



Research Article

OPEN ACCESS

Kharazmi Journal of Earth Sciences

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>

Fabric anisotropy in sands and assessing its dependence on grading and surface appearance parameters

Farideh Talae Firozjaee¹, Ehsan Pegah^{2*}, Ali Misaghi³

1. M.Sc. Graduate in Geophysics, Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran.

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

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

Article info

Article history

Received: 31 July 2024

Accepted: 16 August 2024

Keywords:

Transverse isotropy, Sandy soils, Soil skeleton, Seismic wave velocity, Grains physical properties



Abstract

Fabric anisotropy plays a crucial role in the variations model of anisotropy degree of soil elastic coefficients. This study aims to quantify this anisotropy in sandy soils, examining its variations in terms of the available stress conditions, and assessing its dependence on grading, shape and soil particles weight characteristics. To this end, by presuming the transverse isotropy in the soil medium, the elastic coefficients obtained from 419 laboratory tests on 28 different samples of 17 different sands were collected from literature. Indeed, those were attained from the seismic velocity measurements and supplemented with corresponding data on void ratio, stress state, grading, shape and weight properties. Based using on a famous experimental equation, the collected data was analyzed, and the fabric anisotropy ratio was computed for each soil sample. By drawing these results versus the respective experienced stresses, the variability model and the amplitude of the ratio were identified with respect to the applied stresses. Finally, by performing a series of simple and multiple regression analyses, the potential correlations between the fabric anisotropy ratio and the representative characteristics of grading, shape and particles weight were investigated resulting in a couple of mutual relationships.

Introduction

The exact determination of anisotropic elastic features in soils is always of controversial topics in earth sciences and engineering. The elastic anisotropy in soil mass is mainly due to available natural anisotropy of soil fabric coupled with the anisotropy resulting from the in-situ stress state (Dutta et al., 2020; Masin and Rott, 2014; Gu et al., 2017). The fabric of soil is indeed the indicative of soil mass skeletal structure, which is defined generally as the geometrical arrangement of soil grains relative to one another including the spatial distribution of voids (Das and Sobhan, 2014; Pegah et al., 2024). The influence of fabric anisotropy on stiffness values in different directions and planes is very prominent such that has a large contribution in variability of stiffness anisotropy (Gu et al., 2022; Shi et al., 2021). Therefore, the fabric anisotropy of soil can be considered as a highly effective factor in degree of

anisotropy of elastic coefficients and their ultimate assessing.

The ratio of fabric anisotropy may be directly specified from the measured elastic parameters based on the seismic velocities. In the meantime, the values of anisotropic shear moduli in vertical and horizontal soil planes can be introduced as the best indices to determine this ratio properly; because, those are directly dependent to the skeletal attributes of soil mass regardless of its saturation state (Pegah and Liu, 2020b; Pegah et al., 2016, 2021, 2022). The magnitude of anisotropic shear moduli may be calculated via anisotropic components of shear wave velocity in vertical and horizontal planes by relying on given equations from theory of transverse isotropy. Afterwards, a series of regression analysis is fulfilled on these data against the corresponding stress conditions to lastly yield the fabric anisotropy ratio.

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.1.107021>

*Corresponding author: Ehsan Pegah; E-mail: e.pegah@khu.ac.ir

How to cite this article: Talae Firozjaee, F., Pegah, E., Misaghi, A., 2024. Fabric anisotropy in sands and assessing its dependence on grading and surface appearance parameters. Kharazmi Journal of Earth Sciences 10(1), 73- 90. <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.1.107021>



BY NC

Overall, two main objectives are pursued in this study. The first is determining the fabric anisotropy ratio for a wide variety of distinct sands coupled with inspecting the variability of this ratio and the ratio of stiffness anisotropy in terms of the experienced stress states. The second objective is evaluating the dependence of fabric anisotropy on grading, shape and soil grains particularities through its representation as the functions of these characteristics. By using the derived equations, the estimation of fabric anisotropy ratio and subsequently shear stiffness anisotropy in sandy soils may be possible based merely using on the surface appearance properties, which in turn can be easily measured.

Derivation of Fabric Anisotropy Ratio Using Shear Moduli

To obtain the degree of fabric anisotropy in sands, a well-known experimental relationship attributing to the individual stress model was utilized. It relates the anisotropic components of shear modulus, which in turn are calculated through S-wave velocities, to principal effective stresses in propagation and polarization directions (Eqs. (1) and (2)). It is worth to mention that the individual stress model is an accurate and popular model that is being used widely in evaluation of shear stiffness values by different studies (Ku and Mayne, 2013a; Ku et al., 2017; Pegah and Liu, 2020a).

$$G_{vh} = A_{vh} F(e) P_a \left(\frac{\sigma'_v \sigma'_h}{P_a^2} \right)^{n_{vh}} \quad (1)$$

$$G_{hh} = A_{hh} F(e) P_a \left[\left(\frac{\sigma'_h}{P_a} \right)^2 \right]^{n_{hh}} \quad (2)$$

In these equations, the constants A_{vh} and A_{hh} are the anisotropic components of soil fabric, respectively, in vertical and horizontal planes. $F(e)$ is the void ratio function and P_a is the reference pressure equal to 100 kPa. Likewise, the constants n_{vh} and n_{hh} are, respectively, the dependent exponents to the corresponding σ'_v and σ'_h stresses. By a simple manipulation, the Eqs. (1) and (2) might be rearranged as follows:

$$\frac{G_{vh}}{F(e) P_a} = A_{vh} \left[\frac{\sigma'_v \sigma'_h}{P_a^2} \right]^{n_{vh}} \quad (3)$$

$$\frac{G_{hh}}{F(e) P_a} = A_{hh} \left[\left(\frac{\sigma'_h}{P_a} \right)^2 \right]^{n_{hh}} \quad (4)$$

Those show that by implementing simple regression analyses on the paired data points “ $\frac{G_{vh}}{F(e) P_a} - \frac{\sigma'_v \sigma'_h}{P_a^2}$ ” and “ $\frac{G_{hh}}{F(e) P_a} - \left(\frac{\sigma'_h}{P_a} \right)^2$ ”, it would be feasible to attain the vertical and horizontal components of soil fabric individually, and lastly calculate the ratio of fabric anisotropy (A_{hh}/A_{vh}) for each soil tested in this research.

A Database of Transverse Isotropic Elastic Properties, Grading Parameters and Surface Appearance Features

In order to calculate the anisotropic components of soil fabric, the variations range of their ratio in sands, and their dependence on surface appearance features, the required information relating to 28 various sands from distinct sites in the world were acquired from literature. By presuming transverse isotropy in soil medium, an extensive category of essential data including anisotropic elastic parameters in vertical and horizontal directions and planes such as Young's moduli (E'_v and E'_h), shear moduli (G_{vh} and G_{hh}) and Poisson's ratios (ν'_{vh} and ν'_{hh}), in-situ stress components (σ'_v and σ'_h), void ratio (e) and function of void ratio ($F(e)$) were collected. These data were the incorporated with the information of grading, shape and weight characteristics to generate a complete database for attaining to the intended objectives of the study.

Results of data analysis

To analyze the variability features of stiffness anisotropy in sands, 419 data points of G_{hh}/G_{vh} were plotted in terms of corresponding σ'_h/σ'_v ratios for a wide variety of tested sands in this research. It was observed that for stress ratio variations in range of 0.25 to 2.5, the ratios of shear moduli show an ascending trend ranging from 0.75 to 1.54. It was also resulted that 32% of shear anisotropy can be ascribed to the stress ratio variations while the remaining 68% might be due to other potential factors like the fabric anisotropy

properties. By a similar manner, the variation trend of A_{hh}/A_{vh} ratio was inspected for the tested soils. It could be seen that the A_{hh}/A_{vh} shows a very negligible increasing trend within the above-mentioned stress ratio range so that may be assumed unchanged in practice. This proves that as long as the exerted stress ratio on a soil mass doesn't transgress a specific value, no remarkable change is developed in the skeletal structure of soil.

The performed examinations on potential correlations among fabric anisotropy ratio A_{hh}/A_{vh} to grading, shape and particles weight characteristics demonstrated the levels of dependency to some extents. In the meantime, the relevant property to particles shape possesses the largest effect on the ratio while the grading and weight properties indicated lower influences. In this regard, the most pronounced equations from conducted regression analyses could be given as the following:

$$\frac{A_{hh}}{A_{vh}} = 1.079S^{-0.436} ; R^2 = 0.569, N = 25 \quad (5)$$

$$\frac{A_{hh}}{A_{vh}} = 1.309D_{max}^{0.079} ; R^2 = 0.225, N = 28 \quad (6)$$

$$\frac{A_{hh}}{A_{vh}} = 1.211C_u^{0.133} ; R^2 = 0.153, N = 28 \quad (7)$$

Where S is the representative of sphericity, D_{max} introduces the maximum grain size, and C_u represents the uniformity coefficient, respectively. R^2 is the coefficient of determination and N shows the number of data points involved in analyses.

Conclusions

In general, the following results could be attained from the performed analyses by this study:

1. From comparing the anisotropic components of soil fabric in vertical and horizontal planes it could be figured out that the sands reveal stronger fabric in horizontal planes relative to the vertical ones.
2. The variations trends of shear stiffness and fabric anisotropy ratios within a limited stress ratio ranging from 0.25 to 2.5 displayed that the G_{hh}/G_{vh} increases as σ'_h/σ'_v increases while A_{hh}/A_{vh} stays constant practically without any significant change.
3. From inspecting the dependency of A_{hh}/A_{vh} on grading, shape and particles weight features it was

observed that variables S , D_{max} and C_u have the most contributions in variability of fabric anisotropy ratio; however, other parameters including effective size (D_{10}), median grain size (D_{50}), coefficient of gradation (C_c) and specific gravity G_s have the lowest influences.

4. The findings of this study may be utilized as an affordable reference for predicting shear stiffness and fabric anisotropy ratios in sandy soils without use of time-consuming and costly laboratory tests.

