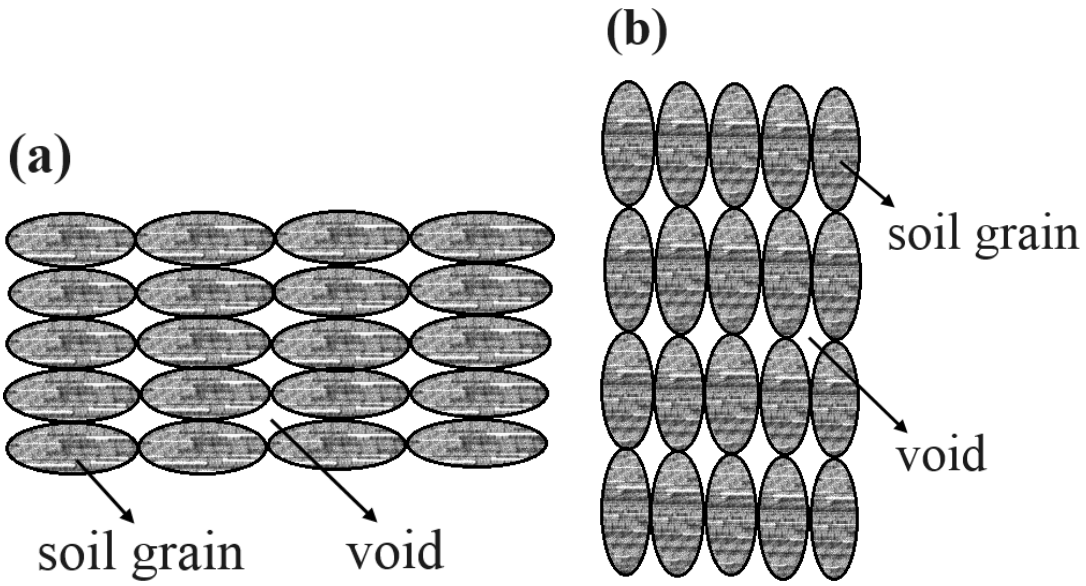
فرآیندهای نهشته شدن طبیعی رسوبات معمولاً منجر به ایجاد لایه‌های خاک ناهمسانگرد می‌شوند که می‌توانند اساساً به صورت محیط‌های ناهمسانگرد متقاطع بر روی بستر رسوب‌گذاری خود در نظر گرفته شوند (Claytone, 2011; Liu et al., 2022; Pegah et al., 2021;). با فرض ناهمسانگردی متقاطع در خاک‌ها، دو مقدار متفاوت برای سختی برشی کشسان در یک توده خاک موجود می‌باشد. اولین مقدار، سختی در صفحه قائم خاک است که توسط مدول برشی $G_{vh}$ (یا $G_{hv}$) نشان داده می‌شود، و دیگری سختی در صفحه افقی خاک است که با مدول برشی $G_{hh}$ بیان می‌گردد. نسبت مدول برشی $G_{hh}$ به مدول برشی $G_{vh}$، یعنی $G_{hh}/G_{vh}$، به عنوان درجه ناهمسانگردی سختی برشی کشسان تعریف می‌شود که مقدار انحراف آن از واحد نشان دهنده شدت ناهمسانگردی موجود در محیط خاک است (Gu et al., 2017; He et al., 2022; Shi et al., 2021; Zuo et al., 2022). در بسیاری از مطالعات گزارش شده است که مقدار این پارامتر دارای تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر طیف گسترده‌ای از تحلیل‌های ژئوتکنیکی می‌باشد به‌طوری‌که تعیین دقیق آن از اهمیتی حیاتی در کاربردهای عملی برخوردار است (Wang and Mok, 2008; Masin and Rott, 2014; Gu et al., 2022; Liu et al., 2022).

ناهمسانگردی سختی برشی کشسان در محیط خاک اساساً از دو عامل اصلی ناشی می‌شود. اولین عامل، ناهمسانگردی ساختار بافتی ذاتی است که حاصلِ فرآیندهای طبیعی رسوب‌گذاری درجا در صحرا یا روش‌های آماده‌سازی نمونه در آزمایشگاه می‌باشد، و دیگری ناهمسانگردی حالت تنش ناشی از شرایط بارگذاری است (Cudny and Staszewska, 2021; Gu et al., 2017; Lee and Huang, 2007; Teachavorasinskun, 2014). به‌طورکلی، ساختار بافتی خاک به نظم هندسی قرارگیری ذرات خاک نسبت به یکدیگر شامل توزیع مکانی فضاهای خالی اشاره دارد (Das and Sobhan, 2014; Sun et al., 2021; Wei and Zhang, 2020). این ویژگی معرف خواص ریزساختاری یک توده خاک می‌باشد که به اندازه، شکل، جهت‌گیری فضایی ذرات تشکیل دهنده و دیگر ویژگی‌های اسکلتی نظیر عدد مختصات و تعداد نقاط تماس بین دانه‌ای بستگی دارد (Gu et 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 می‌توان مستقیماً به ویژگی‌های ناهمسانگردی ساختار بافتی در صفحات مختلف خاک نسبت داد. علاوه بر تأثیر منحصر به فرد ناهمسانگردی ساختار بافتی بر ناهمسانگردی سختی برشی و به تبع کاربردهای مرتبط با آن، این ناهمسانگردی همچنین به عنوان یک عامل بسیار موثر در ارزیابی گستره‌ای از ویژگی‌های مهندسی مانند مقاومت‌های فشاری و برشی، ظرفیت باربری، مقاومت

[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]

[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]

روانگرایی، نفوذپذیری و طراحی شالوده‌ها، خاکریزها و سدها معرفی شده است (Bo and Xiangwu, 2014; Das, 2008; 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 ۱a و ۱b 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 به‌گونه‌ای‌که محور طویل ذرات به موازات سطح افق قرار گیرد، شکل ۱a پیکربندی توده خاک و نتیجتاً ساختار اسکلتی حاصل را در یک صفحه عمودی، و شکل ۱b چنین نظامی را در یک صفحه افقی بیان می‌کند.




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 دانه‌ای معمولاً توسط آزمون‌های آزمایشگاهی المان خمشی یا پیزوالکتریک مسطح به واسطه انتشار امواج S در درون نمونه‌های بازیابی شده از رسوبات درجا اندازه‌گیری می‌شود (Dutta et al., 2020; 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 ($V_{SV}$) و افقی ($V_{SH}$) نمونه‌های خاک با استفاده از مبدل‌های نصب شده در اطراف نمونه در یک سلول سه‌محوری محاسبه شده و در نهایت مدول‌های برشی متناظر $G_{vh}$ و $G_{hh}$ بر اساس نظریه کشسانی ناهمسانگرد متقاطع بدست می‌آیند. با این وجود، برخی اثرات نامطلوب حاصل از دست‌خوردگی در ساختار بافتی خاک، عدم هم‌ترازی و ناپایداری مبدل‌ها در طول فرآیند تغییر شکل نمونه، خطا در کالیبراسیون و تفسیر صحیح اولین

[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]
[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]

زمان‌های رسید هنوز به عنوان معایب روش‌های آزمایشگاهی به قوت خود موجود می‌باشند (Kuwano and Jardine, 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 می‌شوند 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 آزمون‌های آزمایشگاهی و صحرایی گزارش شده در پیشینه تحقیق همراه با دیگر اطلاعات شرایط آزمایش گردآوری شدند تا یک پایگاه داده جامع از مدول‌های برشی ناهمسانگرد بر حسب نسبت‌های تخلخل متناظر، حالت‌های تنش تحکیم، متغیرهای دانه‌بندی، شامل اندازه میانی دانه‌ها ($D_{50}$)، اندازه بیشینه دانه‌ها ($D_{max}$)، ضریب یکنواختی ($C_u$) و ضریب دانه‌بندی ($C_c$)، 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 ($A_{ij}$ و $n_{ij}$ در معادله (۱)) بیان می‌کند پیاده‌سازی شدند تا درجه ناهمسانگردی ساختار بافتی و مدل تغییرات آن 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 برشی عمل نماید. نقطه قوت این مهم را می‌توان در قابلیت محاسبه این پارامترها صرفاً با استفاده از ویژگی‌های دانه‌بندی 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 (۷) استفاده شده است. این رابطه، مولفه‌های ناهمسانگرد مدول برشی را که به نوبه خود از سرعت‌های امواج برشی SV و SH محاسبه می‌شوند به تنش‌های موثر اصلی واقع در جهت‌های انتشار و قطبش موج مرتبط می‌کند (Goudarzy et al., 2020; Gu et al., 2022; Ku and Mayne, 2013b):

$$G_{ij} = A_{ij}\, F(e)\, P_a \left(\frac{\sigma'_i + \sigma'_j}{2P_a}\right)^{n_{ij}} \qquad (۱)$$

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 $i$-$j$ می‌باشد. $F(e)$ تابع نسبت تخلخل است و $P_a$ نیز نمایش‌دهنده فشار مرجع، که در اینجا ۱۰۰ kPa فرض می‌شود،

[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]

[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]

است. $\sigma_i'$ و $\sigma_j'$ به ترتیب معرفی‌کننده 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:

$$G_{vh} = A_{vh}\, F(e)\, P_a\, (\frac{\sigma_v' + \sigma_h'}{2P_a})^{n_{vh}} \quad (۲)$$

$$G_{hh} = A_{hh}\, F(e)\, P_a\, (\frac{\sigma_h'}{P_a})^{n_{hh}} \quad (۳)$$

با یک دست‌کاری ساده، معادلات (۲) و (۳) را می‌توان به صورت رابطه‌های (۴) و (۵) بازنویسی کرد به‌طوری‌که که امکان استنتاج ثابت‌های $A_{vh}$، $A_{hh}$، $n_{vh}$ و $n_{hh}$ را از تحلیل‌های برازش منحنی مقدور می‌سازد:

$$\frac{G_{vh}}{F(e)\, P_a} = A_{vh}\, (\frac{\sigma_v' + \sigma_h'}{2P_a})^{n_{vh}} \quad (۴)$$

$$\frac{G_{hh}}{F(e)\, P_a} = A_{hh}\, (\frac{\sigma_h'}{P_a})^{n_{hh}} \quad (۵)$$

بر طبق معادله (۴)، با ترسیم $\frac{G_{vh}}{F(e)\, P_a}$ در مقابل $\frac{\sigma_v' + \sigma_h'}{2P_a}$، مقادیر ثابت‌های $A_{vh}$ و $n_{vh}$ را می‌توان از برازش کردن یک تابع توانی بر این اطلاعات به‌دست آورد. به همین ترتیب، بر اساس معادله (۵) نیز قادر خواهیم بود که مقادیر $A_{hh}$ و $n_{hh}$ را با اجرای روندی مشابه از برازش نمودن یک منحنی توانی بر زوج داده‌های $\frac{G_{hh}}{F(e)\, P_a}$ – $\frac{\sigma_h'}{P_a}$ نتیجه گرفت. مقادیر ثابت‌های $A_{vh}$ و $A_{hh}$ را در نهایت می‌توان برای محاسبه درجه ناهمسانگردی ساختار بافتی در یک توده خاک به صورت $A_{hh}/A_{vh}$ استفاده نمود.