References

- Das, B. M., Sobhan, K., 2014. Principles of Geotechnical Engineering, 4th Edition. Cengage Learning, Stamford, USA.
- Dutta, T. T., Otsubo, M., Kuwano, R., Sato, T., 2020. Estimating multidirectional stiffness of soil using planer piezoelectric transducers in a large triaxial apparatus. *soil and foundation*, 60, 1269-1286.
- 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 and fabric anisotropy of natural clays. *Acta Geotechnica*, 17, 3229-3243.
- Ku, T., Mayne, P. W., 2013a. Profiling of K_0 lateral stress coefficient in soils using paired directional G_0 ratios. *Journal of Applied Geophysics*, 94, 15-21.
- Ku, T., Subramanian, S., Moon, S. W., Jung, J., 2017. Stress dependency of shear wave velocity measurements in soils. *Journal of Geotechnical and geoenvironmental Engineering*, 143, 2, 04016092.
- Masin, D., Rott, J., 2014. Small strain stiffness anisotropy of natural sedimentary clays: review and a model. *Acta Geotechnica*, 9, 299-312.
- Pegah, E., Gu, X. Q., Liu, H., 2024. Fabric anisotropy of granular soils and its dependency on grading and particles specifications. *Acta Geotechnica*, <https://doi.org/10.1007/s11440-024-02357-1>.
- 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.

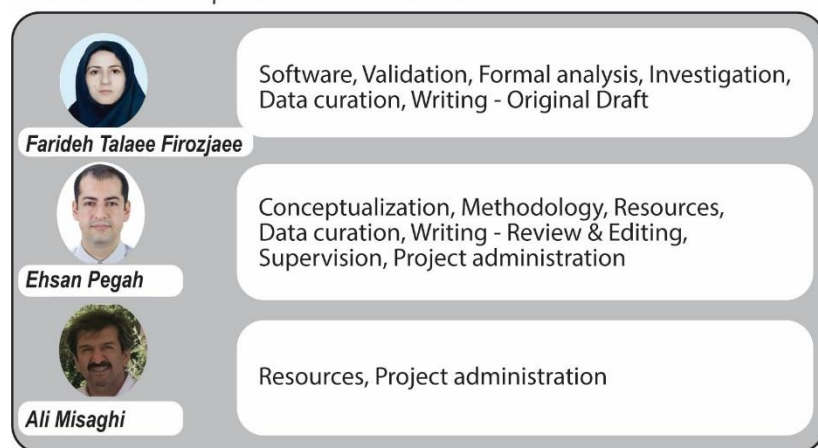
Pegah, E., Liu, H., Gholami, A., 2021. Estimating drained cross-anisotropic elastic parameters in saturated clays using the undrained properties. *Engineering Geology*, 293, 106340.

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.

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.

CRediT authorship contribution statement

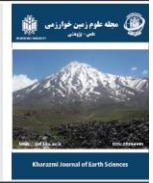




Research Article

OPEN ACCESS

Kharazmi Journal of Earth Sciences

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>

ناهمسانی ساختار بافتی در ماسه‌ها و سنجش وابستگی آن به پارامترهای دانه‌بندی و مشخصات ظاهری دانه‌ها

فریده طلایی فیروزجایی^۱، احسان پگاه^{۲*}، علی میثاقی^۳

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

۲. استادیار، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

۳. استادیار، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

چکیده

ناهمسانی ساختار بافتی دارای نقشی مهم در الگوی تغییرات مقادیر منتسب به درجه ناهمسانی ضرایب کشسانی خاک می‌باشد. این ناهمسانی بیشتر ناشی از تفاوت موجود در چیدمان هندسی ذرات و به طور کلی خواص اسکلتی در صفحات مختلف توده خاک می‌باشد. شناخت این ویژگی همواره منجر به درک بهتر و تحلیل دقیق‌تری از رفتار ژئوتکنیکی خاک تحت تأثیر انواع بارگذاری خواهد شد. بر همین اساس، هدف این مطالعه، تعیین این ناهمسانی در خاک‌های ماسه‌ای، بررسی محدوده تغییرات آن بر حسب شرایط تنش حاکم و در نهایت سنجش وابستگی آن به پارامترهای دانه‌بندی، شکل و وزن دانه‌های خاک می‌باشد. بدین منظور، با فرض وجود همسانگردی عرضی در محیط خاک، ضرایب کشسانی حاصل از ۴۱۹ آزمون آزمایشگاهی بر روی ۲۸ نمونه متفاوت از ۱۷ نوع ماسه مختلف که از اندازه‌گیری سرعت‌های لرزه‌ای بدست آمده بودند همراه با داده‌های نسبت تخلخل، حالت تنش، ویژگی‌های دانه‌بندی، شکل و وزن ذرات، از مقالات معتبر گردآوری شدند. بر مبنای یک معادله تجربی معتبر، اطلاعات گردآوری شده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند و مقادیر نسبت ناهمسانی ساختار بافتی برای خاک‌های مورد بررسی محاسبه شدند. با ترسیم نتایج به‌دست آمده در مقابل حالات تنش متناظر، الگو تغییرپذیری و دامنه تغییرات این نسبت بر حسب شرایط تنش موجود مشخص گردید. در انتها، با اجرای یک سری از تحلیل‌های رگرسیونی ساده و چند گانه، پتانسیل همبستگی میان نسبت ناهمسانی ساختار بافتی و مشخصات تشریح کننده دانه‌بندی، شکل و وزن دانه‌ها بررسی شده و روابط تجربی حاکم بر آنها استخراج گردیدند.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۰

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۶

واژه‌های کلیدی

همسانگردی عرضی، خاک‌های ماسه‌ای، اسکلت خاک، سرعت موج لرزه‌ای، مشخصات فیزیکی ذرات.



مقدمه

برای هر یک از انواع ضرایب کشسان در توده خاک می‌گردد. ناهمسانی کشسان در محیط خاک بیشتر ناشی از ناهمسانی طبیعی ساختار بافتی خاک و ناهمسانی موجود در حالت تنش برجا می‌باشد (Dutta et al., 2017; Masin and Rott, 2014; Gu et al., 2020). ساختار بافتی خاک به نظم هندسی قرارگیری ذرات خاک نسبت به یکدیگر، شامل توزیع هندسی فضاهای خالی اشاره دارد که در واقع بیانگر ساختار اسکلتی حاضر در توده خاک می‌باشد (Das and Sobhan, 2014; Pegah et al., 2024). بر

تعیین دقیق ویژگی‌های ناهمسانی کشسانی در خاک‌ها، همواره از مهم‌ترین موضوعات مورد بحث در مطالعات علوم و مهندسی زمین‌شناسی است. ناهمسانی کشسانی در اصل به استقلال و عدم تساوی پارامترهای کشسان در جهات و صفحات مختلف اشاره دارد؛ بدین معنی که مقادیر ویژگی‌های کشسان در خاک، وابسته به جهت یا صفحه‌ای که در راستای یا درون آن اندازه‌گیری می‌شوند هستند. این امر موجب خلق مقادیر متفاوت

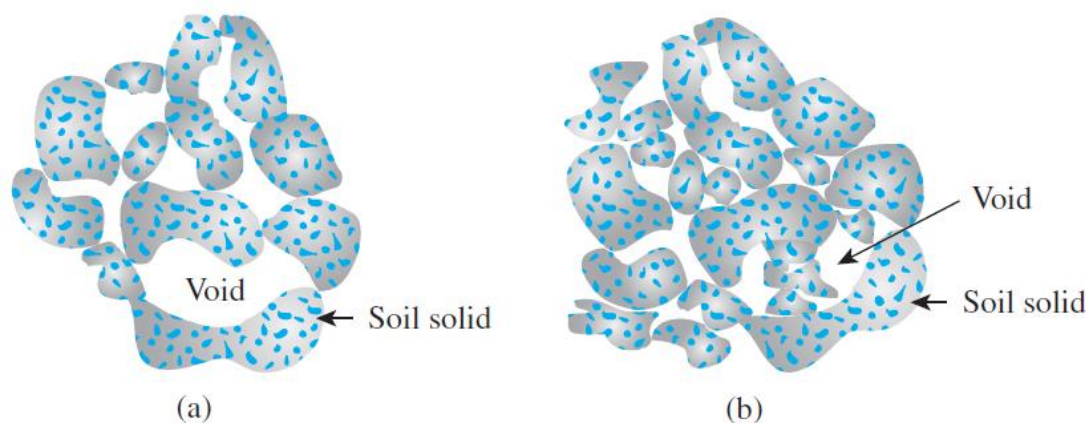
DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.1.107021>

*نویسنده مسئول: احسان پگاه e.pegah@khu.ac.ir

استناد به این مقاله: طلایی فیروزجایی، ف.، پگاه، ا.، میثاقی، ع. (۱۴۰۳) ناهمسانی ساختار بافتی در ماسه‌ها و سنجش وابستگی آن به پارامترهای دانه‌بندی و مشخصات ظاهری دانه‌ها. مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۱۰، شماره ۱، صفحه ۷۳ تا ۹۰. <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.1.107021>



راستای عمود است. این مسئله منجر به ایجاد ساختار بافتی ناهمسان در نهشته‌های خاک‌های ماسه‌ای شده که به نوبه خود باعث ایجاد تغییرات قابل ملاحظه‌ای در خواص مهندسی رسوبات می‌گردد (Shi et al., 2021). باید اشاره نمود که تعریف ساختار بافتی قدری متفاوت با تعریف در نظر گرفته شده برای ساختار خاک می‌باشد که دربرگیرنده خصوصیات دیگری از جمله لایه‌بندی، ترک‌های انقباضی، سطوح برشی و نیروهای بین ذره‌ای است. با این وجود، این دو اصطلاح غالباً به جای یکدیگر استفاده می‌شوند (Handy and Spangler, 2007). به طور کلی، دو نوع ساختار بافتی در خاک‌های دانه‌ای وجود دارند: الف - ساختار تک‌دانه‌ای و ب - ساختار لانه‌زنبوری. در ساختار تک‌دانه‌ای، در توده‌ی ذرات در حال تعادل، هر ذره خاک در تماس با ذرات احاطه کننده خود می‌باشد. شکل و دانه‌بندی ذرات خاک و وضعیت نسبی آنها، در تراکم و در نتیجه در تخلخل خاک مؤثر می‌باشند (شکل ۱).



شکل ۱- ساختار تک دانه‌ای: (a) حالت سست؛ (b) حالت متراکم (Das and Sobhan, 2014).

Fig 1. Single grain structure: a) loose state. b) dense state (Das and Sobhan, 2014).

تحت بارهای استاتیک سنگین و یا بارهای دینامیکی، ساختار آنها شکسته شده و به علت کاهش زیاد تخلخل، نشست قابل توجهی در خاک به وجود می‌آید (Das and Sobhan, 2014).

همین اساس است که ناهمسانی موجود در پارامترهای کشسانی و شدت آن، که به عنوان درجه یا نسبت ناهمسانی شناخته می‌شود، به طور مستقیم در ارتباطی تنگاتنگ با خصوصیات ساختار بافتی خاک قرار دارند. تأثیر ناهمسانی ساختار بافتی بر مقادیر سختی خاک در جهات و صفحات مختلف به حدی برجسته است که دارای سهمی بزرگ در الگوی تغییرات مقادیر منتسب به درجه ناهمسانی سختی می‌باشد (Gu et al., 2022; Shi et al., 2021). بنابراین، ناهمسانی ساختار بافتی خاک را می‌توان به عنوان عاملی کاملاً مؤثر بر درجه ناهمسانی ضرایب کشسانی و نهایتاً ارزیابی آن در نظر گرفت.

از آنجایی که ذرات ماسه معمولاً دارای شکل هندسی منظمی نمی‌باشند؛ بنابراین، در هنگام رسوب‌گذاری محور طویل ذرات تمایل به قرارگیری همسو با سطح افق دارد و محور کوتاه‌تر متمایل به قرارگیری در

در ساختار لانه‌زنبوری (شکل ۲)، ذرات ماسه و لای نسبتاً ریزدانه با تشکیل زنجیره‌ای از ذرات، تشکیل قوس‌های کوچکی می‌دهند. خاک‌هایی که ساختار آنها لانه‌زنبوری است، دارای نسبت تخلخل نسبتاً بزرگ هستند و تحت بارهای استاتیک معمولی می‌توانند ساختار خود را حفظ کنند. لیکن

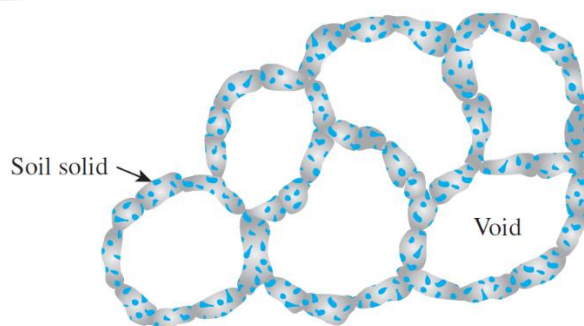


Fig 2. Honeycombed structure (Das and Sobhan, 2014)

شکل ۲- ساختار لانه زنبوری (Das and Sobhan, 2014)

سختی برشی بر حسب حالت تنش متناظر است. هدف دوم، ارزیابی وابستگی درجه ناهمسانی ساختار بافتی به مشخصات دانه‌بندی، شکل و وزن ذرات خاک و در نهایت بیان این نسبت به صورت تابعی از این خصوصیات است. جهت دستیابی به این اهداف، با فرض وجود همسانگرد عرضی در محیط خاک، طیف وسیعی از داده‌های مورد نیاز از پیشینه تحقیق گردآوری شده و یک پایگاه داده جامع ایجاد گردید. این داده‌ها شامل مقادیر متغیرهای کشسانی، پارامترهای استخراج شده از منحنی دانه‌بندی و ویژگی‌های ذرات مربوط به ۲۸ نمونه مختلف از ۱۷ نوع خاک ماسه‌ای گوناگون متعلق به نقاط مختلف در دنیا می‌باشند. بر مبنای یک معادله تجربی مشهور و با استفاده از یک روش پیشنهادی، اطلاعات کشسانی گردآوری شده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند و مقادیر نسبت ناهمسانی ساختار بافتی در خاک‌های ماسه‌ای مورد مطالعه شناسایی شدند. نسبت‌های بدست آمده سپس در مقابل پارامترهای بیان‌کننده مشخصات دانه‌بندی و ذرات خاک ترسیم شدند تا سطح وابستگی این نسبت به ویژگی‌های مذکور تعیین گردد. در انتها، با اجرای یک سری از تحلیل‌های رگرسیونی ساده و چند گانه، نسبت ناهمسانی ساختار بافتی در قالب روابطی تجربی بر حسب خواص دانه‌بندی و ذرات خاک ارائه گردید. با استفاده از معادلات بدست آمده، تعیین نسبت ناهمسانی ساختار بافتی و به تبع آن ناهمسانی سختی برشی در خاک‌های ماسه‌ای تنها بر اساس خصوصیات ظاهری خاک که به سهولت قابل اندازه‌گیری هستند مقدور می‌گردد.

نسبت ناهمسانی ساختار بافتی را می‌توان مستقیماً از پارامترهای کشسانی اندازه‌گیری شده بر مبنای سرعت‌های لرزه‌ای بدست آورد. در این میان، مقادیر مدول‌های برشی ناهمسان در صفحات افقی و قائم توده خاک را می‌توان به عنوان بهترین شاخص در تعیین این نسبت معرفی نمود. دلیل این امر، وابستگی مستقیم مقادیر این مدول به خصوصیات اسکلت خاک صرف‌نظر از وضعیت اشباع موجود می‌باشد (Pegah and Liu, 2020b; Pegah et al., 2016, 2021, 2022). مقادیر مدول‌های برشی ناهمسان را می‌توان از اندازه‌گیری سرعت مولفه‌های ناهمسان موج برشی در صفحات افقی و قائم بر مبنای معادلات ارائه شده در نظریه کشسانی همسانگرد عرضی محاسبه نمود. مقادیر سرعت مولفه‌های ناهمسان موج برشی را معمولاً در آزمایشگاه با استفاده از روش‌هایی نظیر آزمایش المان خمشی و آزمایش ستون تشدید تحت شرایط تنش معلوم اندازه‌گیری می‌کنند. این مقادیر را می‌توان همچنین با استفاده از پیمایش‌های صحرائی نظیر روش‌های تحلیل چند کاناله امواج سطحی ریلی و لاو و روش چاه‌های دوگانه ضمن شرایط تنش برجا اندازه‌گیری نمود. پس از استخراج مدول‌های برشی ناهمسان در خاک، یک سری از تحلیل‌های رگرسیونی که بر پایه معادلات معتبر تجربی استوار می‌باشند بر روی این داده‌ها در مقابل حالت تنش متناظر اعمال شده و در نهایت نسبت ناهمسانی ساختار بافتی تعیین می‌شود.

به‌طور کلی، در این مطالعه دو هدف اصلی دنبال می‌شود که می‌توان آنها را به نوعی در قالب دستاوردهای نوآورانه معرفی نمود. هدف اول، تعیین نسبت ناهمسانی ساختار بافتی در طیف متنوعی از انواع ماسه‌ها و بررسی چگونگی تغییرات مقادیر هر دو نسبت ناهمسانی ساختار بافتی و ناهمسانی

فرضیه همسانگردی عرضی

فرایند رسوب‌گذاری طبیعی ذرات خاک معمولاً منجر به شکل‌گیری نهشته‌های ناهمسانی می‌شوند که می‌توانند نسبت به سطح بستر رسوبگذاری به صورت همسانگرد عرضی فرض شوند. از همین رو، یکی از مفروضات اصلی مورد نظر در این مطالعه وجود فرضیه همسانگردی عرضی در خاک‌های ماسه‌ای می‌باشد. این فرضیه یک پنداشت کاملاً معتبر است که در عمل به گستردگی در ارزیابی خصوصیات مهندسی برای انواع خاک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (Clayton, 2011; Fioravante et al., 2013; Pegah et al., 2022). در مدل همسانگرد عرضی سطح بستر خاک که معمولاً افقی در نظر گرفته می‌شود، صفحه‌ای همسانگرد می‌باشد که دربرگیرنده محورهای متعام x و y است. در این صفحه خصوصیات مکانیکی خاک در کلیه جهات یکسان بوده و مستقل از راستای اندازه‌گیری می‌باشند. این در حالیست که خصوصیات اندازه‌گیری شده در راستای قائم بر صفحه α - γ که با محور z نشان داده می‌شود، مقادیری متفاوت را ارائه می‌دهند که بیانگر رفتار ناهمسان خاک در صفحات افقی و قائم است. صفحه افقی x - y را به عنوان صفحه همسانگردی با محور تقارن z که به عنوان محور ناهمسانی معرفی می‌شود در نظر می‌گیرند. بر طبق اصول ارائه شده در نظریه کشسانی، روابط مشخصه تنش-کرنش در یک توده خاک همسانگردی عرضی را می‌توان با استفاده از قانون عمومی هوک و بر مبنای هفت ضریب کشسانی مختلف به صورت رابطه (۱) نشان داد (Pegah et al., 2021):

$$\begin{bmatrix} \Delta \varepsilon_x \\ \Delta \varepsilon_y \\ \Delta \varepsilon_z \\ \Delta \gamma_{xy} \\ \Delta \gamma_{yz} \\ \Delta \gamma_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_h} & \frac{-\nu_{hh}}{E_h} & \frac{-\nu_{vh}}{E_v} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{hh}}{E_h} & \frac{1}{E_h} & \frac{-\nu_{vh}}{E_v} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{hv}}{E_h} & \frac{-\nu_{vh}}{E_h} & \frac{1}{E_v} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{hh}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{hv}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{vh}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \sigma_x \\ \Delta \sigma_y \\ \Delta \sigma_z \\ \Delta \tau_{xy} \\ \Delta \tau_{yz} \\ \Delta \tau_{zx} \end{bmatrix} \quad (1)$$

که در این رابطه E_h و E_v به ترتیب بیانگر مدول‌های یانگ در جهات قائم و افقی بوده؛ و ν_{hh} ، ν_{hv} ، ν_{vh} نشان دهنده نسبت‌های پواسون به صورت ν_{ij} برای بارگذاری اعمال شده در جهت i و تغییر شکل وابسته به