همانطور که در ادامه در این مطالعه نشان داده خواهد شد، توان‌های $n_{vh}$ و $n_{hh}$ معمولاً مقادیر یکسانی را نتیجه می‌دهند. علاوه بر این، مطالعات کو و همکاران (Ku et al., 2017) و سادک و همکاران (Sadek et al., 2007) نیز بر روی خاک‌های دانه‌ای نشان دادند که مقادیر این توان‌ها با اختلافی اندک، در عمل تقریباً یکسان‌اند. بنابراین، می‌توان فرض نمود که $n_{vh} \approx n_{hh}$، که متعاقباً می‌توانند توسط مقدار میانگین‌شان به صورت $n_{avg} = (n_{vh} + n_{hh})/2$ بیان گردند. این فرضیه می‌تواند در تعیین نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی برای مواردی که نمی‌توان مقادیر پارامترهای $A_{vh}$، $A_{hh}$، $n_{vh}$ و $n_{hh}$ را به طور کامل از اطلاعات موجود به‌دست آورد بسیار مفید واقع گردد. برای مثال، هنگامی که مقادیر نسبت $G_{hh}/G_{vh}$ تنها اطلاعات موجود در بررسی یک سری از مسائل می‌باشند به‌گونه‌ای‌که هیچ داده‌ای در مورد مقادیر تکی $G_{vh}$ و $G_{hh}$ وجود ندارد، یا زمانی که هیچ اطلاعاتی در خصوص مقادیر نسبت تخلخل در دست نمی‌باشد، این فرضیه می‌تواند در ارزیابی مقدار $A_{hh}/A_{vh}$ به خوبی عمل نماید. در واقع، با اجرای این فرضیه در معادلات (۴) و (۵) و سپس ترکیب آنها، می‌توان معادله‌ای منحصربه‌فرد را نتیجه گرفت که ناهمسانگردی سختی برشی $G_{hh}/G_{vh}$ را مستقیماً به ناهمسانگردی ساختار بافتی $A_{hh}/A_{vh}$ مرتبط نماید:

[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]

[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]

$$\frac{G_{hh}}{G_{vh}} = \frac{A_{hh}}{A_{vh}} \left(\frac{2\sigma'_h}{\sigma'_v+\sigma'_h}\right)^{n_{avg}} \quad (۶)$$

که مقادیر $A_{hh}/A_{vh}$ و $n_{avg}$ 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 et al., 2013, 2017, 2022) نشان دادند مادامی‌که نسبت تنش $\sigma'_v/\sigma'_h$ بر روی یک نمونه خاک از یک مقدار آستانه تجاوز نکند، ساختار بافتی طبیعی خاک بدون هرگونه تغییر قابل ملاحظه‌ای تقریباً ثابت باقی خواهد ماند. با این حال، هنگامی که این نسبت به اندازه کافی بزرگ شود به‌طوری‌که 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 به‌طوری‌که هیچ مقدار مشخصی را نمی‌توان برای ساختار بافتی خاک در این مرحله ارائه کرد. در قالب یک نتیجه‌گیری می‌توان ادعا نمود، مادامی‌که یک توده خاک رفتاری غیر اتساعی را نشان می‌دهد، مقادیر محاسبه شده برای ناهمسانگردی ساختار بافتی از روش پیشنهاد شده در این مطالعه به اندازه کافی معتبر هستند به‌طوری‌که می‌توان آنها را به عنوان شاخص توصیف کننده ساختار اسکلتی ناهمسانگرد در توده خاک استفاده نمود.

## 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

به منظور شناسایی درجه ناهمسانگردی سختی برشی و همچنین نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی در خاک‌های دانه‌ای، مقادیر مدول‌های برشی ناهمسانگرد مربوط به گستره‌ای جامع از انواع خاک‌های دانه‌ای، از نتایج آزمون‌های عددی، آزمایشگاهی و صحرایی گزارش شده در پیشینه تحقیق استخراج شدند. این داده‌ها سپس با اطلاعات نسبت تخلخل متناظر، شرایط تنش حاکم بر آزمون‌ها، خواص دانه‌بندی ($D_{50}$، $D_{max}$، $C_u$ و $C_c$) و شکل ذرات ($S$) ترکیب شدند تا یک پایگاه داده کامل در راستای اجرای تحلیل‌های همسو با اهداف این مطالعه ایجاد گردد. این تلاش موجب شد تا دامنه تغییرات نسبت‌های $G_{hh}/G_{vh}$ و $A_{hh}/A_{vh}$ مشخص شده و متعاقباً نسبت $A_{hh}/A_{vh}$ به صورت تابعی از ویژگی‌های دانه‌بندی و شکل ذرات ارائه شود. بر مبنای مطالعات آگاروال و ایشیباشی (Agarwal and Ishibashi, 1992) بر روی یک مجموعه مکعبی شکل از مخلوط کره‌های شیشه‌ای، مُدهای گوناگون مدول برشی به واسطه انجام آزمون‌های آزمایشگاهی انتشار موج S توسط مبدل‌های خمشی، در ۵ حالت مختلف از تحکیم همسانگرد محاسبه شدند. به طور مشابه، بلوتی و همکاران (Bellotti et al., 1996)، نتایج حاصل از آزمایشات لرزه‌ای انجام شده در یک محفظه کالیبراسیون بر روی ماسه بازسازی شده و خشک تیسینو با دانه‌بندی متوسط تا درشت را ارائه نمودند. آنها پارامترهای $G_{vh}$ و $G_{hh}$ را برای ۴ نمونه خاک نسبتاً متراکم، از طریق اندازه‌گیری‌های جهت‌دار سرعت موج S، تحت ۲۶ حالت تنش مختلف همسانگرد و ناهمسانگرد محاسبه کردند. در تلاشی دیگر، اطلاعات سختی کشسان ۹ نمونه خاک دانه‌ای متفاوت متعلق به دو نوع خاک طبیعی و یک نوع خاک مصنوعی، از نتایج آزمایشگاهی منتشر شده توسط کووانو (Kuwano, 1999) و کووانو و جاردین (Kuwano and Jardine, 2002)

[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]
[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]

استخراج گردیدند. آنها با نصب اِلمان‌های خمشی در تعدادی از دستگاه‌های سه محوری، مدول‌های $G_{vh}$ و $G_{hh}$ 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 دانه‌ای، یاماشیتا و همکاران (Yamashita et al., 2005) چندین آزمون المان خمشی را در ۷۸ حالت تنش همسانگرد بر روی ۱۸ نمونه خاک ماسه‌ای بازیابی شده از دو ساختگاه متفاوت در ژاپن اجرا نمودند. آنها در آزمایشات خود از دو روش مختلف برای تهیه نمونه‌هایی با ساختارها و تراکم‌های گوناگون در فرآیند آماده‌سازی نمونه‌ها بهره گرفتند تا بازه‌ای از نمونه‌های شل تا بسیار متراکم 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 اِلمان 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 $G_{vh}$ و $G_{hh}$ 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 (Ezaoui and Di Benedetto, 2009) بر روی ماسه خشک هوستون استخراج شد. آنها از اندازه‌گیری سرعت امواج لرزه‌ای همراه با آزمون‌های آزمایشگاهی سه‌محوری کرنش-کوچک برای تعیین مشخصات کشسان در ۵۴ سطح تحکیم متفاوت برای سه نوع مختلف از ساختار بافتی استفاده کردند.

فیوراوانته و همکاران (Fioravante 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 اندازه‌گیری مولفه‌های مختلف سرعت موج S در ۶ نمونه خاک ماسه‌ای کربناته، مدول‌های $G_{vh}$ و $G_{hh}$ را تحت ۶۸ حالت تحکیم متمایز در یک محفظه کالیبراسیون تعیین نمودند. استفاده کردن از تکنیک‌های اندازه‌گیری 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 ذاتی در ۵ نمونه خاک ماسه‌ای اشباع با نسبت‌های تخلخل متفاوت را برای حالت تنش موثر همسانگرد ۱۰۰ kPa به‌دست آوردند. به همین ترتیب، گائو و همکاران (Gao et al., 2015) نیز نشان دادند که اطلاعات مدول‌های برشی سه نوع متمایز از خاک‌های ماسه‌ای را می‌توان توسط مقادیر سرعت اندازه‌گیری شده از آزمون‌های اِلمان خمشی در یک دستگاه سه‌محوری واقعی به‌دست آورد. بر طبق بررسی‌های عددی انجام شده بوسیله اُدونووان و همکاران (O'Donovan et al., 2015) بر روی یک مدل مصنوعی از یک محیط دانه‌ای یکنواخت، اطلاعات کشسان یک نمونه خاک ماسه‌ای از شبیه‌سازی‌های آزمون اِلمان خمشی مبتنی بر مدل‌سازی روش اِلمان گسسته (DEM) استخراج گردید. علاوه بر این، گو و همکاران (Gu et al., 2017) نیز نتایج مطالعات عددی خود بر روی خواص کشسان ناهمسانگرد یک نمونه خاک شبیه‌سازی

[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]
[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]

شده از ماسه خشک تویورا را منتشر کردند که به واسطه استفاده از ذرات کروی بر پایه روش اِلمان 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 اندازه‌گیری کردند.

بر اساس نتایج بررسی‌های صحرایی گزارش شده توسط پگاه و همکاران (Pegah et al., 2017) و پگاه و لیو (Pegah and Liu, 2020b)، آنها توانستند مقایر 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 به‌کار گرفته شدند تا ضرایب $G_{vh}$ و $G_{hh}$ در لایه‌های گوناگون ستون خاک مشخص گردند. در اقدامی دیگر، دوتا و همکاران (Dutta et al., 2020)، 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 شبیه‌سازی شده از روش اِلمان 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 مبدل‌های پیزوالکتریک واقع بر محیط نمونه‌ها اندازه‌گیری 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 اِلمان‌های خمشی نصب شده پیرامون سلول‌های سه‌محوری آزمایشگاهی اندازه‌گیری 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 اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی سرعت موج برشی بر روی ۸ نمونه بازسازی شده توسط روش‌های آماده‌سازی 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

[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]

[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]

محاسبه تعداد انواع خاک در این مطالعه بر مبنای اصالت خاک انجام گرفت به‌طوری‌که 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 نمایش داده شده است. همچنین، لازم به ذکر است که تابع نسبت تخلخل برای این خاک به صورت $F(e) = e^{2d}$ که $d = -0.606$ می‌باشد، پیشنهاد گردید (Fioravante et al., 2013).

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 Kenya sand

| Soil type | Test/sample name | $\sigma'_v$ (kPa) | $\sigma'_h$ (kPa) | $G_{hh}$ (MPa) | $G_{vh}$ (MPa) | $e$ | $F(e)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Kenya sand | 461 | 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 |
| | | 300 | 150 | 88.8 | 95.0 | 1.589 | 0.570 |
| | | 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 |
| | 460 | 50 | 51 | 45.7 | 40.6 | 1.623 | 0.556 |
| | | 100 | 100 | 67.0 | 59.3 | 1.614 | 0.560 |
| | | 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 |
| | | 300 | 300 | 124.2 | 109.3 | 1.591 | 0.570 |
| | | 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 |
| | 469 | 25 | 50 | 45.7 | 37.4 | 1.624 | 0.556 |
| | | 50 | 100 | 67.6 | 54.1 | 1.615 | 0.559 |
| | | 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 |

[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]

[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]

| Soil type | Test/sample name | $\sigma'_v$ (kPa) | $\sigma'_h$ (kPa) | $G_{hh}$ (MPa) | $G_{vh}$ (MPa) | $e$ | $F(e)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 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 |
| | 463 | 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 |
| | | 300 | 150 | 139.4 | 126.9 | 1.321 | 0.714 |
| | | 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 |
| | 462 | 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 |
| | | 300 | 301 | 184.1 | 148.2 | 1.329 | 0.708 |
| | | 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 |
| | 466 | 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 |
| | | 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 |

[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]
[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]