آن در جهت j می‌باشند. علاوه بر این، G_{vh} (یا G_{hv}) و G_{hh} نیز به ترتیب بیان‌کننده مدول‌های برشی در صفحات قائم و افقی خاک می‌باشند. متغیرهای $\Delta \varepsilon_x$ ، $\Delta \varepsilon_y$ و $\Delta \varepsilon_z$ نیز نشان دهنده تغییرات کرنش‌های نرمال متناسب با تغییرات تنش‌های نرمال $\Delta \sigma_x$ ، $\Delta \sigma_y$ و $\Delta \sigma_z$ ؛ و متغیرهای $\Delta \gamma_{xy}$ ، $\Delta \gamma_{yz}$ و $\Delta \gamma_{zx}$ بیان‌کننده تغییرات کرنش‌های برشی در مقابل تنش‌های برشی $\Delta \tau_{xy}$ ، $\Delta \tau_{yz}$ و $\Delta \tau_{zx}$ هستند. این هفت پارامتر الاستیک بر مبنای معادلات (۲)، (۳) و (۴) که برگرفته از نظریه کشسانی می‌باشند با یکدیگر در ارتباط هستند به طوری که تنها پنج عدد از آنها در عمل مستقل می‌باشند:

$$G_{vh} = G_{hv} \quad (2)$$

$$\frac{\nu_{vh}}{E_v} = \frac{\nu_{hv}}{E_h} \quad (3)$$

$$G_{hh} = \frac{E_h}{2(1+\nu_{hh})} \quad (4)$$

روش محاسبه نسبت ناهمسانی ساختار بافتی از مدول‌های برشی

برای به‌دست آوردن درجه ناهمسانی ساختار بافتی در ماسه‌ها، در این مطالعه از یک رابطه تجربی معتبر متناسب به مدل تنش منفصل استفاده شده است. این رابطه، مولفه‌های ناهمسان مدول برشی را که به نوبه خود از سرعتهای امواج S محاسبه می‌شوند به تنش‌های موثر اصلی واقع در جهت‌های انتشار و ارتعاش موج مرتبط می‌کند (معادلات ۵ و ۶). لازم به ذکر است که مدل تنش منفصل یک مدل دقیق و بسیار محبوب بوده که به گستردگی در کاربردهای مرتبط با ارزیابی مقادیر سختی برشی توسط محققین استفاده می‌شود (Ku and Mayne, 2013a; Ku et al., 2017).

$$G_{vh} = A_{vh} F(e) P_a \left(\frac{\sigma'_v \sigma'_h}{P_a^2} \right)^{n_{vh}} \quad (5)$$

$$G_{hh} = A_{hh} F(e) P_a \left[\left(\frac{\sigma'_h}{P_a} \right)^2 \right]^{n_{hh}} \quad (6)$$

در این روابط، ثابت‌های A_{vh} و A_{hh} به ترتیب مولفه‌های ناهمسان ساختار بافتی خاک در صفحات قائم و افقی می‌باشند. عبارت $F(e)$ نیز تابع نسبت تخلخل است و P_a فشار مرجع (۱۰۰ kPa) می‌باشد. همچنین، ثابت‌های n_{hh} و n_{vh} نیز به ترتیب توان‌های وابسته به تنش‌های متناظر σ'_h و σ'_v هستند. با یک دست‌کاری ساده می‌توان معادلات فوق را مطابق با آنچه که در زیر نشان داده شده است ارائه نمود:

$$\frac{G_{vh}}{F(e) P_a} = A_{vh} \left[\frac{\sigma'_v \sigma'_h}{P_a^2} \right]^{n_{vh}} \quad (7)$$

$$\frac{G_{hh}}{F(e) P_a} = A_{hh} \left[\left(\frac{\sigma'_h}{P_a} \right)^2 \right]^{n_{hh}} \quad (8)$$

با اعمال یک سری گسترده از تحلیل‌های رگرسیونی بر روی داده‌های مدول‌های برشی ناهمسان در مقابل حالت تنش متناظر، مؤلفه‌های ناهمسانی ساختار بافتی تعیین می‌شود. به عبارتی دیگر، با اعمال تحلیل رگرسیون ساده بر روی نقاط داده زوج $\left(\frac{G_{vh}}{F(e) P_a} - \frac{\sigma'_v \sigma'_h}{P_a^2} \right)$ و $\left(\frac{G_{hh}}{F(e) P_a} - \left(\frac{\sigma'_h}{P_a} \right)^2 \right)$ از معادلات (7) و (8)، می‌توان مؤلفه‌های افقی و قائم ناهمسانی ساختار بافتی را محاسبه نمود و به دنبال آن، نسبت این کمیت (A_{hh}/A_{vh}) را برای هریک از نمونه خاک‌ها بدست آورد.

یکی از فرضیات در نظر گرفته شده در انجام این پژوهش، محاسبه مؤلفه‌های ناهمسان ساختار بافتی خاک تحت شرایطی می‌باشد که در آن نسبت تنش اصلی حداکثر به تنش اصلی حداقل خیلی بزرگ نیست. این فرض تضمین‌کننده پایستگی و عدم تغییر شکل فاحش در ساختار بافتی خاک به هنگام بارگذاری و تحت شرایط متنوعی از تنش اعمال شده می‌باشد (Baxter and Sharma, 2012; Styler and Howie, 2014). در نهایت، با تکیه بر این فرض که به نوبه خود بر حفظ رابطه توانی با حالت تنش و اصل عدم ورود خاک به فاز اتساع استوار می‌باشد (Pegah and Liu, 2020a)، می‌توان مؤلفه‌های ناهمسان ساختار بافتی را به طور کاملاً صحیح و با حداقل میزان از خطا و عدم قطعیت اندازه‌گیری نمود.

اعمال رویکرد ارائه شده بر روی ماسه‌ها

تولید پایگاه داده‌ای از خواص کشسان همسانگرد عرضی و پارامترهای دانه‌بندی و مشخصات ظاهری دانه‌ها

به منظور محاسبه مؤلفه‌های ناهمسانی ساختار بافتی، شناسایی محدوده تغییرات نسبت آن در ماسه‌ها و ارزیابی وابستگی آن به خصوصیات ظاهری خاک، اطلاعات ۲۸ نوع ماسه منتسب به مکان‌های گوناگون در دنیا از متون و مقالات معتبر گردآوری شدند. با فرض وجود همسانگردی عرضی در محیط خاک، یک سری گسترده از داده‌های مورد نیاز نظیر مقادیر پارامترهای کشسانی ناهمسان در صفحات عمودی و افقی شامل مدول‌های یانگ (E'_h, E'_v) ، مدول‌های برشی (G_{hh}, G_{vh}) و نسبت‌های

پواسون (ν'_{hh}, ν'_{vh}) ، مؤلفه‌های تنش درجا $(\sigma'_c, \sigma'_v, \sigma'_h)$ ، نسبت تخلخل (e) و تابع نسبت تخلخل $(F(e))$ در خاک‌های ماسه‌ای از مقالات مختلف گردآوری گشته‌اند. این داده‌ها سپس با اطلاعات خواص دانه‌بندی، شکل و وزن ذرات خاک ترکیب شده‌اند تا پایگاه داده کاملی جهت نیل به اهداف مورد نظر ایجاد گردد.

بلوتی و همکاران (Bellotti et al., 1996) با فرض همسانگرد عرضی در خاک‌های ماسه‌ای و به منظور تعیین ثابت‌های کشسانی، آزمایشات لرزه‌ای جامعی را در یک محفظه کالیبراسیون بزرگ بر روی نمونه خاک‌های خشک ماسه سیلیکاته تیسینو انجام دادند. با استفاده از سرعت‌های بدست آمده برای چهار مقدار متفاوت از نسبت تنش تحکیم و جایگذاری آنها در معادلات حاصل از نظریه کشسانی، پنج ثابت کشسانی مستقل برای این ماسه محاسبه شدند. در اقدامی مشابه، فیوراوانته و همکاران (Fioravante et al., 2013) نیز نتایج یک سری از آزمایشات لرزه‌ای صورت گرفته در یک محفظه کالیبراسیون بزرگ بر روی ماسه کرناتاه کنیا را منتشر ساختند. با استفاده از مقادیر سرعت لرزه‌ای اندازه‌گیری شده، کلیه پارامترهای کشسانی تعیین شده و ضمن تایید فرضیه همسانگردی عرضی اثر ساختار بافتی خاک بر روی سرعت‌های امواج لرزه‌ای نیز مورد بحث قرار گرفت. در تلاشی دیگر گو و همکاران (Gu et al., 2017) با بیان اهمیت ناهمسانی کشسانی در خاک‌های دانه‌ای، یک سری از آزمایشات عددی را با استفاده از روش المان گسسته (DEM) انجام دادند، آنها ضمن اندازه‌گیری ضرایب کشسانی در جهات و صفحات مختلف، تغییرات در ساختار بافتی خاک را بررسی کرده و تلاش نمودند تا خواص کشسانی را به ساختار بافتی خاک پیوند دهند. به همین ترتیب، داده‌های حاصل از ۴۷ آزمون لرزه‌ای انجام شده بر روی هفت نمونه مختلف از سه خاک متفاوت توسط پگاه و همکاران (Pegah et al., 2022) منتشر شد. آنها با تاکید بر اهمیت پارامترهای کشسانی ناهمسانگرد در تجزیه و تحلیل بسیاری از مسائل مرتبط با علوم زمین، ضمن تشریح مدل همسانگرد عرضی در ماسه‌ها و تاکید بر اثر نامطلوب دستخوردگی در ساختار بافتی خاک در حین فرآیند نمونه‌برداری، به ارائه یک استراتژی جدید برای محاسبه ثابت‌های کشسانی بواسطه استفاده از روش‌های غیرمخرب لرزه‌ای پرداختند.

انجام شده توسط ایزویی و بنیدیتو (Ezaoui and Benedetto, 2009) با فرض رفتار همسانگرد عرضی در ماسه، اندازه‌گیری‌های استاتیکی و دینامیکی امکان توصیف پارامترهای کشسانی خاک را در سطوح مختلف تنش در طول آزمایش فراهم نموده است. آنها مجموعه‌ای از آزمایش‌های سه‌محوری زهکشی شده را با یک دستگاه سه محوری جدید و دقیق که از هر دو سیستم استاتیک و دینامیک استفاده می‌کند بر روی ماسه هوستون خشک جهت ارزیابی ویژگی‌های کشسانی ناهمسان در طول آزمایش و تاثیر آماده‌سازی نمونه، انجام دادند. سه روش (P, P+V, P+T) برای بازسازی نمونه در نظر گرفته شده بود که برای هر روش دو نوع آزمایش فشرده‌سازی سه محوری (TC) و گسترش سه محوری (TE) انجام شده است. آن‌ها دریافتند که مدول‌های کشسانی در هر جهت، بیشتر به تابعی از تنش در آن جهت بستگی دارند.

شی و همکاران (Shi et al., 2021) به بررسی اثرات روش آماده سازی نمونه، ویژگی‌های ذرات و دانه‌بندی بر ناهمسانی سختی در طیف نسبتاً گسترده‌ای از ماسه‌ها پرداختند. برای این منظور، آنها در ابتدا موده‌های ناهمسان مدول برشی را برای نمونه‌های متنوعی از هفت نوع ماسه مختلف، با استفاده از آزمایش المان خمشی اندازه‌گیری کردند. این آزمایش برای نمونه‌های در یک سلول سه محوری و تحت شرایط تنش همسانگرد انجام گرفت. در ادامه درجه ناهمسانی برشی در شماری از حالات تنش منتخب برای هر نمونه محاسبه گردید و تفاوت‌های ناشی از روش آماده‌سازی نمونه مورد بحث قرار گرفتند. همچنین در تلاشی مضاعف تاثیر اندازه و شکل دانه‌های خاک و همچنین چگونگی توزیع آنها بر درجه ناهمسانی برشی نشان داده شد. علاوه بر این دوتا و همکاران (Dutta et al., 2020) با ارائه یک آرایش جدید از مبدل‌های پیزوالکتریک مسطح افقی و عمودی به توصیف ناهمسانی سختی چهار نوع خاک دانه‌ای پرداختند. بر اساس بررسی‌های

جدول ۱- برخی از پارامترهای مرتبط با خصوصیات کشسانی، تنش متناظر و نسبت تخلخل در ماسه تسینو

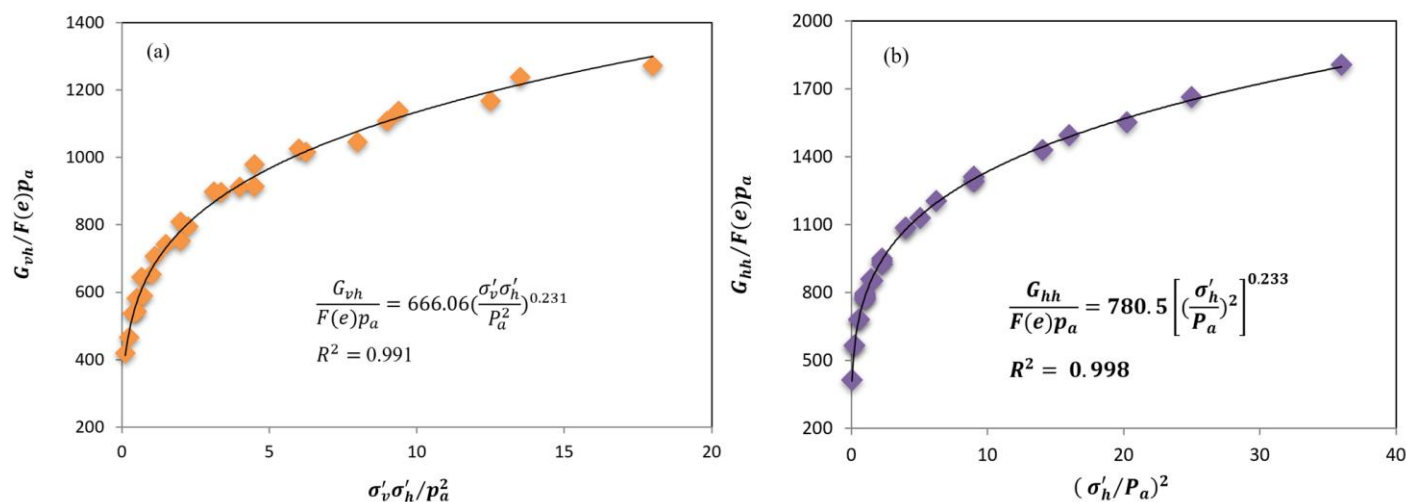
Table 1. Some parameters related to elastic properties, corresponding stress and void ratio in Ticino sand

| Soil type | σ'_v (Kpa) | σ'_h (Kpa) | G_{hh} (Mpa) | G_{vh} (MPa) | E'_v (Mpa) | E'_h (Mpa) | e | $F(e)$ |
|-------------|-------------------|-------------------|----------------|----------------|--------------|--------------|-------|--------|
| Ticino sand | 50 | 25 | 56.1 | 57.0 | 160.3 | 133.8 | 0.790 | 1.359 |
| | 100 | 50 | 77.1 | 79.5 | 225.0 | 184.1 | 0.787 | 1.364 |
| | 150 | 75 | 92.9 | 96.8 | 274.6 | 222.0 | 0.785 | 1.370 |
| | 200 | 100 | 106.1 | 111.2 | 316.2 | 253.7 | 0.783 | 1.375 |
| | 250 | 125 | 117.6 | 124.0 | 353.1 | 281.4 | 0.780 | 1.381 |
| | 300 | 150 | 127.8 | 135.4 | 386.6 | 306.2 | 0.779 | 1.383 |
| | 50 | 50 | 76.8 | 63.2 | 146.1 | 177.6 | 0.791 | 1.356 |
| | 100 | 100 | 106.9 | 88.9 | 204.7 | 248.8 | 0.789 | 1.362 |
| | 150 | 150 | 129.8 | 108.6 | 250.0 | 303.5 | 0.786 | 1.367 |
| | 200 | 200 | 149.1 | 125.2 | 287.9 | 349.4 | 0.784 | 1.373 |
| | 250 | 250 | 166.0 | 139.9 | 321.4 | 790.0 | 0.781 | 1.378 |
| | 300 | 300 | 181.3 | 153.2 | 351.4 | 426.5 | 0.779 | 1.383 |
| | 50 | 75 | 92.6 | 73.1 | 137.8 | 214.7 | 0.789 | 1.362 |
| | 67 | 100 | 106.1 | 87.9 | 160.2 | 247.8 | 0.787 | 1.364 |
| | 100 | 150 | 128.7 | 102.0 | 198.8 | 304.1 | 0.784 | 1.373 |
| | 150 | 225 | 156.0 | 123.9 | 245.9 | 372.5 | 0.780 | 1.381 |
| | 200 | 300 | 178.8 | 142.3 | 285.8 | 429.9 | 0.778 | 1.386 |
| | 250 | 375 | 198.8 | 158.4 | 321.5 | 480.8 | 0.776 | 1.392 |
| | 300 | 450 | 216.9 | 173.0 | 353.5 | 526.6 | 0.773 | 1.397 |
| | 50 | 100 | 108.8 | 74.4 | 132.9 | 253.1 | 0.785 | 1.370 |
| 60 | 120 | 118.5 | 81.3 | 145.3 | 276.1 | 0.780 | 1.381 | |
| 100 | 200 | 150.9 | 104.4 | 188.5 | 353.8 | 0.777 | 1.389 | |
| 150 | 300 | 182.9 | 127.4 | 231.8 | 430.7 | 0.774 | 1.394 | |
| 200 | 400 | 209.6 | 146.6 | 268.1 | 495.0 | 0.771 | 1.402 | |
| 250 | 500 | 233.2 | 163.7 | 301.3 | 552.6 | 0.771 | 1.402 | |
| 300 | 600 | 254.3 | 179.1 | 330.2 | 603.6 | 0.769 | 1.408 | |

به منظور محاسبه درجه ناهمسانی ساختار بافتی ماسه‌های 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. با انجام تحلیل رگرسیون ساده بر روی زوج داده‌های $\left(\frac{G_{vh}}{F(e)p_a} - \frac{\sigma'_v \sigma'_h}{p_a^2} \right)$ و $\left(\frac{G_{hh}}{F(e)p_a} - \left(\frac{\sigma'_h}{p_a} \right)^2 \right)$ از معادلات (۷) و (۸) مؤلفه‌های افقی و قائم ناهمسانی ساختار بافتی تعیین می‌گردد. سپس با به‌کارگیری این مقادیر، نسبت A_{hh}/A_{vh} در ماسه‌ها قابل محاسبه خواهد بود. برای مثال در شکل‌های ۳-۳ و ۳-۳ روند محاسبه مولفه‌های A_{vh} و A_{hh} برای ماسه تسینو به صورت ترسیمی نشان داده شده است. ضرایب تعیین حاصل از هر دو تحلیل رگرسیون، $R^2 \approx 1$ برای $N = 26$ نقطه داده سهیم در برازش منحنی، بیان‌کننده دقت بالای همبستگی می‌باشد.

در مجموع، یک پایگاه داده جامعی از نتایج حاصل از اجرای بیش از ۴۰۰ آزمون لرزه‌ای تحت شرایط تنش متفاوت بر روی ۲۸ نمونه‌ی گوناگون از ۱۷ نوع ماسه خشک یا اشباع از سراسر دنیا ایجاد گردید. برای مثال، اطلاعات مربوط به شرایط بارگذاری، مقادیر ثابت‌های برشی کشسان، مدول‌های یانگ، نسبت تخلخل و مقادیر تابع نسبت تخلخل برای ماسه تسینو در جدول ۱ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که تابع نسبت تخلخل برای ماسه سیلیکاته تسینو به صورت رابطه $F(e) = e^{-1.3}$ بیان شده است (Bellotti et al., 1996).

تعیین نسبت ناهمسانی ساختار بافتی در ماسه‌های مورد بررسی



شکل ۳- فرایند محاسبه مولفه‌های ناهمسانی ساختار بافتی خاک در ماسه تسینو: (a) برازش منحنی بر روی زوج داده $\left(\frac{G_{vh}}{F(e)p_a} - \frac{\sigma'_v \sigma'_h}{p_a^2} \right)$ برای بدست آوردن A_{vh} (b) برازش منحنی بر روی زوج داده $\left(\frac{G_{hh}}{F(e)p_a} - \left(\frac{\sigma'_h}{p_a} \right)^2 \right)$ جهت محاسبه A_{hh}

Fig 3. The process of calculating the fabric anisotropy components of soil in Ticino sand: a) Curve fitting on the data pair $\left(\frac{G_{vh}}{F(e)p_a} - \frac{\sigma'_v \sigma'_h}{p_a^2} \right)$ for extraction of A_{vh} b) Curve fitting on the data pair $\left(\frac{G_{hh}}{F(e)p_a} - \left(\frac{\sigma'_h}{p_a} \right)^2 \right)$ for extraction of A_{hh}

تعداد کمی از آنها، به دلیل محدودیت‌هایی نظیر انجام آزمایش در شرایط تنش همسانگرد، امکان برازش یک تابع توانی بر داده‌های مربوطه برای محاسبه مقادیر A_{hh}/A_{vh} مقدور نبوده است. در چنین شرایطی

برای ایجاد یک پایگاه داده از خصوصیات ساختار بافتی ماسه‌ها، مقادیر بدست آمده A_{hh}/A_{vh} برای تمامی خاک‌های ارزیابی شده در این مطالعه، در ستون سوم جدول ۲ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که برای

می‌توان به حضور ذرات بیشتر که با محور طولانی‌تر خود، در جهت افقی رسوب‌گذاری کرده‌اند ربط داد که سبب حرکت سریع‌تر امواج الاستیک در جهت افقی و ایجاد بافت قوی‌تر در این راستا می‌گردند (Dutta et al., 2020).