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

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

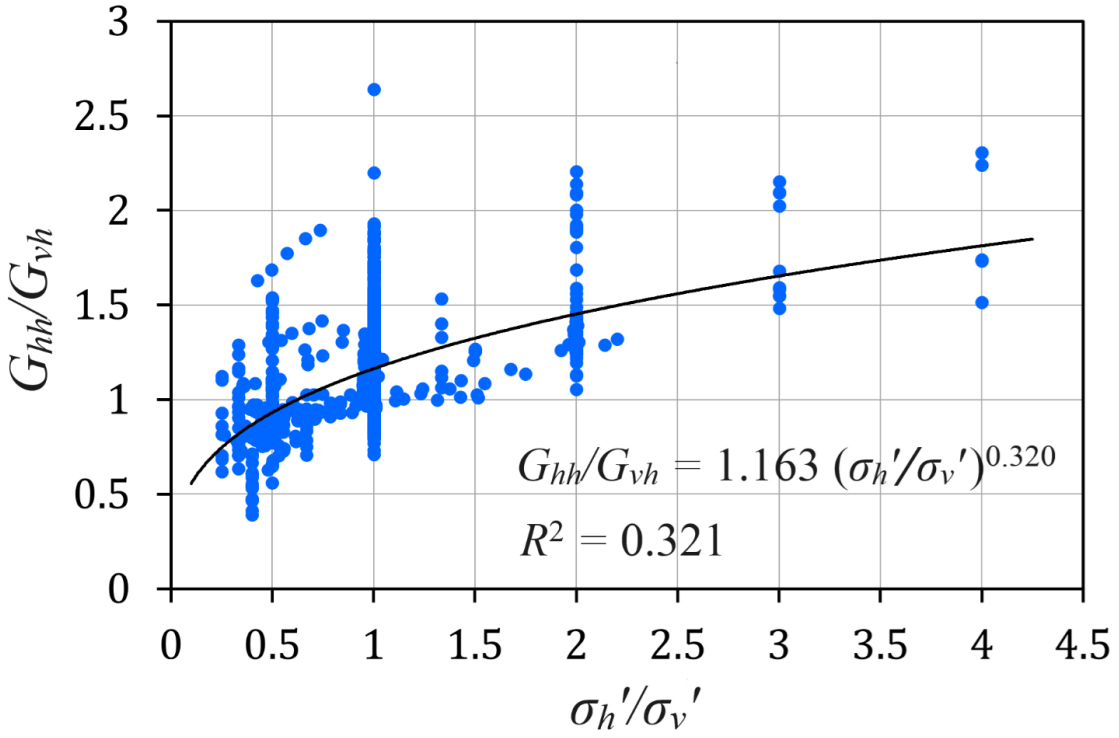
همانگونه که در قسمت مقدمه ذکر شد، نسبت ناهمسانگردی سختی در سطوح کرنشی کوچک را می‌توان از تقسیم مدول‌های برشی ناهمسانگرد $G_{vh}$ و $G_{hh}$ به صورت $G_{hh}/G_{vh}$ تعیین نمود. مقادیر حاصل برای نسبت $G_{hh}/G_{vh}$ در کلیه خاک‌های مورد بررسی، یک گستره وسیع از تغییرات کمی را در بازه‌ای متشکل از شرایط تنش گوناگون نشان دادند. به منظور تجزیه و تحلیل هدفمند ویژگی‌های تغییرپذیری ناهمسانگردی سختی در خاک‌های دانه‌ای، نسبت $G_{hh}/G_{vh}$ به عنوان تابعی از نسبت تنش $\sigma'_h/\sigma'_v$ در شکل ۲ ترسیم شد. مشاهده می‌شود که نسبت‌های مدول برشی، طیف گسترده‌ای از مقادیر را از ۰/۳۹۲ تا ۲/۶۴۰ در بر می‌گیرند. به همین ترتیب، نسبت‌های تنش متناظر نیز یک بازه وسیع از حالات بارگذاری متنوع را با تغییر بین ۰/۲۵۰ و ۴/۰۰ شامل می‌شوند. در این شکل به وضوح دیده می‌شود که به‌طورکلی با افزایش نسبت تنش $\sigma'_h/\sigma'_v$، ناهمسانگردی سختی برشی یک روند صعودی را نشان می‌دهد. به منظور تعیین وابستگی درجه $G_{hh}/G_{vh}$ به نسبت تنش موثر، یک تحلیل رگرسیون جامع بر روی کلیه زوج داده‌های "$G_{hh}/G_{vh}$ - $\sigma'_h/\sigma'_v$" انجام شد. نتایج نشان دادند که همبستگی بین این دو متغیر را می‌توان توسط یک تابع توانی به صورت زیر نشان داد:

$$\frac{G_{hh}}{G_{vh}} = 1.163\ (\frac{\sigma'_h}{\sigma'_v})^{0.320};\ R^2 = 0.321,\ N = 1042 \qquad (۷)$$

که $R^2$ بیانگر ضریب تعیین و $N$ تعداد نقاط داده سهیم در تحلیل را می‌باشد. این معادله نشان می‌دهد که حدود ٪۳۲ از تغییرات ناهمسانگردی سختی را می‌توان به تغییرات $\sigma'_h/\sigma'_v$ روی یک توده خاک نسبت داد درحالی‌که ٪۶۸ باقیمانده را می‌توان ناشی از دیگر عوامل نظیر خواص ناهمسانگردی ساختار بافتی دانست.

[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]

[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]



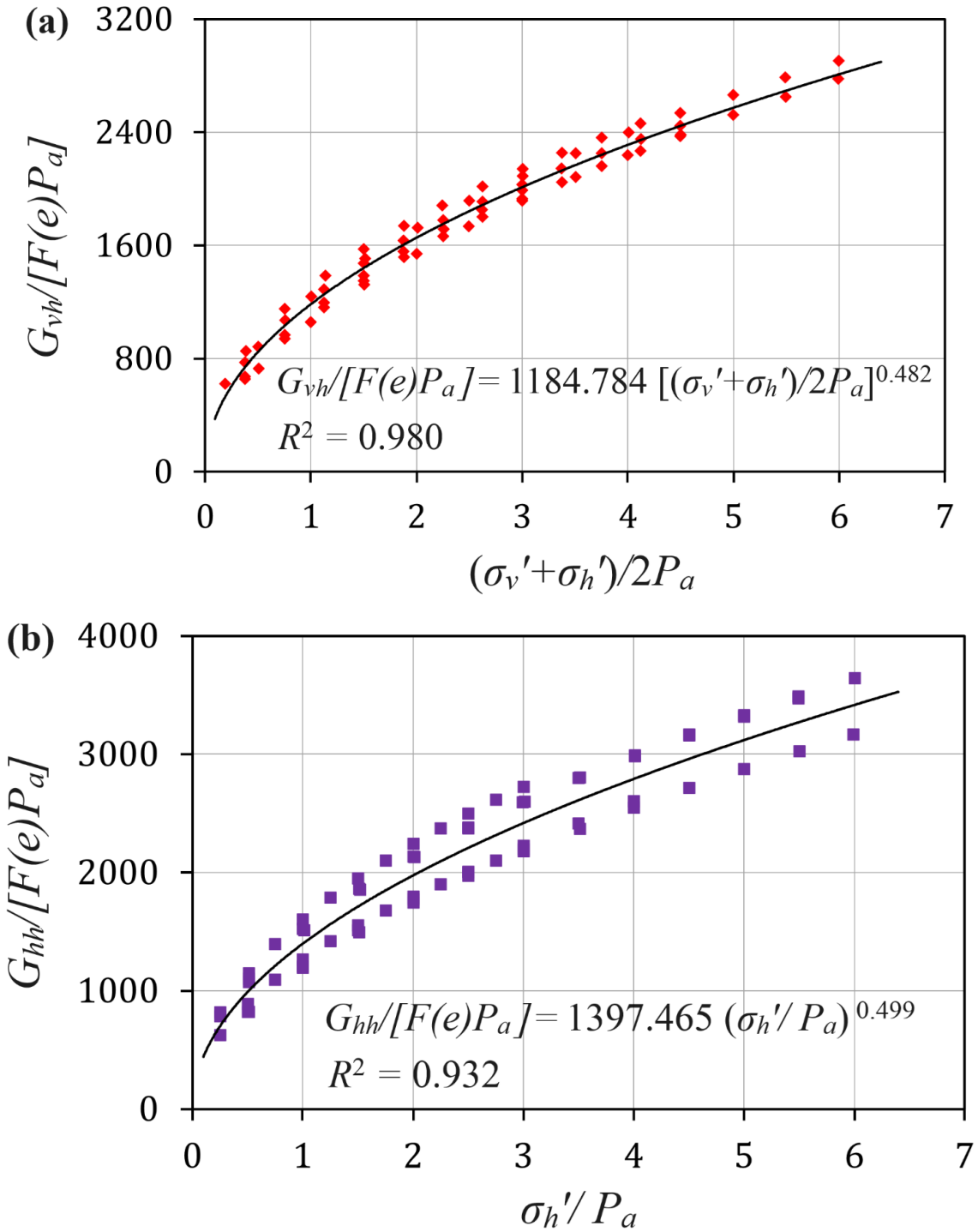

شکل ۲. نمایش تغییرات $G_{hh}/G_{vh}$ در مقابل نسبت تنش $\boldsymbol{\sigma_h'/\sigma_v'}$ در خاک‌های دانه‌ای

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 "$\frac{G_{vh}}{F(e)\,P_a} - \frac{\sigma_v'+\sigma_h'}{2P_a}$" و "$\frac{G_{hh}}{F(e)\,P_a} - \frac{\sigma_h'}{P_a}$" بر طبق معادلات (۴) و (۵) تعیین شدند. مقادیر حاصل سپس به‌کار گرفته شدند تا نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی $A_{hh}/A_{vh}$ را برای خاک‌های متناظر نتیجه دهند. با این وجود، برای خاک‌هایی که داده‌های مرتبط با سختی آنها به صورت $G_{hh}/G_{vh}$ ارائه شده بود، نسبت‌های $A_{hh}/A_{vh}$ مستقیماً از برازش منحنی بر زوج داده‌های "$\frac{G_{hh}}{G_{vh}} - \frac{2\sigma_h'}{\sigma_v'+\sigma_h'}$" مطابق با معادله (۶) مشخص گردیدند. برای مثال، در شکل‌های ۳a و ۳b فرایند استنتاج ثابت‌های $A_{vh}$ و $A_{hh}$ برای ماسه کنیا به صورت ترسیمی نشان داده شده است. از شکل ۳a مشاهده می‌شود که $A_{vh}$ = ۱۱۸۴/۷۸۴ درحالی‌که از شکل ۳b، $A_{hh}$ = ۱۳۹۷/۴۶۵ است. علاوه بر این، توان‌های تنش $n_{vh}$ و $n_{hh}$ نیز از تحلیل اجرا شده در شکل به صورت $n_{vh}$ = ۰/۴۸۲ و $n_{hh}$ = ۰/۴۹۹ نتیجه‌گیری شدند. ضرایب تعیین حاصل از هر دو تحلیل رگرسیون، $R^2 \approx$ ۱ برای $N$ = ۶۸ نقطه داده سهیم در تحلیل‌ها ارائه دادند، که به نوبه خود اثبات کننده دقت بالای همبستگی‌ها و ثابت‌ها است. نتایج نشان دادند که درجه ناهمسانگردی ساختار بافتی در این ماسه $A_{hh}/A_{vh}$ = ۱/۱۸۰ و $n_{avg}$ = ۰/۴۹۱ می‌باشند.

[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]

[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]




شکل ۳. فرآیند به‌دست آوردن ثابت‌های $A_{vh}$ و $A_{hh}$ برای ماسه کنیا. (a) ترسیم $G_{vh}/F(e)P_a$ در برابر $(\boldsymbol{\sigma_v' + \sigma_h')/2P_a}$ برای استنتاج $A_{vh}$؛ (b) ترسیم $G_{hh}/F(e)P_a$ در برابر $\boldsymbol{\sigma_h'/P_a}$ برای استنتاج $A_{hh}$

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 $A_{hh}$

[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]

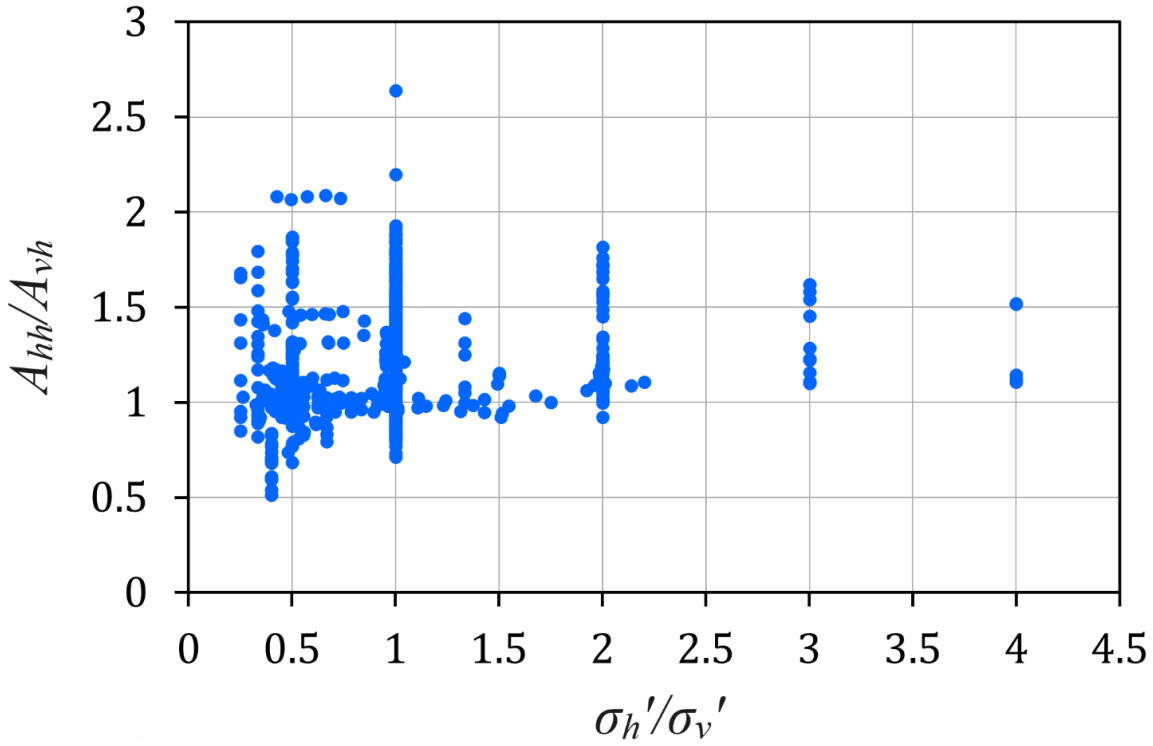
[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]

به‌طورکلی، به منظور ارائه یک پایگاه داده جهانی در خصوص ویژگی‌های ساختار بافتی خاک‌های دانه‌ای، مقادیر نتیجه‌گیری شده $A_{hh}/A_{vh}$ و $n_{avg}$ برای تمامی مصالح مورد بررسی در این مطالعه، در ستون‌های سوم و چهارم جدول ۲ نمایش داده شدند. خاطر نشان می‌گردد 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 $A_{hh}/A_{vh}$ و $n_{avg}$ وجود نداشت. در این موارد، نسبت‌های $A_{hh}/A_{vh}$ متناظر برای خاک‌ها به صورت مقدار میانگین نسبت‌های $G_{hh}/G_{vh}$ در نظر گرفته شدند و هیچ مقداری برای $n_{avg}$ پیشنهاد نگردید. در مجموع، برای خاک‌های مورد مطالعه، ۸۰ مقدار مختلف برای نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی $A_{hh}/A_{vh}$ و ۶۵ مقدار متمایز برای توان تنش میانگین $n_{avg}$ بر حسب تنوع ساختار بافتی به‌دست آمد. نتایج نشان دادند که ثابت‌های $A_{hh}/A_{vh}$ و $n_{avg}$ تقریباً در بازه‌های وسیعی از مقادیر به شکل $۰/۷۳۸ \leq A_{hh}/A_{vh} \leq ۲/۰۴۶$ و $۰/۶۱۸ \leq n_{avg} \leq ۰/۲۲۷$ تغییر می‌کنند.

علاوه بر این، به منظور تشخیص میزان حساسیت ناهمسانگردی ساختار بافتی در خاک‌های دانه‌ای به شرایط بارگذاری، مقادیر $A_{hh}/A_{vh}$ برای هر حالت تنش نیز به صورت جداگانه محاسبه شدند. بدین منظور، برای هر خاک، مقادیر $G_{hh}/G_{vh}$ و $\sigma'_h/\sigma'_v$ 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 ۰/۲۵ تا ۴/۰۰ نشان می‌دهد، اما این تغییرات بسیار جزئی بوده به‌طوری‌که $A_{hh}/A_{vh}$ در عمل بدون تغییر باقی می‌ماند. این خصیصه، پایداری مستمر ساختار بافتی خاک در برابر حالت تنش تحمیلی را مادامی‌که $\sigma'_h/\sigma'_v$ بین ۰/۲۵ و ۴/۰۰ است اثبات می‌کند، که به نوبه خود با مشاهدات تجربی کووانو و جاردین (Kuwano and Jardine, 2002) و گو و همکاران (Gu et al., 2013, 2017, 2022) که پیشتر مورد بحث قرار گرفتند کاملاً سازگار است.

[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]

[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]




شکل ۴. ترسیم تغییرات $A_{hh}/A_{vh}$ در مقابل نسبت تنش $\boldsymbol{\sigma_h'/\sigma_v'}$ در خاک‌های دانه‌ای ($N$ = ۱۰۴۲)

Fig 4. The variations of $A_{hh}/A_{vh}$ against the stress ratio $\sigma_h'/\sigma_v'$ in granular geomaterials ($N$ = 1042)

[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]

[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]

جدول ۲. مقادیر محاسبه شده برای نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی ($A_{hh}/A_{vh}$) و توان تنش میانگین ($n_{avg}$)، همراه با ویژگی‌های دانه‌بندی و شکل ذرات متعلق به خاک‌های مورد بررسی در این مطالعه

Table 2. The resulting values for fabric anisotropy ratio ($A_{hh}/A_{vh}$) and average stress exponent ($n_{avg}$) alongside with grading and particles shape features relating to the investigated soils

| Soil/sample type | Test/sample name | $A_{hh}/A_{vh}$ | $n_{avg}$ | $D_{50}$ (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) |
| Ticino sand | 390 | 1.170 | 0.232 | 0.538 | 0.831 | 1.583 | 1.020 | 0.732 | Bellotti et al. (1996) |
| | 383 | | | | | | | | |
| | 384 | | | | | | | | |
| | 385 | | | | | | | | |
| Ham river sand (new-HRS) | H304 | 1.051 | 0.240 | 0.270 | 0.597 | 1.670 | 0.990 | 0.705 | Kuwano (1999); Kuwano and Jardine (2002) |
| | H935 | | | | | | | | |
| | H601 | | | | | | | | |
| | H508 | | | | | | | | |
| Dunkerque sand (DKS) | D902 | 1.454 | 0.271 | 0.270 | 1.930 | 1.820 | 0.906 | N/A | |
| | D903 | | | | | | | | |
| Glass beads (GB) | G911 | 1.044 | 0.281 | 0.270 | 0.412 | 1.280 | 1.034 | 1.000 | |
| | G912 | | | | | | | | |
| | G922 | 1.010 | 0.260 | 0.140 | 0.247 | 1.630 | 0.967 | 1.000 | |
| Ticino sand | Tx CI PA3 | 1.100 | 0.234 | 0.550 | 1.005 | 1.600 | 1.046 | 0.732 | Fioravante (2000) |
| | TS - K = 0.5 | | | | | | | | |
| | TS - K = 1.0 | | | | | | | | |
| | TS - K = 2.0 | | | | | | | | |
| Kenya sand | Tx CI P14 | 1.270 | 0.229 | 0.130 | 0.433 | 1.860 | 0.879 | N/A | |
| | KS - K = 0.5 | | | | | | | | |
| | KS - K = 1.0 | | | | | | | | |
| | KS - K = 2.0 | | | | | | | | |
| Toyoura sand | TO/DV/Dr = 40% | 1.073 | 0.216 | 0.198 | 0.422 | 1.220 | 1.000 | 0.743 | Yamashita et al. (2005) |
| | TO/DV/Dr = 60% | | | | | | | | |

[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]
[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]

| Soil/sample type | Test/sample name | $A_{hh}/A_{vh}$ | $n_{avg}$ | $D_{50}$ (mm) | $D_{max}$ (mm) | $C_u$ | $C_c$ | $S$ | Reference |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | TO/DV/Dr = 80% | | | | | | | | |
| | TO/MSP-F/V-specimen/Dr = 40% | 1.123 | 0.218 | 0.198 | 0.422 | 1.220 | 1.000 | 0.743 | |
| | TO/MSP-F/V-specimen/Dr = 60% | | | | | | | | |
| | TO/MSP-F/V-specimen/Dr = 80% | | | | | | | | |
| | TO/MSP-F/H1-specimen/Dr = 40% | 1.067 | 0.222 | 0.198 | 0.422 | 1.220 | 1.000 | 0.743 | |
| | TO/MSP-F/H1-specimen/Dr = 60% | | | | | | | | |
| | TO/MSP-F/H1-specimen/Dr = 80% | | | | | | | | |
| | TO/MSP-F/H2-specimen/Dr = 40% | 0.925 | 0.224 | 0.198 | 0.422 | 1.220 | 1.000 | 0.743 | |
| | TO/MSP-F/H2-specimen/Dr = 60% | | | | | | | | |
| | TO/MSP-F/H2-specimen/Dr = 80% | | | | | | | | |
| Kusshаro sand | KU/DV/Dr = 60% | 1.244 | 0.279 | 0.473 | 1.995 | 4.460 | 1.114 | N/A | |
| | KU/DV/Dr = 80% | | | | | | | | |
| | KU/DV/Dr = 100% | | | | | | | | |
| | 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) |
| Synthetic assemblies of spherical and clumped aggregates | Simple cubic packing | 1.003 | 0.165 | N/A | N/A | N/A | N/A | 1.000 | Wang and Mok (2008) |
| | 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 | |
| | 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 | |

[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]

[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]

| Soil/sample type | Test/sample name | $A_{hh}/A_{vh}$ | $n_{avg}$ | $D_{50}$ (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 | |
| Hostun sand | TC_H400.82p | 1.179 | 0.214 | 0.348 | 0.628 | 1.420 | 1.060 | 0.723 | Ezaoui and Di Benedetto (2009 |
| | TE_H400.80p | | | | | | | | |
| | TC_H400.73p+v | 1.217 | 0.216 | 0.348 | 0.628 | 1.420 | 1.060 | 0.723 | |
| | TE_H400.74p+v | | | | | | | | |
| | TC_H400.74p+t | 1.112 | 0.228 | 0.348 | 0.628 | 1.420 | 1.060 | 0.723 | |
| | TE_H400.73p+t | | | | | | | | |
| Kenya sand | 461 | 1.154 | 0.244 | 0.130 | 0.462 | 1.860 | 0.820 | N/A | Fioravante et al. (2013) |
| | 460 | | | | | | | | |
| | 469 | | | | | | | | |
| | 463 | | | | | | | | |
| | 462 | | | | | | | | |
| | 466 | | | | | | | | |
| Hostun RF sand | IC01 | 1.114 | N/A | 0.350 | 0.630 | 1.978 | 1.046 | 0.705 | Escribano and Nash (2015) |
| | IC02 | | | | | | | | |
| | IC03 | | | | | | | | |
| | IC04 | | | | | | | | |
| | AC | | | | | | | | |
| Toyoura sand and fines mixtures | clean Toyoura sand (0% fines content) | 1.066 | 0.137 | 0.210 | N/A | 1.530 | N/A | N/A | Gao et al. (2015) |
| | Toyoura sand with 2% fines content | 1.111 | 0.191 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| | 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 ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]
[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]

| Soil/sample type | Test/sample name | $A_{hh}/A_{vh}$ | $n_{avg}$ | $D_{50}$ (mm) | $D_{max}$ (mm) | $C_u$ | $C_c$ | $S$ | Reference |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | triaxial extension (TE) | | | | | | | | |
| | triaxial compression (TC) | | | | | | | | |
| Sandy and gravelly geomaterials | P1 | 1.048 | 0.259 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | Pegah et al. (2017); Pegah and Liu (2020b) |
| | P2 | | | | | | | | |
| | P3 | | | | | | | | |
| | P4 | | | | | | | | |
| Sand and gravel combinations with little volume of silt | P1 | 1.088 | 0.217 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| | P2 | | | | | | | | |
| | P3 | | | | | | | | |
| | P4 | | | | | | | | |
| | P5 | | | | | | | | |
| | P6 | | | | | | | | |
| | P7 | | | | | | | | |
| | P8 | | | | | | | | |
| | P9 | | | | | | | | |
| Sand and silty sand | P2 | 1.031 | 0.272 | 0.590 | 3.220 | 3.411 | 1.080 | 0.921 | |
| | P3 | | | | | | | | |
| | P4 | | | | | | | | |
| Toyoura sand | TS | 1.228 | 0.209 | 0.240 | 0.357 | 1.360 | 0.939 | N/A | Dutta et al. (2020) |
| Kashima river sand | RS | 1.043 | 0.224 | 1.720 | 4.642 | 1.250 | 0.959 | N/A | |
| Glass beads | GB | 1.104 | 0.246 | 1.800 | 2.247 | 1.140 | 0.979 | 1.000 | |
| Artificial groups of spherical glass beads and non-spherical clumps | R1 | 0.980 | 0.206 | N/A | 2.200 | N/A | N/A | N/A | Otsubo et al. (2020) |
| | R2 | 1.020 | 0.172 | N/A | 3.492 | N/A | N/A | N/A | |
| | R4 | 1.469 | 0.205 | N/A | 5.544 | N/A | N/A | N/A | |
| | R6 | 2.079 | 0.288 | N/A | 7.266 | N/A | N/A | N/A | |
| Crushed glass | CG/Cu = 5/Dr = 0.90 | 1.073 | 0.176 | 0.450 | 0.994 | 5.000 | 1.257 | N/A | Gu et al. (2021) |
| | CG/Cu = 5/q = 300 kPa | | | | | | | | |