نسبت‌های A_{hh}/A_{vh} برابر میانگین نسبت‌های $\frac{G_{hh}}{G_{vh}}$ در نظر گرفته شده است. با توجه به بیشتر از واحد بودن کسر A_{hh}/A_{vh} می‌توان این‌گونه استنباط کرد که در اکثر نمونه‌های ذکر شده، مقدار ناهمسانی ساختار بافتی در صفحه افقی بیشتر از اندازه آن در صفحه قائم می‌باشد. دلیل این امر را

جدول ۲- مقادیر نسبت ناهمسانی ساختار بافتی (A_{hh}/A_{vh}) همراه با ویژگی‌های دانه‌بندی، شکل و وزن ذرات خاک‌های مطالعه شده در این پژوهش.

Table 2. The values of the fabric anisotropy ratio (A_{hh}/A_{vh}) along with the characteristics of grading, shape and weight of the soil particles studied in this research.

| Soil type | Specimen/Test | A_{hh}/A_{vh} | C_u | C_c | G_s | D_{10} (mm) | D_{50} (mm) | D_{max} (mm) | S | Reference |
|----------------|-------------------|-----------------|-------|-------|-------|---------------|---------------|----------------|-------|-------------------------|
| Kenya sand | Tx CI P14 | 1.140 | 1.860 | 0.829 | 2.785 | 0.085 | 0.130 | 0.486 | N/A | Fioravante et al., 2013 |
| | KS - K =0.5 | | | | | | | | | |
| | KS - K =1.0 | | | | | | | | | |
| | KS - K =2.0 | | | | | | | | | |
| Ham river sand | H304 | 1.065 | 1.670 | 0.990 | 2.657 | 0.178 | 0.270 | 0.597 | 0.705 | Pegah et al., 2022 |
| | H935 | | | | | | | | | |
| | H601 | | | | | | | | | |
| | H385 | | | | | | | | | |
| Dunkerque sand | D902 | 1.316 | 1.821 | 0.910 | 2.652 | 0.163 | 0.270 | 1.935 | N/A | Dutta et al., 2020 |
| | D903 | | | | | | | | | |
| GB | G911& G912 | 0.984 | 1.284 | 1.03 | 2.950 | 0.220 | 0.270 | 0.41 | 1.000 | Bellotti et al., 1996 |
| | G922 | 1.011 | 1.629 | 0.970 | 2.950 | 0.104 | 0.144 | 0.247 | 1.000 | |
| | GB | 1.27 | 1.140 | 1.030 | 2.510 | 1.612 | 1.800 | 2.245 | 1.000 | |
| Ticino sand | 390 | 1.170 | 1.583 | 0.939 | 2.69 | 0.402 | 0.549 | 0.851 | 0.732 | Shi et al., 2021 |
| | 383 | | | | | | | | | |
| | 384 | | | | | | | | | |
| | 385 | | | | | | | | | |
| S1 sand | DT | 1.548 | 3.892 | 1.293 | 2.81 | 0.191 | 0.602 | 3.960 | 0.454 | |
| | DF | 1.368 | 3.892 | 1.293 | 2.81 | 0.191 | 0.602 | 3.960 | 0.454 | |
| | AP | 1.917 | 3.892 | 1.293 | 2.81 | 0.191 | 0.602 | 3.960 | 0.454 | |
| | WP | 1.510 | 3.892 | 1.293 | 2.81 | 0.191 | 0.602 | 3.960 | 0.454 | |
| | MT | 1.583 | 3.892 | 1.293 | 2.81 | 0.191 | 0.602 | 3.960 | 0.454 | |
| Mol sand | DT | 1.141 | 1.550 | 1.041 | 2.64 | 0.130 | 0.179 | 0.463 | 0.635 | |
| | DF | 1.113 | 1.550 | 1.041 | 2.64 | 0.130 | 0.179 | 0.463 | 0.635 | |
| | AP | 1.180 | 1.550 | 1.041 | 2.64 | 0.130 | 0.179 | 0.463 | 0.635 | |
| | WP | 1.169 | 1.550 | 1.041 | 2.64 | 0.130 | 0.179 | 0.463 | 0.635 | |
| | MT | 1.047 | 1.550 | 1.041 | 2.64 | 0.130 | 0.179 | 0.463 | 0.635 | |
| SMol sand | AP | 1.299 | 1.550 | 1.041 | 2.81 | 0.130 | 0.179 | 0.463 | 0.485 | |
| SD1 sand | AP | 1.535 | 1.550 | 0.850 | 2.81 | 0.270 | 0.354 | 1.202 | 0.472 | |
| SD2 sand | AP | 1.734 | 1.550 | 0.880 | 2.81 | 0.550 | 0.709 | 2.440 | 0.445 | |
| SCU1 sand | AP | 1.640 | 1.705 | 1.015 | 2.81 | 0.390 | 0.643 | 1.930 | 0.451 | |
| SCU2 sand | AP | 1.595 | 7.756 | 0.932 | 2.81 | 0.113 | 0.643 | 4.278 | 0.456 | |
| Toyoura sand | simulation by DEM | 1.04 | 1.415 | 1.022 | 2.6 | 0.244 | 0.322 | 0.440 | 1.000 | Gu et al., 2017 |

| | | | | | | | | | | |
|--------------------|--------------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|----------------------------|
| Hostun sand | P | 1.185 | 1.422 | 1.062 | 2.65 | 0.260 | 0.350 | 0.902 | 0.723 | Ezaoui and Benedetto, 2009 |
| | P+V | 1.204 | 1.422 | 1.064 | 2.65 | 0.260 | 0.350 | 0.902 | 0.723 | |
| | P+T | 1.126 | 1.422 | 1.061 | 2.65 | 0.260 | 0.350 | 0.902 | 0.723 | |
| Toyoura sand | Toyoura sand | 1.22 | 1.360 | 0.258 | 2.64 | 0.213 | 0.240 | 0.360 | 0.743 | Dutta et al., 2020 |
| Kashima river sand | RS | 1.36 | 1.253 | 0.967 | 2.62 | 1.510 | 1.720 | 2.247 | N/A | |

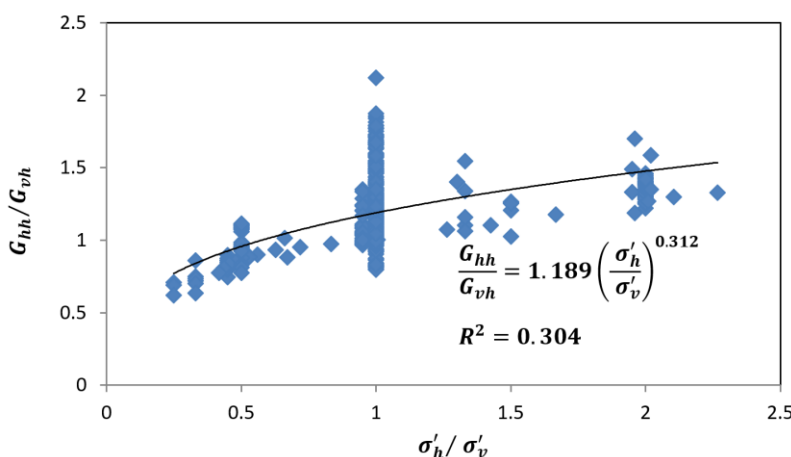
سنجش وابستگی ناهمسانی مدول برشی به نسبت تنش

ناهمسانی سختی در ماسه‌ها به دلیل فرایند رسوب‌گذاری و حالت تنش ناهمسان ایجاد می‌گردد. از نسبت سختی برشی الاستیک ($\frac{G_{hh}}{G_{vh}}$) بطور کلی بعنوان درجه ناهمسانی سختی نام برده می‌شود. به منظور تجزیه و تحلیل ویژگی‌های تغییرپذیری ناهمسانی سختی در ماسه‌ها، نسبت $\frac{G_{hh}}{G_{vh}}$ به عنوان تابعی از نسبت تنش $\frac{\sigma'_h}{\sigma'_v}$ در طیف متنوعی از انواع ماسه‌های پژوهش شده در این مطالعه با تعداد ۴۱۹ داده‌ی سهیم در شکل ۴ ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که ازای نسبت‌های تنش متناظر در بازه ۰/۲۴ تا ۲/۵ نسبت‌های مدول برشی با افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقدار آن روبرو خواهند

شد به طوری که با صعودی نسبتاً خوب، مقادیری را در گستره ۰/۷۵ تا ۱/۵۴ نشان داده است. به‌طور کلی با افزایش نسبت تنش، $\frac{G_{hh}}{G_{vh}}$ نیز روند صعودی خواهد داشت. ارتباط این دو نسبت را می‌توان به صورت معادله (۹) بیان نمود:

$$\frac{G_{hh}}{G_{vh}} = 1.189 \left(\frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} \right)^{0.312} \quad (9)$$

با توجه به ضریب تعیین $R^2 \approx 0.32$ می‌توان فقط ۳۲٪ از ناهمسانی برشی را به تغییرات نسبت تنش ($\frac{\sigma'_h}{\sigma'_v}$) بر روی یک توده خاک نسبت داد. در حالی که ۶۸٪ مابقی می‌تواند ناشی از سایر عوامل نظیر خواص ناهمسانی ساختار بافتی خاک باشد.