[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]
[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]

| Soil/sample type | Test/sample name | $A_{hh}/A_{vh}$ | $n_{avg}$ | $D_{50}$ (mm) | $D_{max}$ (mm) | $C_u$ | $C_c$ | $S$ | Reference |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Rhein sand | RS/Cu = 5/Dr = 0.90 | 0.897 | 0.248 | 0.450 | 0.994 | 5.000 | 1.203 | N/A | |
| | RS/Cu = 5/q = 300 kPa | | | | | | | | |
| | 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 | |
| Glass beads | GB/Cu = 5/Dr = 0.90 | 0.868 | 0.293 | 0.450 | 0.994 | 5.000 | 1.112 | 1.000 | |
| | GB/Cu = 5/q = 300 kPa | | | | | | | | |
| S1 sand | Series-S1-60-DT | 1.345 | 0.295 | 0.602 | 4.001 | 3.890 | 1.154 | 0.454 | Shi and Haegeman (2021); Shi et al. (2020, 2021, 2022) |
| | Series-S1-40-DT | | | | | | | | |
| | S1-dry tamping/K = 1 | | | | | | | | |
| | S1-dt/Dr = 57% | | | | | | | | |
| | S1-dt/Dr = 60% | | | | | | | | |
| | S1-DT/Dr = 75 ± 3% | | | | | | | | |
| | Series-S1-60-DFD | 1.261 | 0.295 | 0.602 | 4.001 | 3.890 | 1.154 | 0.454 | |
| | Series-S1-40-DFD | | | | | | | | |
| | S1-dry funnel deposition/K = 1 | | | | | | | | |
| | S1-dfd/Dr = 62% (e0 = 0.885) | | | | | | | | |
| | S1-dfd/Dr = 62% (e0 = 0.882) | | | | | | | | |
| | Series-S1-60-AP | 1.605 | 0.280 | 0.602 | 4.001 | 3.890 | 1.154 | 0.454 | |
| | Series-S1-40-AP | | | | | | | | |
| | S1-air pluviation/K = 0.5 | | | | | | | | |
| | S1-air pluviation/K = 2 | | | | | | | | |
| | 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 | 1.154 | 0.454 | |
| | Series-S1-40-WP | | | | | | | | |

[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]
[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]

| Soil/sample type | Test/sample name | $A_{hh}/A_{vh}$ | $n_{avg}$ | $D_{50}$ (mm) | $D_{max}$ (mm) | $C_u$ | $C_c$ | $S$ | Reference |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | S1-water pluviation/K = 1 | | | | | | | | |
| | S1-wp/Dr = 61% | | | | | | | | |
| | S1-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% FC-DT/Dr = 75 ± 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% FC-DT/Dr = 75 ± 3% | 1.263 | 0.309 | 0.379 | 4.000 | 43.084 | 0.602 | N/A | |
| Mol sand | Series-Mol-60-DT | 1.081 | 0.241 | 0.179 | 0.635 | 1.550 | 0.852 | 0.635 | |
| | Series-Mol-40-DT | | | | | | | | |
| | Series-Mol-60-DFD | 1.013 | 0.244 | 0.179 | 0.635 | 1.550 | 0.852 | 0.635 | |
| | Series-Mol-40-DFD | | | | | | | | |
| | Series-Mol-60-AP | 1.081 | 0.225 | 0.179 | 0.635 | 1.550 | 0.852 | 0.635 | |
| | Series-Mol-40-AP | | | | | | | | |
| | Series-Mol-60-WP | 0.998 | 0.235 | 0.179 | 0.635 | 1.550 | 0.852 | 0.635 | |
| | Series-Mol-40-WP | | | | | | | | |
| | Series-Mol-60-MT | 0.941 | 0.236 | 0.179 | 0.635 | 1.550 | 0.852 | 0.635 | |
| | Series-Mol-40-MT | | | | | | | | |
| 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 | |

[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]
[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]

| Soil/sample type | Test/sample name | $A_{hh}/A_{vh}$ | $n_{avg}$ | $D_{50}$ (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 | He et al. (2022) |
| Leighton Buzzard sand | LBS | 1.014 | 0.224 | 0.410 | 1.178 | 1.870 | 1.110 | 0.770 | |
| Blue sand | 2/3/4/5/28/29 | 1.001 | 0.236 | 0.990 | 4.760 | 5.840 | 1.220 | 0.540 | Li et al. (2022) |
| | 35/36 | 0.985 | 0.226 | 0.990 | 4.760 | 5.840 | 1.220 | 0.540 | |
| Glass beads | F1 | 1.015 | N/A | 0.200 | N/A | N/A | N/A | N/A | Liu et al. (2022) |
| | F2 | 0.972 | N/A | 0.200 | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| | 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 | |
| Toyoura sand | F5 | 1.020 | N/A | 0.240 | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| | 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 | |
| Wild rice | F8 | 1.778 | N/A | 11.270 | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| | F9 | 1.486 | N/A | 11.270 | N/A | N/A | N/A | N/A | |

[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]

[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]

## 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 ($D_{50}$)، اندازه بیشینه دانه‌ها ($D_{max}$)، ضریب یکنواختی ($C_u$) و ضریب دانه‌بندی ($C_c$) را نشان می‌دهند. ستون نهم نیز بیانگر ویژگی منتسب به شکل ذرات یعنی کُرویت ($S$) است. در ادامه، مقادیر محاسبه شده برای $A_{hh}/A_{vh}$ با این اطلاعات ادغام خواهند شد تا سطح همبستگی میان داده‌ها ارزیابی گردد. روندهای دست‌یابی به این هدف در بخش‌های زیر شرح داده شده‌اند.

### 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 دانه‌بندی، این نسبت همانگونه که در شکل‌های ۵a تا ۵d نشان داده شده است در قاب‌هایی مجزا در برابر پارامترهای $D_{50}$، $D_{max}$، $C_u$ و $C_c$ پیاده‌سازی شد. ملاحظه می‌شود که به طور کلی، به دلیلی پراکندگی داده‌ها و بعضاً کمبود اطلاعات کافی در محدوده میانی تصاویر ترسیم شده، ممکن است نتوان به وضوح روند تغییرات را تشخیص داد. تنها در شکل ۵b، اطلاعات $A_{hh}/A_{vh}$ به خوبی و بدون هیچ شکاف قابل توجهی در طول متغیر مستقل $D_{max}$ توزیع شده‌اند. در مجموع، از شکل‌های ۵c و ۵d ملاحظه می‌شود که $A_{hh}/A_{vh}$ در حالت کلی هیچ وابستگی سیستماتیکی را به $C_u$ و $C_c$ نشان نمی‌دهد، زیرا که با افزایش پارامترهای مستقل تقریباً ثابت باقی می‌ماند. تنها در شکل ۵c می‌توان مشاهده نمود مادامی‌که $C_u < ۶$، نسبت $A_{hh}/A_{vh}$ دارای یک روند نزولی ملایم در مقابل $C_u$ خواهد بود.

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 $D_{max}$ نشان دادند. همانگونه که در شکل ۵a به تصویر کشیده شده است، به رغم کمبود داده‌ها در بازه $D_{50} > ۲$، نسبت $A_{hh}/A_{vh}$ را می‌توان در قالب تابعی توانی از اندازه میانی دانه‌ها ارائه نمود:

$$\frac{A_{hh}}{A_{vh}} = 1.242\, D_{50}^{0.084};\ R^2 = 0.211,\ N = 63 \qquad (۸)$$

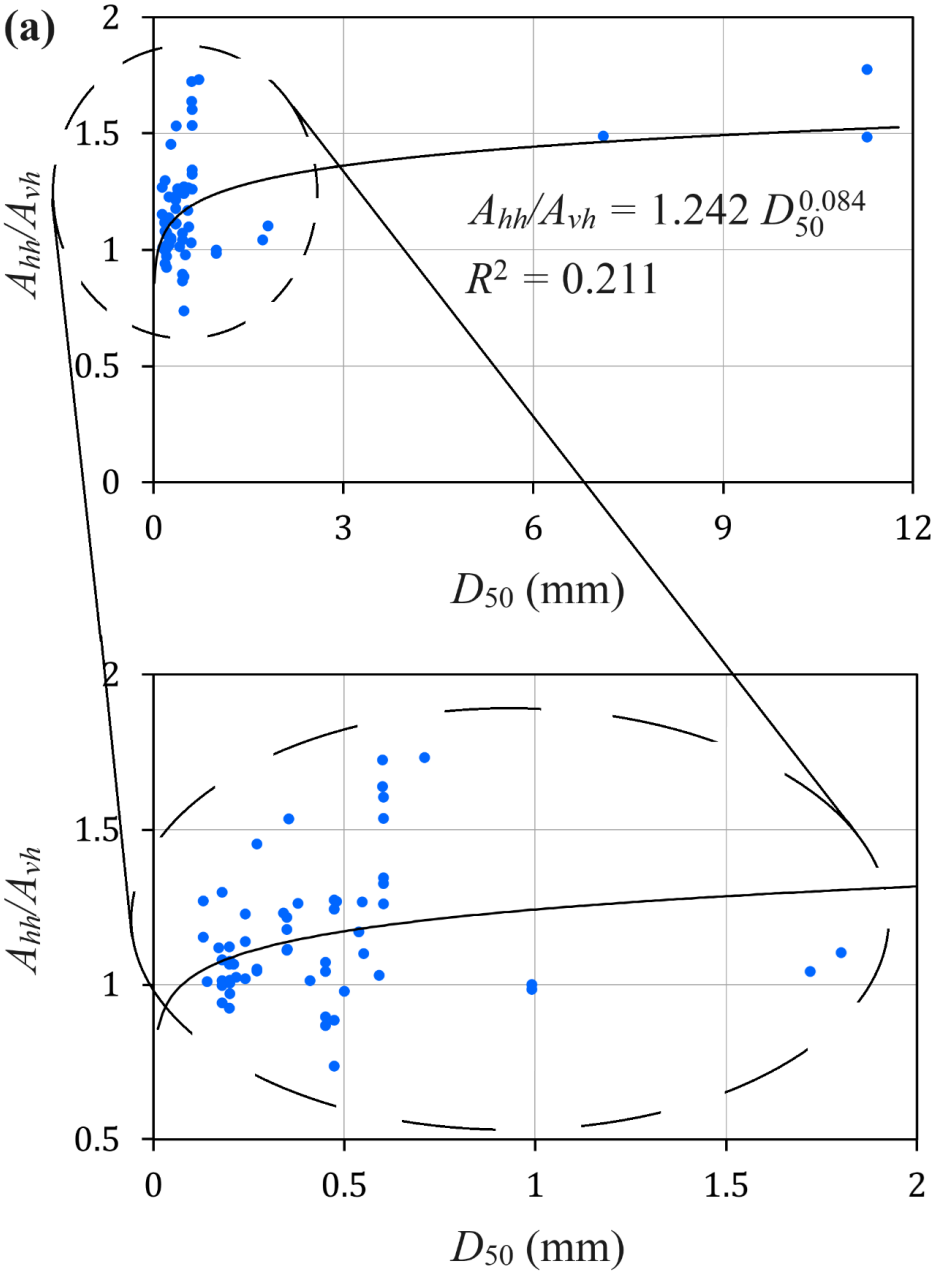
به سبکی مشابه، اجرای تحلیل‌های رگرسیون بر روی مدل تغییرپذیری $A_{hh}/A_{vh}$ در مقابل $D_{max}$ نیز منجر به ایجاد یک تابع نمایی به صورت زیر شدند (شکل ۵b را ببینید):

$$\frac{A_{hh}}{A_{vh}} = 1.038 \exp\left(0.055 D_{max}\right);\ R^2 = 0.291,\ N = 57 \qquad (۹)$$

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 $A_{hh}/A_{vh}$ در این مصالح درجاتی از وابستگی را به $D_{50}$، $D_{max}$ و $C_u$ نشان داد، اما آنها به اندازه کافی بزرگ نیستند که منجر به خلق نتایج قاطعانه‌ای شوند. با این وجود، همین سطوح از وابستگی

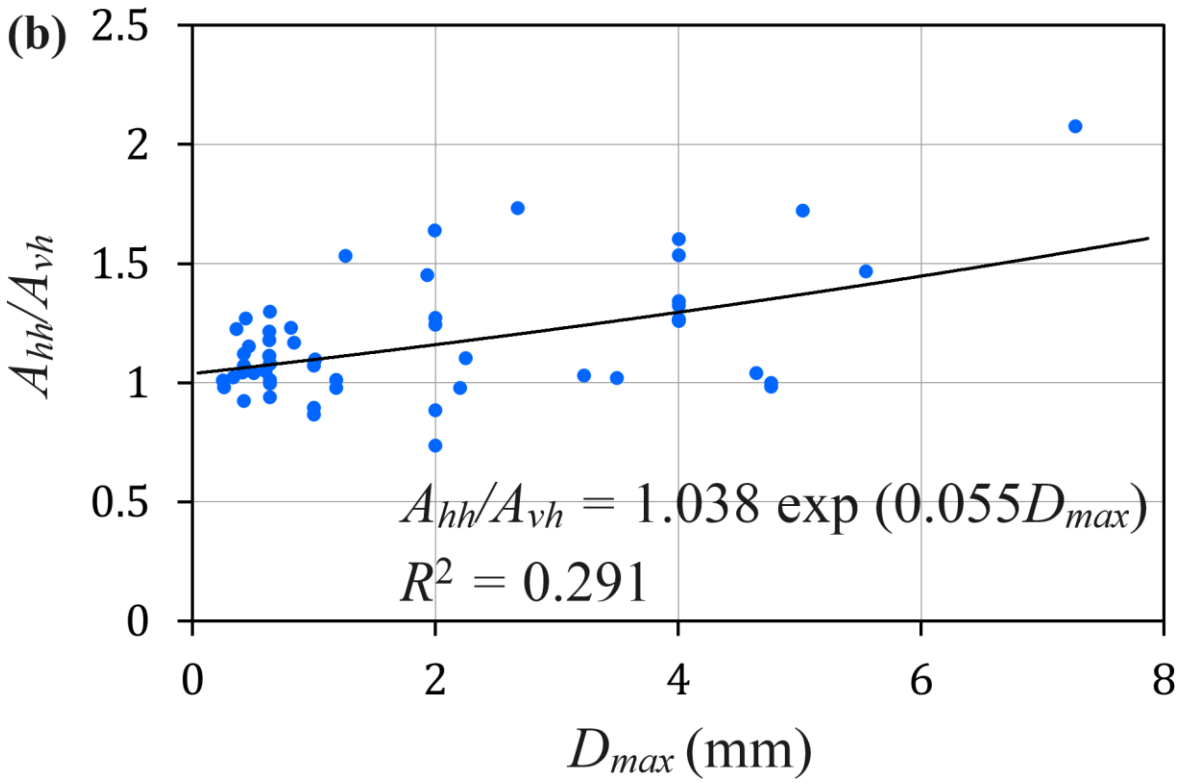
[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]
[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]

اثبات نمودند که با افزایش قطر ذرات و یکنواختی بافت خاک، نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی در مصالح دانه‌ای افزایش می‌یابد. از آنجایی که کمبود اطلاعات مشکل‌سازترین موضوع در اینجا برای نتیجه‌گیری در مورد سطح واقعی پراکندگی داده‌ها بود، ممکن است چندان منطقی نباشد که بر روی این نتیجه قویاً تأکید شود. نتیجه‌گیری قاطعانه در خصوص این مسئله نیازمند بررسی‌های بیشتر با حجم به مراتب وسیع‌تری از داده‌هاست. با این حال، می‌توان آن را به عنوان یک نتیجه محافظه‌کارانه در کنار این واقعیت در نظر گرفت که ناهمسانگردی ساختار بافتی در خاک‌های دانه‌ای تنها تا حدودی به تغییرات در ویژگی‌های دانه‌بندی حساس است.



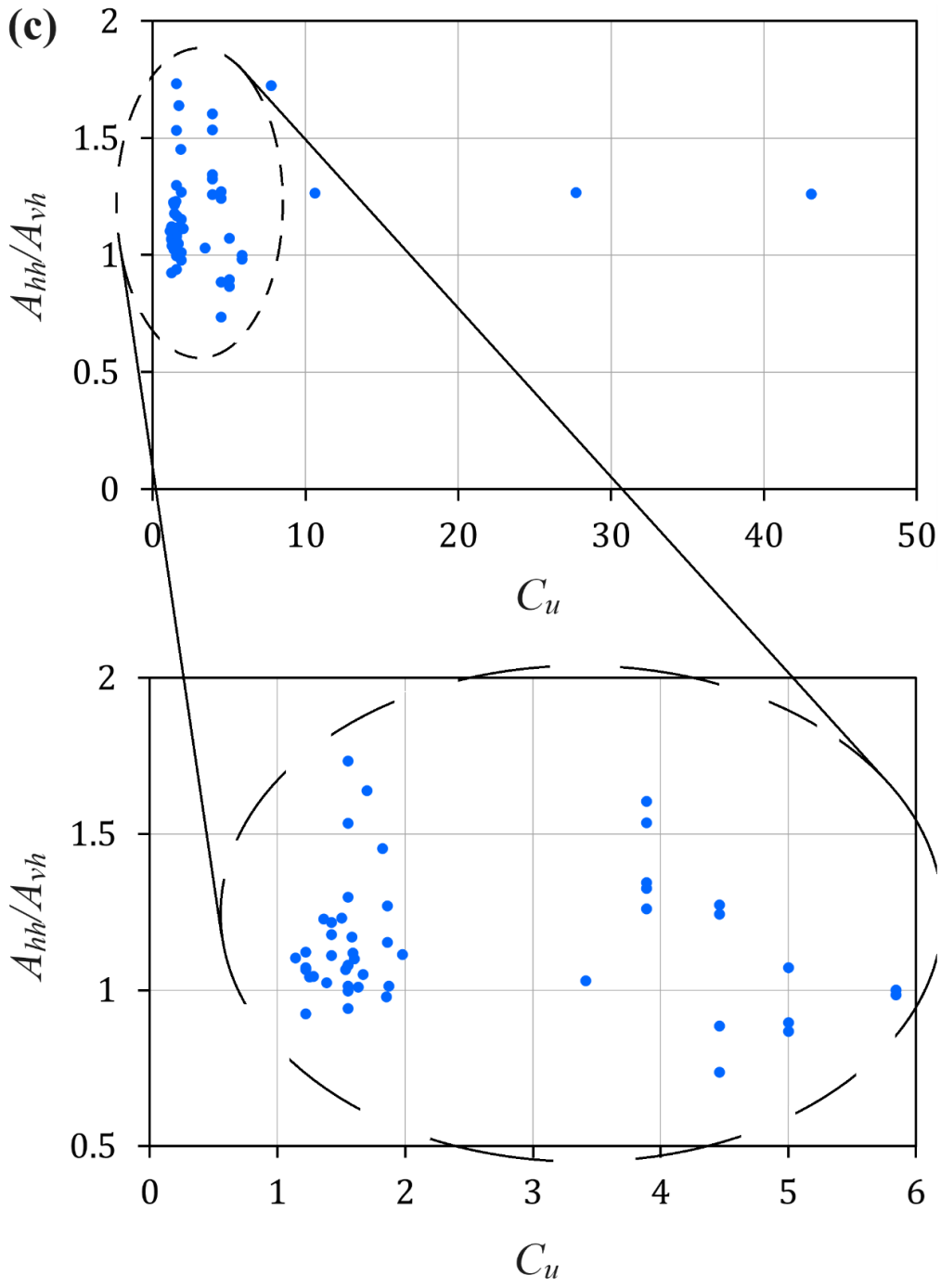

[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]

[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]



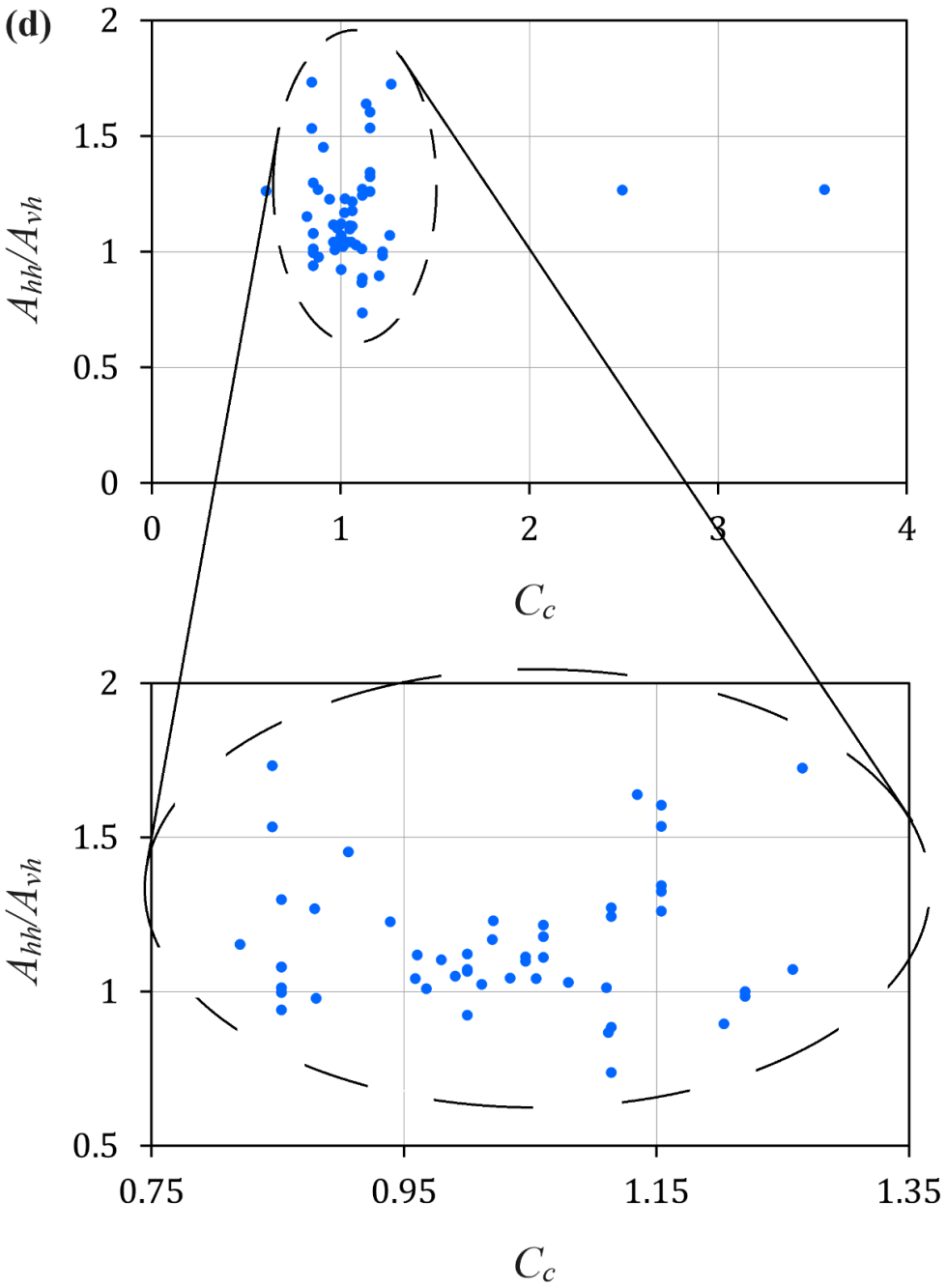

[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]

[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]




[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]

[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]




شکل ۵. بررسی همبستگی بین نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی $A_{hh}/A_{vh}$ و ویژگی‌های دانه‌بندی خاک‌های دانه‌ای. (a) الگوی تغییرات $A_{hh}/A_{vh}$ در مقابل اندازه میانی دانه‌ها $D_{50}$ ($N$ = ۶۳)؛ (b) الگوی تغییرات $A_{hh}/A_{vh}$ در برابر اندازه بیشینه دانه‌ها $D_{max}$ ($N$ = ۵۷)؛ (c) الگوی تغییرات $A_{hh}/A_{vh}$ در مقابل ضریب یکنواختی $C_u$ ($N$ = ۵۴)؛ (d) الگوی تغییرات $A_{hh}/A_{vh}$ در برابر ضریب دانه‌بندی $C_c$ ($N$ = ۵۳)

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)

[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]

[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]

## وابستگی نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی به ویژگی شکل ذرات

مشابه عملیات انجام شده در قسمت قبل، به منظور شناسایی رابطه احتمالی بین $A_{hh}/A_{vh}$ و $S$، مقادیر نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی همچنین بر حسب شاخص بیان‌کننده شکل ذرات مورد بررسی قرار گرفتند. بدین منظور، نسبت‌های $A_{hh}/A_{vh}$ در مقابل مقادیر متناظر $S$ در یک قاب نگاشته شدند (شکل ۶) و در ادامه تجزیه و تحلیل همبستگی بین آنها انجام گرفت. در مقایسه با نتایج به‌دست آمده از قسمت قبل، به وضوح دیده می‌شود که یک پیوستگی معقول بین داده‌ها بدون هر گونه شکاف قابل توجهی وجود دارد به‌طوری‌که $A_{hh}/A_{vh}$ را می‌توان به خوبی به پارامتر معرف ویژگی شکل ذرات مرتبط دانست. شکل ۶ نشان می‌دهد که نسبت ناهمسانگردی $A_{hh}/A_{vh}$ یک روند کاهشی را با افزایش کرویت داراست. هر قدر که مقدار این پارامتر از واحد فاصله می‌گیرد، بیانگر این است که دانه‌های خاک شکل کروی خود را از دست داده و در راستای خاصی طویل می‌شوند. این موضوع باعث می‌شود که در فرآیند رسوب‌گذاری 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 می‌کنند باشد، که نتیجتاً نیز منجر به خلق مقادیر بزرگتری برای ناهمسانگردی ساختار بافتی خواهند شد. با توجه به تمایل قرارگیری محور طویل ذرات در راستای افقی، این امر معمولاً باعث ایجاد یک ساختار بافتی قوی‌تر در این راستا در قیاس با راستای قائم خواهد شد، که به نوبه خود نیز منجر به ارائه $A_{hh}/A_{vh} > ۱$ در اکثر موارد می‌شود (شکل ۶ را ببینید).