شکل ۴- نمایش رابطه بین ناهمسانی سختی برشی $\frac{G_{hh}}{G_{vh}}$ و ناهمسانگردی تنش $\frac{\sigma'_h}{\sigma'_v}$ در ماسه‌های مختلف

Fig 4. Showing the relationship between shear stiffness anisotropy ($\frac{G_{hh}}{G_{vh}}$) and stress anisotropy ($\frac{\sigma'_h}{\sigma'_v}$) in different sands

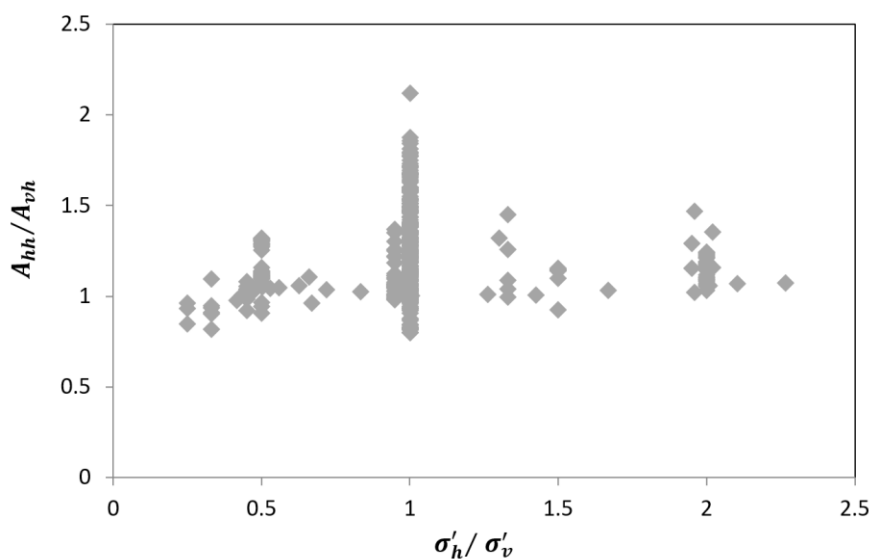
در مقابل تغییرات نسبت تنش ترسیم نمود. شکل ۵ نسبت ناهمسانی ساختار بافتی بر حسب تنش متناظر برای تمامی ۲۸ نمونه از ۱۷ نوع ماسه پژوهش شده در این تحقیق با تعداد ۴۱۹ نقطه‌ی داده را نشان می‌دهد. روند تغییرات

سنجش وابستگی نسبت ناهمسانی ساختار بافتی به نسبت تنش

با در اختیار داشتن مقادیر (σ'_h/σ'_v) و (A_{hh}/A_{vh}) برای هر یک از خاک‌های ماسه‌ای، می‌توان بازه تغییرات نسبت ناهمسانی ساختار بافتی را

مختلف بازگو کننده تغییرات حاصل در ساختار اسکلت خاک تحت بارهای اعمالی است. باید توجه نمود که در شرایط تنش همسان یعنی جایی که $\frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} = 1$ ، بنابر عدم تاثیر تنش اعمالی، مقدار نسبت ناهمسانی ساختار بافتی منحصراً نشان دهنده این ساختار در حالت طبیعی (ذاتی) می‌باشد.

با افزایش نسبت تنش از ۰/۲۴ تا ۲/۵ بسیار جزئی بوده است، به طوری که در عمل می‌توان از میزان حساسیت نسبت ناهمسانی ساختار بافتی خاک در مقابل تنش تحکیم در بازه ذکر شده چشم‌پوشی کرد. این نتیجه با مشاهدات تجربی کووانو و جاردین (Kuwanno and Jardin, 2002) و گو و همکاران (Gu et al., 2013, 2022, 2017) سازگار می‌باشد. از آنجایی که هدف، یافتن الگوی نرخ تغییرات ناهمسانی ساختار بافتی بر حسب نسبت تنش می‌باشد؛ لذا میزان تغییرات این نسبت در شرایط تنش



شکل ۵- رابطه بین نسبت ناهمسانی ساختار بافتی $\frac{A_{hh}}{A_{vh}}$ و نسبت تنش $\frac{\sigma'_h}{\sigma'_v}$ در ماسه‌های مختلف

Fig 5. Relationship between fabric anisotropy ratio ($\frac{A_{hh}}{A_{vh}}$) and stress anisotropy ($\frac{\sigma'_h}{\sigma'_v}$) in different sands

تحلیل داده‌ها و نتایج به‌دست آمده

از مهمترین اهداف مورد پیگیری در این مطالعه، ارزیابی وابستگی نسبت ناهمسانی ساختار بافتی به خصوصیات دانه‌بندی و شکل ذرات خاک، و ارائه روابطی سودمند برای نسبت ناهمسانی ساختار بافتی بر حسب این ویژگی‌ها می‌باشد تا زین پس محاسبه نسبت ناهمسانی برشی بر مبنای یک راهبرد صحیح، سریع و مقرون به صرفه انجام پذیرد. برای این منظور، در گام نخست اطلاعات جمع‌آوری شده مربوط به خواص ذکر شده در ماسه‌ها، شامل

ضرایب یکنواختی (C_u) و دانه‌بندی (C_c) ذرات خاک، چگالی ویژه دانه‌ها (G_s)، اندازه موثر (D_{10})، اندازه میانی (D_{50}) و اندازه بیشینه (D_{max}) دانه‌ها و کرویت (S) از مقالات معتبر بین‌المللی در ستون‌های ۴ تا ۱۰ جدول ۲ درج گردیدند. در ادامه با انجام تحلیل رگرسیون ساده و چندگانه خطی به روی نسبت ناهمسانی ساختار بافتی خاک در مقابل پارامترهای دانه‌بندی و مشخصات دانه‌ها، همبستگی بین آنها بررسی می‌شود.

سنجش وابستگی نسبت ناهمسانی ساختار بافتی به پارامترهای دانه‌بندی

جهت بررسی روابط احتمالی بین A_{hh}/A_{vh} و پارامترهای منتسب به دانه‌بندی خاک شامل ابعاد دانه‌ها (D_{10}, D_{50}, D_{max}) و ضرایب یکنواختی (G_u) و دانه‌بندی (C_c) ذرات خاک، تحلیل رگرسیون ساده انجام شده است. مدل‌های (۱۰) تا (۱۴) از برازش منحنی بین متغیرهای ذکر شده منتج شده است. با توجه به ضرایب تعیین داده شده، می‌توان به میزان همبستگی بین پارامترهای دانه‌بندی و نسبت ناهمسانی ساختار بافتی خاک پی برد. از برازش منحنی بر روی زوج داده‌های " $A_{hh}/A_{vh} - C_c$ " و " $A_{hh}/A_{vh} - C_u$ " روابط (۱۰) و (۱۱) منتج شده‌اند. مشاهده می‌شود که با تغییر بزرگی C_c اندازه‌ی نسبت A_{hh}/A_{vh} تغییر محسوسی نداشته است در حالی که با افزایش مقدار C_u نسبت ناهمسانی ساختار بافتی خاک، با شیب ملایمی افزایش می‌یابد.

$$\frac{A_{hh}}{A_{vh}} = 1.309C_c^{0.229} ; R^2 = 0.033, N = 28 \quad (10)$$

$$\frac{A_{hh}}{A_{vh}} = 1.211C_u^{0.133} ; R^2 = 0.153, N = 28 \quad (11)$$

به سبکی مشابه اجرای تحلیل رگرسیون بر روی تغییرات A_{hh}/A_{vh} در مقابل ابعاد دانه‌ها (D_{10}, D_{50}, D_{max}) منجر به ایجاد روابط (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) شده است.

$$\frac{A_{hh}}{A_{vh}} = 1.329D_{10}^{0.005} ; R^2 = 0.001, N = 28 \quad (12)$$

$$\frac{A_{hh}}{A_{vh}} = 1.396D_{50}^{0.057} ; R^2 = 0.059, N = 28 \quad (13)$$

$$\frac{A_{hh}}{A_{vh}} = 1.309D_{max}^{0.079} ; R^2 = 0.225, N = 28 \quad (14)$$

اگر چه تأثیر D_{50} بر روی درجه ناهمسانی ساختار بافتی خاک، اندکی بیشتر از اثر D_{10} مشاهده شده است ولی مقدار ضریب تعیین R^2 ، برای هر دوی این کمیت‌ها به حدی کوچک و ناچیز است که می‌توان تأثیر این دو را

برنسبت ناهمسانی ساختار بافتی خاک نادیده گرفت. به عبارتی دیگر، پیش‌بینی می‌شود که نسبت ناهمسانی ساختار بافتی تحت تأثیر اندازه‌ی مؤثر و متوسط دانه‌ها قرار نمی‌گیرد. درحالی‌که اثر D_{max} روی نسبت ناهمسانی ساختار بافتی خاک در مقایسه با دو ابعاد دیگر ذکر شده با ضریب تعیین ۰/۲۲، همبستگی نسبتاً معناداری را بین این دو متغیر نشان می‌دهد.

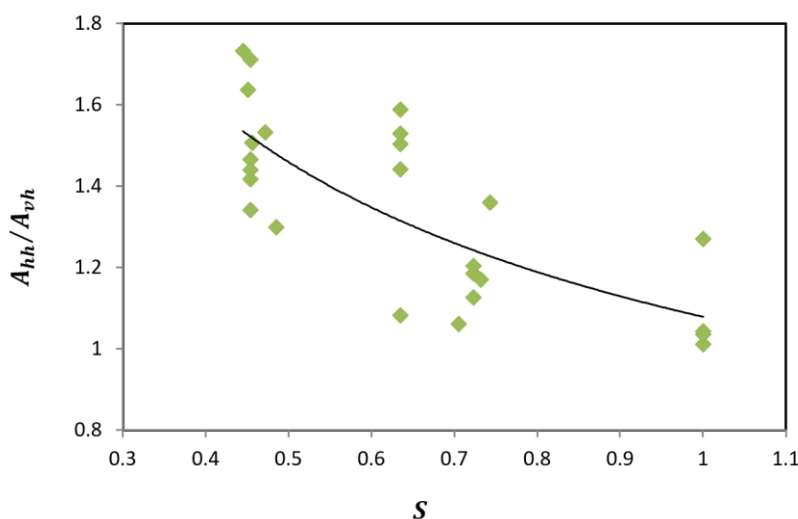
سنجش وابستگی نسبت ناهمسانی ساختار بافتی به شکل و وزن ذرات

به منظور شناسایی رابطه بین A_{hh}/A_{vh} و مشخصات منتسب به شکل و وزن ذرات خاک، مشابه عملیات قبل برای بررسی همبستگی احتمالی بین نسبت ناهمسانی ساختار بافتی و مقادیر میانگین کرویت دانه‌ها (S) و چگالی ویژه دانه‌ها (G_s) صورت گرفته است. با برازش منحنی بین مقادیر " $A_{hh}/A_{vh} - S$ " و " $A_{hh}/A_{vh} - G_s$ " به ترتیب روابط (۱۵) و (۱۶) حاصل گشته است.

$$\frac{A_{hh}}{A_{vh}} = 1.079S^{-0.436} ; R^2 = 0.569, N = 25 \quad (15)$$

$$\frac{A_{hh}}{A_{vh}} = 0.847G_s^{0.442} ; R^2 = 0.012, N = 28 \quad (16)$$

به عنوان نمونه الگوی تغییرات نسبت ناهمسانی ساختار بافتی خاک بر حسب میانگین کرویت در شکل ۶ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار میانگین کرویت و گردی دانه‌های خاک، درجه ناهمسانی ساختار بافتی خاک به طور چشمگیری کاهش یافته است. مقدار قابل ملاحظه‌ی ضریب تعیین نیز بیانگر همبستگی مطلوبی (۵۷ درصد) میان نسبت A_{hh}/A_{vh} و پارامتر S می‌باشد. این درحالیست که ضریب تعیین بسیار پایین در رابطه (۱۶) تأیید کننده رابطه بسیار ناچیز و قابل اغماض بین نسبت ناهمسانی ساختار بافتی خاک و چگالی مخصوص دانه‌هاست.