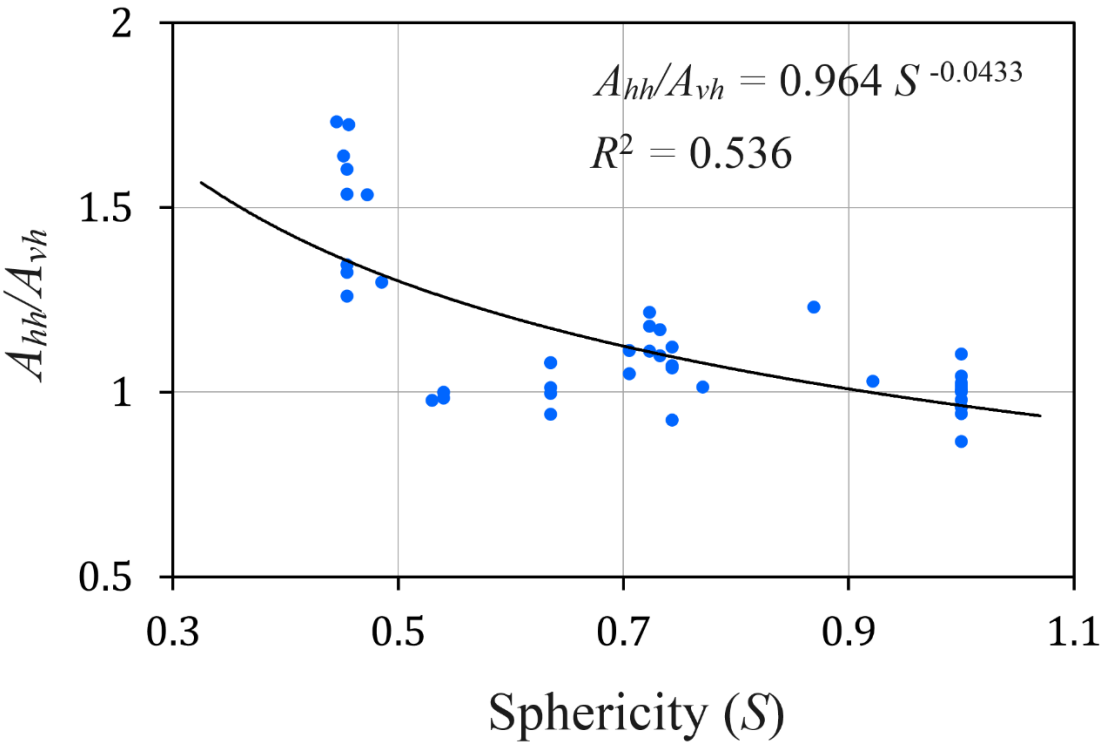
تحلیل رگرسیون اعمال شده بر روی زوج اطلاعات "$A_{hh}/A_{vh}$ - $S$" نشان داد که $A_{hh}/A_{vh}$ را می‌توان به خوبی بر حسب $S$ توسط تابع زیر بیان نمود:

$$\frac{A_{hh}}{A_{vh}} = 0.964\, S^{-0.433};\ R^2 = 0.536,\ N = 43 \qquad (۱۰)$$

این معادله بیان می‌دارد که مقادیر نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی در خاک‌های دانه‌ای را می‌توان در قالب یک تقریب مرتبه اول از شاخص معرف شکل ذرات برآورد نمود. با این وجود باید توجه داشت که محدودیت موجود در تعداد اطلاعات کماکان می‌تواند به عنوان مانعی بر مسیر دست‌یابی به یک نتیجه‌گیری صریح ایفای نقش کند.

[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]

[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]




شکل ۶. مدل تغییرات نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی $A_{hh}/A_{vh}$ در برابر کرویت $S$ ($N$ = ۴۳)

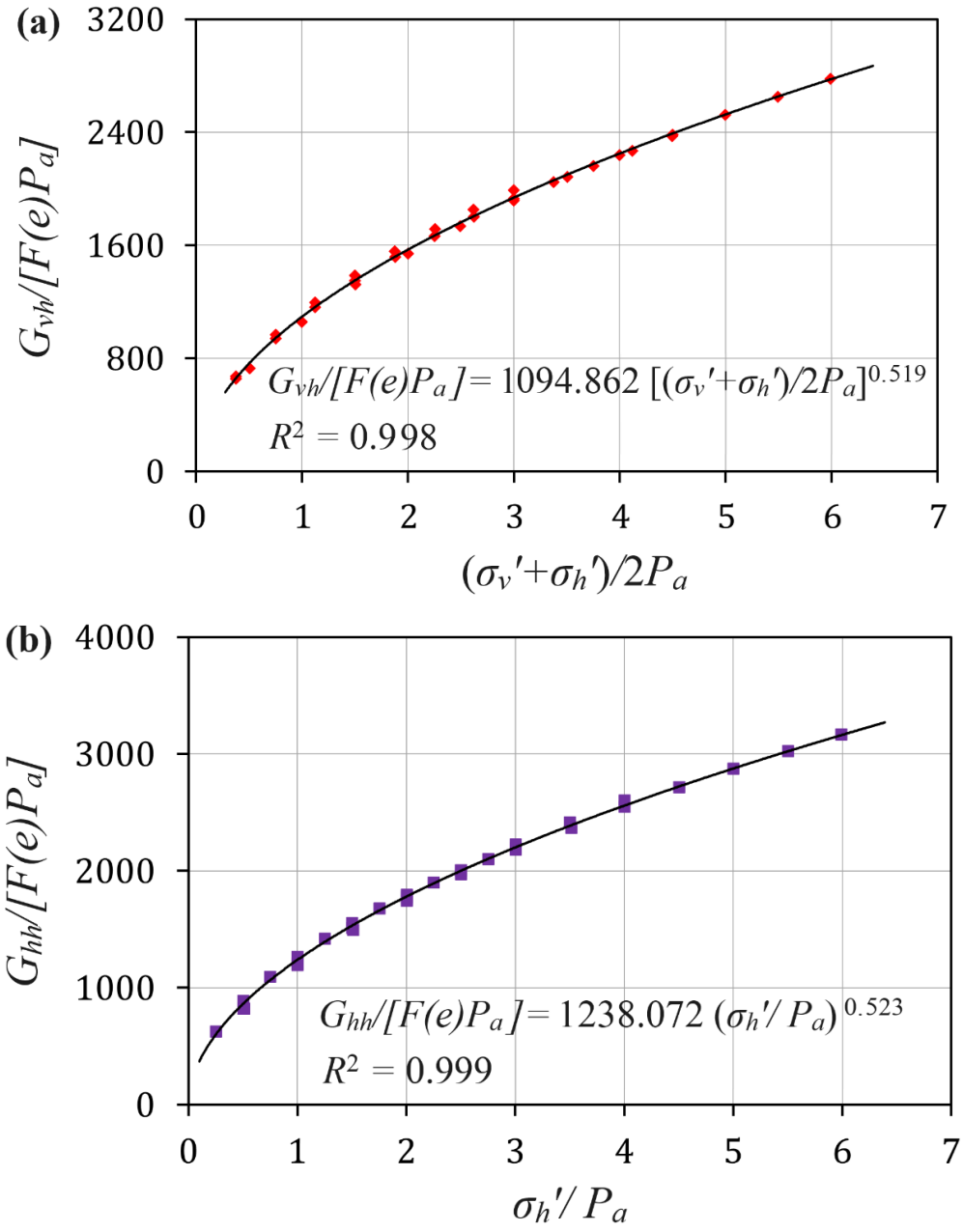
Fig 6. The variations model of $A_{hh}/A_{vh}$ against the sphericity $S$ ($N$ = 43)

## نتایج 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 $D_r$ دارای تأثیر قابل توجهی بر تغییرپذیری ناهمسانگردی ساختار بافتی نمونه‌های بازسازی شده برای یک خاک با تکنیکی یکسان نمی‌باشد. صحت این ادعا، با ارزیابی مقادیر $A_{hh}/A_{vh}$ به طور جداگانه برای نمونه‌هایی با $D_r$های متفاوت در خاک‌های مختلف قابل اثبات است. برای مثال، در شکل‌های ۷a تا ۷d فرآیند استنتاج ثابت‌های $A_{vh}$ و $A_{hh}$ برای نمونه‌های ماسه کنیا با ٪۴۰-۳۰ $D_r$ (نمونه‌های نسبتاً شُل) و ٪۹۵-۸۵ $D_r$ (نمونه‌های متراکم) نشان داده شده است. از شکل‌های ۷a و ۷b می‌توان دید که برای نمونه‌های نسبتاً شُل $A_{vh}$ = ۱۰۹۴/۸۶۲، $A_{hh}$ = ۱۲۳۸/۰۷۲ و نتیجتاً $A_{hh}/A_{vh}$ = ۱/۱۳۱ می‌باشد؛ حال آنکه، شکل‌های ۷c و ۷d این مقادیر را برای نمونه‌های متراکم به صورت $A_{vh}$ = ۱۲۶۴/۲۵۸، $A_{hh}$ = ۱۵۵۷/۰۴۶ و $A_{hh}/A_{vh}$ = ۱/۲۳۲ ارائه می‌دهند. در نگاهی کلی، نتایج به‌دست آمده نشان دادند که نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی عملاً بدون هیچ گونه خطای قابل ملاحظه‌ای مستقل از سطح تراکم نسبی است. همین امر موجب گردید که برای نمونه‌هایی با مقادیر متمایز $D_r$، یک نسبت $A_{hh}/A_{vh}$ میانگین در نظر گرفته شود مشروط بر اینکه این مقادیر دارای تفاوت بسیار نباشند.

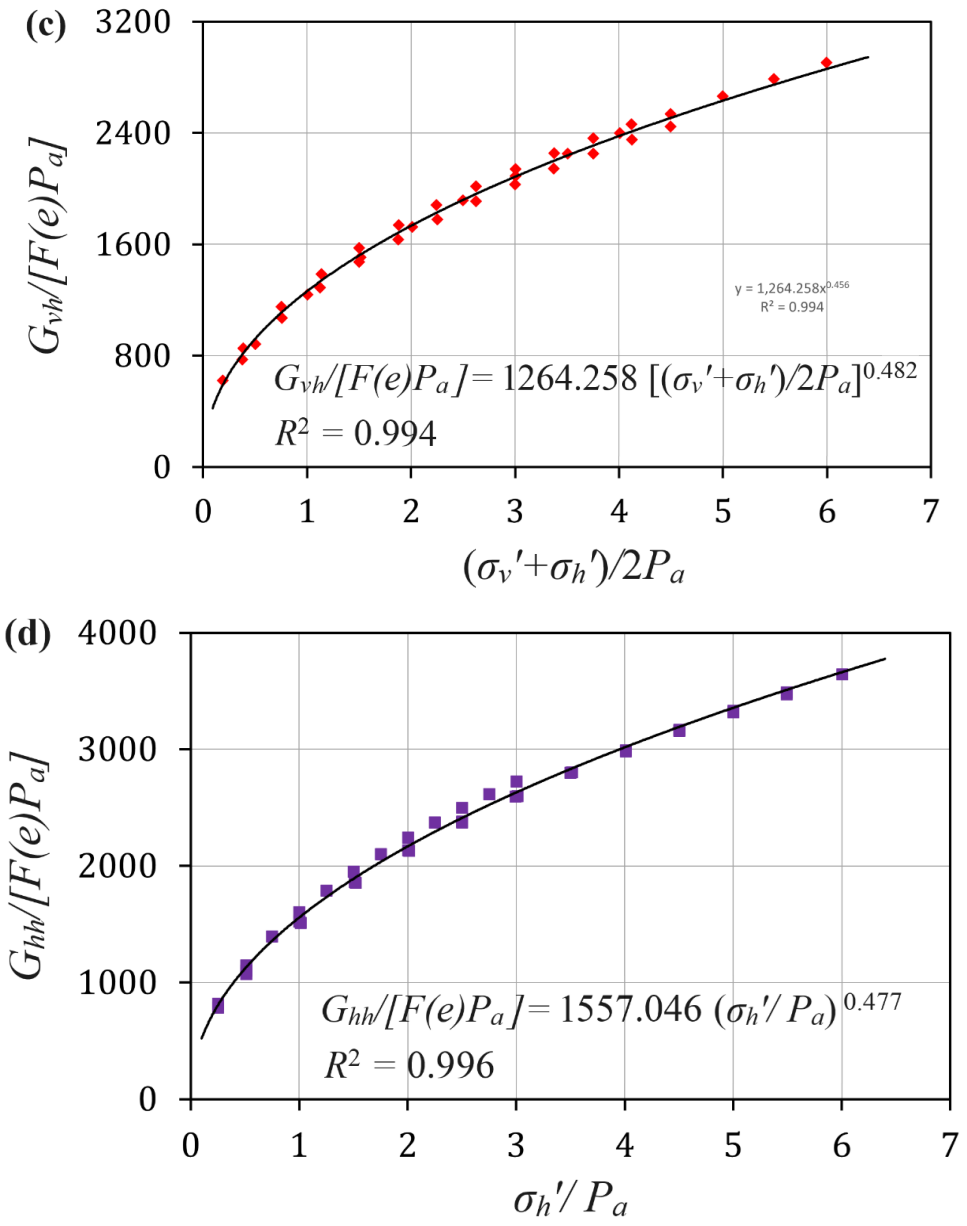
[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]

[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]




[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]

[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]




شکل ۷. فرآیند به‌دست آوردن ثابت‌های $A_{vh}$ و $A_{hh}$ برای ماسه کنیا در حالت‌های نسبتاً شُل و متراکم. (a) ترسیم $G_{vh}/F(e)P_a$ در برابر $(\boldsymbol{\sigma_v' + \sigma_h')/2P_a}$ به منظور استنتاج $A_{vh}$ برای نمونه‌هایی با $D_r$ = ۳۰-۴۰٪؛ (b) ترسیم $G_{hh}/F(e)P_a$ در برابر $\boldsymbol{\sigma_h'/P_a}$ به منظور استنتاج $A_{hh}$ برای نمونه‌هایی با $D_r$ = ۳۰-۴۰٪؛ (c) ترسیم $G_{vh}/F(e)P_a$ در برابر $(\boldsymbol{\sigma_v' + \sigma_h')/2P_a}$ به منظور استنتاج $A_{vh}$ برای نمونه‌هایی با $D_r$ = ۸۵-۹۵٪؛ (d) ترسیم $G_{hh}/F(e)P_a$ در برابر $\boldsymbol{\sigma_h'/P_a}$ به منظور استنتاج $A_{hh}$ برای نمونه‌هایی با $D_r$ = ۸۵-۹۵٪

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 $A_{hh}/A_{vh}$، 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 $A_{vh}$ و $A_{hh}$ به‌دست خواهند

[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]
[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]

آمد، اما نسبت آنها با اختلافی اندک در عمل بدون تغییر باقی می‌ماند. برای مثال، نسبت $A_{hh}/A_{vh}$ 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 درحالی‌که آزمایشات باربرداری این نسبت را به صورت ۰/۹۲۶ و ۱/۰۰۲ ارائه دادند. بنابراین، در اینجا نیز میانگین نسبت‌های $A_{hh}/A_{vh}$ 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 $A_{hh}/A_{vh}$ شدند که به نوبه خود می‌توانست 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 عدم پیری مطابقت داشتند. برای مثال، آزمون‌های انجام شده بر روی ماسه تمیز تویورا توسط گائو و همکاران (Gao et al., 2015) نشان دادند که تحت شرایط پیری $A_{hh}/A_{vh}$ = ۱/۰۷۲، حال آنکه برای حالت عدم پیری $A_{hh}/A_{vh}$ = ۱/۰۶۱ 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 مادامی‌که میزان خاک‌های ریزدانه در ترکیبات ماسه‌ها با ریزدانه‌ها از یک مقدار آستانه کمتر باشد، نسبت‌های $A_{hh}/A_{vh}$ برای آنها مشابه با مقادیر حاصل برای مصالح دانه‌ای خالص هستند. بنابراین، احتیاط‌های لازم در این مطالعه برای استفاده از اطلاعات ترکیبات حاوی ماسه‌ها و ریزدانه در کنار اطلاعات خاک‌های دانه‌ای خالص مدنظر قرار گرفت. همچنین لازم به ذکر است که بر مبنای فرضیه ناهمسانگردی متقاطع، برای خاک‌هایی که بزرگی سختی برشی در صفحات قائم آنها با هر دو مقدار $G_{vh}$ و $G_{hv}$ داده شده بود، میانگین این کمیت‌ها به عنوان مقدار معرف $G_{vh}$ در نظر گرفته شد (O'Donovan et al., 2015; Otsubo et al., 2020).

## نتیجه‌گیری

هدف اصلی از این مطالعه ارائه یک رویکرد مفید برای ارزیابی نسبت ناهمسانگردی ساختار بافتی در مصالح زمینی دانه‌ای از اطلاعات مربوط به ویژگی‌های دانه‌بندی و شکل ذرات بود. برای این منظور، با فرض ناهمسانگردی متقاطع، تعداد ۱۰۴۲ مجموعه از مدول‌های سختی برشی ناهمسانگرد ($G_{vh}$ و $G_{hh}$)، که متعلق به طیف گسترده‌ای از انواع خاک‌های دانه‌ای بودند، بر حسب نسبت‌های تخلخل متناظر، شرایط تنش و پارامترهای دانه‌بندی و شکل ذرات مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. با استفاده از یک معادله تجربی معروف که مولفه‌های ناهمسانگرد مدول برشی را بر حسب ساختار بافتی خاک، تابع نسبت تخلخل و حالت تنش متوسط ارائه می‌کند، نسبت‌های ناهمسانگردی ساختار بافتی در خاک‌ها از تحلیل‌های برازش منحنی به‌دست آمدند. به منظور درک میزان حساسیت نسبت‌های ناهمسانگردی سختی برشی و ساختار بافتی به وضعیت تنش القایی، مقادیر $G_{hh}/G_{vh}$ و $A_{hh}/A_{vh}$ به‌طور جداگانه در برابر نسبت تنش اصلی $\sigma'_h/\sigma'_v$ ترسیم شدند. نتایج نشان دادند که نسبت $G_{hh}/G_{vh}$ دارای یک روند صعودی از ۰/۳۹۲ تا ۲/۶۴۰ با افزایش $\sigma'_h/\sigma'_v$ از ۰/۲۵ تا ۴/۰۰ می‌باشد به‌طوری‌که ممکن شد تا به صورت تقریبی در قالب یک تابع توانی بیان گردید. با این حال، با توجه به عدم تغییرپذیری نسبت $A_{hh}/A_{vh}$ در مقابل افزایش $\sigma'_h/\sigma'_v$ با حفظ ثبات نسبی در بازه ۰/۵۱۲ تا ۲/۶۴۰، در عمل هیچ روند تغییرات خاصی برای آن قابل تشخیص نبود. این بدین معناست، مادامی‌که نسبت تنش $\sigma'_h/\sigma'_v$ کمتر از یک مقدار آستانه باشد، تغییرات قابل توجهی در ساختار اسکلتی

[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]
[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]

خاک رخ نخواهد داد. نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌های رگرسیونی در واکاوی سطح وابستگی $A_{hh}/A_{vh}$ به خواص دانه‌بندی و شکل دانه‌ها، نشان دادند که پارامترهای $S$، $D_{max}$ و $D_{50}$ به ترتیب بیشترین تأثیر نسبی را بر $A_{hh}/A_{vh}$ دارا می‌باشند. مقادیر $A_{hh}/A_{vh}$ 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.

## قدردانی

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, 4th 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.

[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]

[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]

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 $K_0$ lateral earth coefficient in soils using paired directional $G_0$ ratios. Journal of Applied Geophysics, 94, 15-21.

Ku, T., Mayne, P. W., 2013b. Evaluating the in situ lateral stress coefficient ($K_0$) 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.

[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]

[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]

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.

[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]

[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]

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.

[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]

[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]

Journal of Engineering Geology, Vol. 17, No. 1, Spring 2023

# 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;

*Corresponding author: e.pegah@khu.ac.ir

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

[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]

[ DOI: 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):

$$G_{ij} = A_{ij}\, F(e)\, P_a\, (\frac{\sigma_i' + \sigma_j'}{2P_a})^{n_{ij}} \quad (1)$$

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):

$$\frac{G_{vh}}{F(e)\, P_a} = A_{vh}\, (\frac{\sigma_v' + \sigma_h'}{2P_a})^{n_{vh}} \quad (2)$$

$$\frac{G_{hh}}{F(e)\, P_a} = A_{hh}\, (\frac{\sigma_h'}{P_a})^{n_{hh}} \quad (3)$$

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.

[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]

[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]

## 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:

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

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

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

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.

[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]

[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]

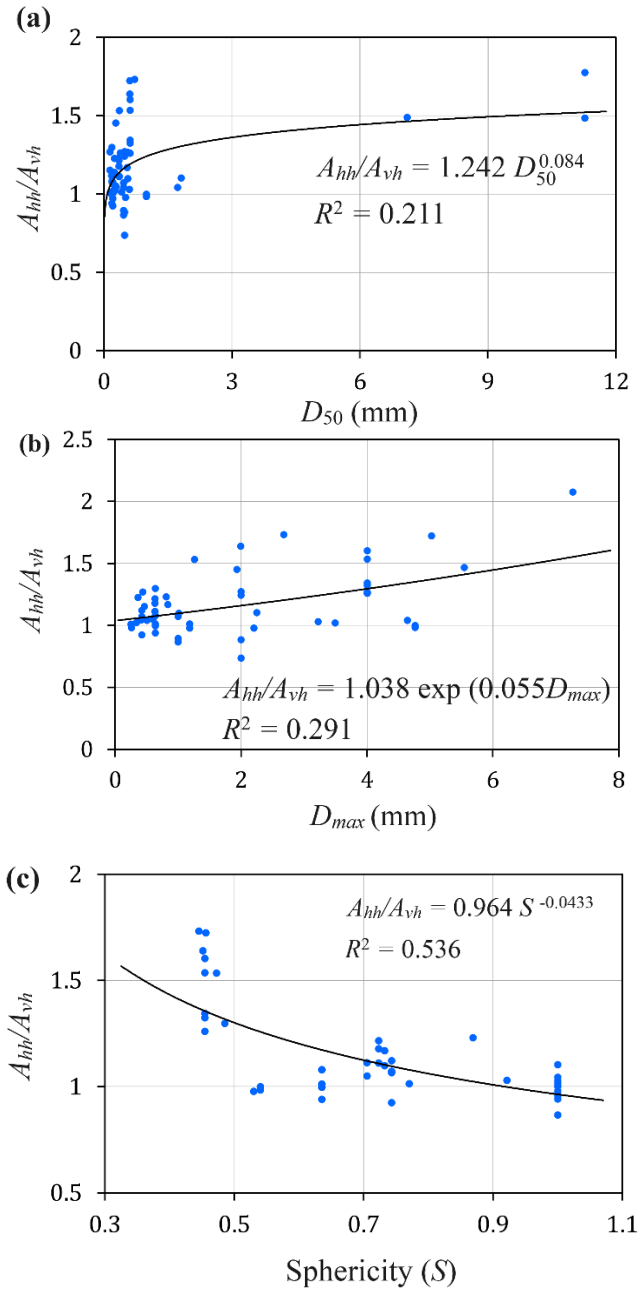



Fig 1. The variations model of $A_{hh}/A_{vh}$ against (a) the median grain size $D_{50}$; (b) the maximum grain size $D_{max}$; and (c) the sphericity $S$

## 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

[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]
[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]

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.

[ Downloaded from ncfc.khu.ac.ir on 2026-07-26 ]

[ DOI: 10.22034/JEG.2023.17.1.1019161 ]