شکل ۶- همبستگی بین نسبت ناهمسانی ساختار بافتی A_{hh}/A_{vh} و کرویت S در ماسه‌ها

Fig 6. Correlation between fabric anisotropy ratio A_{hh}/A_{vh} and sphericity S in sands

با انجام تحلیل رگرسیون چندگانه خطی بین نسبت ناهمسانی ساختار بافتی خاک به‌عنوان متغیر وابسته و پارامترهای مشخصات خاک به‌عنوان متغیرهای مستقل در مقیاس لگاریتمی، اطلاعات استخراج شده با استفاده از نرم افزار SPSS (نسخه ۲۶) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است و براساس یافته‌های حاصل، نسبت به تایید/رد و تفسیر آن‌ها اقدام گردیده است. بر این اساس، در گام نخست با ورود متغیرها در نرم‌افزار، وجود یا عدم وجود همبستگی خطی بین متغیرها مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه با روش گام‌به‌گام (Stepwise method) در نرم افزار مذکور، نتایج حاصل از اجرای دستورات و محاسبات مربوط به برآورد پارامترهای مدل توسط نرم‌افزار، استخراج گردیده و در جدول ۳ نشان داده شده است.

با توجه به مطالب گفته شده، می‌توان پیش‌بینی نمود که پارامترهای کرویت، حداکثر اندازه دانه‌ها و ضریب یکنواختی، به ترتیب بیشترین تأثیر را بر نسبت ناهمسانی ساختار بافتی ماسه‌ها دارا می‌باشند و اثر پارامترهای ضریب دانه‌بندی، چگالی مخصوص دانه‌ها، اندازه موثر و متوسط دانه‌ها بر روی درجه ناهمسانی ساختار بافتی خاک به دلیل همبستگی بسیار ضعیف بینشان، ناچیز می‌باشد. برای دستیابی به نتایج منطقی و قاطعانه در خصوص این مساله، در ادامه تحلیل رگرسیون چندگانه خطی بین نسبت ناهمسانی ساختار بافتی خاک و مقادیر کلیه متغیرهای دانه‌بندی، شکل و وزن ذرات آن اجرا شده است.

جدول ۳- نتایج حاصل از تحلیل رگرسیون چند متغیری به سبک گام‌به‌گام جهت پیش‌بینی وابستگی نسبت ناهمسانی ساختار بافتی به خصوصیات خاک
Table 3. The results of stepwise multiple regression analysis to predict the dependence of fabric anisotropy ratio on soil properties.

| Independens variable | sig | Beta | B |
|-----------------------------------|-------|------------------------------|--------|
| Constant | 0.046 | - | 0.037 |
| <i>S</i> | 0.000 | -0.745 | -0.423 |
| <i>C_c</i> | 0.343 | -0.143 | - |
| <i>G_s</i> | 0.296 | -0.161 | - |
| <i>S₀</i> | 0.368 | -0.181 | - |
| <i>C_u</i> | 0.295 | -0.198 | - |
| <i>D₁₀</i> | 0.232 | 0.172 | - |
| <i>D₅₀</i> | 0.593 | 0.080 | - |
| <i>D_{max}</i> | 0.753 | 0.056 | - |
| ADJ. <i>R</i> ² = 0.55 | | <i>R</i> ² = 0.56 | |

۱- از مقایسه مقادیر مؤلفه‌های ناهمسانی ساختار بافتی خاک در صفحات افقی و قائم، می‌توان این‌گونه استنباط کرد که ماسه‌ها، غالباً ساختار بافتی قویتری را در جهت افقی نسبت به جهت عمودی از خود به نمایش می‌گذارند.

۲- تجزیه و تحلیل روند تغییرات نسبت‌های ناهمسانی ساختار بافتی و برشی در خاک‌های ماسه‌ای بر حسب شرایط بارگذاری، نشان می‌دهد که با رشد نسبت تنش، نسبت ناهمسانی برشی تغییرات قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت. در صورتی‌که ناهمسانی ساختار بافتی در این نوع از خاک‌ها در محدوده‌ی تنش ۰/۲۵ تا ۲/۵، تقریباً ثابت می‌ماند. لذا این دستاورد می‌تواند به عنوان یک شاخص سودمند برای مهندسی زمین‌شناسی و ژئوتکنیک در تقریب ناهمسانی ساختار بافتی بر حسب تنش ناشی از وزن سازه‌های طراحی شده بر روی خاک به کار روند.

۳- با ارزیابی وابستگی نسبت ناهمسانی ساختار بافتی خاک به مشخصات دانه‌بندی، شکل و وزن ذرات آن، مشاهده گردید که متغیرهای میانگین کرویت (*S*)، بیشینه قطر (*D_{max}*) و ضریب یکنواختی (*C_u*) دانه‌ها به ترتیب بیشترین، و پارامترهای اندازه مؤثر (*D₁₀*)، چگالی ویژه (*G_s*)، ضریب دانه‌بندی (*C_c*) و اندازه متوسط (*D₅₀*) ذرات خاک کمترین تاثیر را بر این نسبت دارا می‌باشند. در نهایت با اجرای روش گام‌به‌گام در نرم افزار آماری SPSS، به غیر از پارامتر *S*، سایر متغیرها از مدل خارج شده و

B و *Beta* در جدول ۳ به ترتیب معرف میانگین برآوردگرهای هر یک از ضرایب رگرسیونی و ضرایب استاندارد شده‌ی متغیرهای پیشگو، *sig* بیانگر سطح معنی‌داری (احتمال خطا) و *ADJ.R²* معرف ضریب تعیین اصلاح یا تعدیل می‌باشند.

همان‌طور که انتظار می‌رفت، فقط متغیر *S* به دلیل کمتر بودن سطح معنی‌داری آن از احتمال خطای در نظر گرفته شده برای این آزمون (۰/۰۵) در مدل گام‌به‌گام وارد شده است و سایر متغیرهای مستقل به دلیل داشتن رابطه‌ی خطی با متغیر کرویت یا نداشتن همبستگی مطلوب با نسبت ناهمسانی ساختار بافتی، از مدل کنار گذاشته شده‌اند. لذا می‌توان مدل نظری را بر اساس متغیر پیشگوی کرویت به صورت زیر ایجاد کرد:

$$\frac{A_{hh}}{A_{vh}} = 1.089S^{-0.423}; R^2 = 0.56, N = 25 \quad (17)$$

مقدار بالای *R²* در رابطه‌ی (۱۷) بیانگر وجود یک ارتباط منطقی بین میانگین کرویت دانه‌های خاک و نسبت ناهمسانی ساختار بافتی آن می‌باشد. در ضمن، وجود اختلاف ناچیز بین ضرایب روابط (۱۶) و (۱۷) که هر دو تابعی از *S* می‌باشند، می‌تواند ناشی از اعمال روابط لگاریتمی در تحلیل رگرسیون چندگانه و همچنین تفاوت الگوریتم بکار رفته توسط دو نرم‌افزار مختلف در استخراج اطلاعات باشد.

نتیجه‌گیری

۴- یافته‌های حاصل در این مطالعه سازگار با محیط زیست بوده و استفاده از آنها در مطالعات علمی بدون نیاز به آزمون‌های زمانبر و پرهزینه آزمایشگاهی، بسیار مقرون به صرفه و اقتصادی می‌باشد.

References

- Baxter, C. D. P., Sharma, M. S. R., 2012. Shear wave velocity of weakly cemented silty sand during drained and undrained triaxial compression. *Proceedings of GeoCongress 2012, ASCE*, 890-899.
- 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.
- Clayton, C. R. I., 2011. Stiffness at small strain: research and practice. *Geotechnique*, 61, 1, 5-37.
- Das, B. M., Sobhan, K., 2014. *Principles of Geotechnical Engineering*, 4th Edition. Cengage Learning, Stamford, USA.
- Dutta, T. T., Otsubo, M., Kuwano, R., Sato, T., 2020. Estimating multidirectional stiffness of soil using planer piezoelectric transducers in a large triaxial apparatus. *soil and foundation*, 60, 1269-1286.
- 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., Giretti, D., Jamiolkowski, M., 2013. Small strain stiffness of carbonate Kenya Sand. *Engineering Geology*, 161, 65-80.
- 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 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.
- Handy, R. L., Spangler, M. G., 2007. *Geotechnical Engineering: Soils and Foundation Principles and Practice*, 5th Edition. The McGraw-Hill, New York, USA.
- Ku, T., Mayne, P. W., 2013a. Profiling of K_0 lateral stress coefficient in soils using paired directional G_0 ratios. *Journal of Applied Geophysics*, 94, 15-21.
- Ku, T., Subramanian, S., Moon, 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., Jardine, R.J., 2002. On the applicability of cross-anisotropic elasticity to granular materials at very small strains. *Geotechnique* 52 (10), 727-749.

متغیر کرویت به‌عنوان تنها متغیر پیشگو یا توصیفی وارد مدل می‌شود. بر این اساس، پارامتر کرویت ذرات خاک به عنوان شاخص کاملاً مؤثر بر مقدار درجه‌ی ناهمسانی ساختار بافتی خاک پیش‌بینی شده و مدل نسبت ناهمسانی ساختار بافتی تنها بر اساس این پارامتر ارائه گردیده است.

- Masin, D., Rott, J., 2014. Small strain stiffness anisotropy of natural sedimentary clays: review and a model. *Acta Geotechnica*, 9, 299-312.
- Pegah, E., Gu, X. Q., Liu, H., 2024. Fabric anisotropy of granular soils and its dependency on grading and particles specifications. *Acta Geotechnica*, <https://doi.org/10.1007/s11440-024-02357-1>.
- 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., 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.
- 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.
- Styler, M. A., Howie, J. A., 2014. Continuous monitoring of bender element shear wave velocities during triaxial testing. *Geotechnical Testing Journal*, 37, 2, 218-229.