

Evaluating the ability of equivalent intergranular void ratio as a state variable in investigating the undrained behavior of silty sand

Hadi Bahadori^{1*}, Vahid Mohammadi²

1- Professor, Department of Civil Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

2- Instructor, Department of Civil Engineering, Aeen Kamal Higher Education Institute, Urmia, Iran

ABSTRACT

Most sandy sediments contain different amounts of fine silt grains, which have a significant effect on the behavior of the sand. Therefore, the engineering properties of silty sand have attracted the attention of many researchers. In this regard, in the technical literature, two indicators of intergranular void ratio (eg) and equivalent intergranular void ratio (eg_{eq}) are proposed as density variables in the investigation of the behavior of mixed soils. eg_{eq} is defined as a function of fine-grained value with parameter b , which can be calculated by two methods of back-analysis of experimental data or using the provided relations (the most common of them is b_{Rahman}). In this research, three groups of undrained compressive tests are performed on Firouzkoh sand samples with a low percentage of silt (3.0, 5 and 7%) based on the same values of eg and eg_{eq} with the two stated calculation methods of b . In the results of tests with eg and eg_{eq} using the b_{Rahman} relationship, with small changes in fine grain, a sharp change from contractive behavior to dilative behavior is observed, which is inconsistent with the logic and percentage of added fine grain. Therefore, eg and eg_{eq} using b_{Rahman} are not a reasonable and appropriate state variable to characterize the behavior of mixed soils. But the results of the samples containing a low percentage of silt based on eg_{eq} (b determined by Back-Calculation method) show a reasonable behavior and proportional to the percentage of fine grains added. Therefore, eg_{eq} calculated by this method and its related density (D_r^{S*}) are suggested as a new and alternative index for mixed soils with sand dominant fabric.

ARTICLE INFO

Receive Date: 16 May 2024

Revise Date: 26 June 2024

Accept Date: 10 July 2024

Keywords:

Equivalent Intergranular Void Ratio,
Back-Calculation,
Firouzkoh Sand,
Contractive Behavior,
Dilative Behavior

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2024.457250.3414>

*Corresponding author: Hadi Bahadori.

Email address: h.bahadori@urmia.ac.ir

ارزیابی توانایی نسبت تخلخل دانه‌ای معادل به عنوان یک متغیر حالت در بررسی رفتار

زهکشی نشده ماسه‌های سیلت دار

هادی بهادری^{۱*}، وحید محمدی قلعه عزیز^۲

۱ - استاد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲ - مربی، دانشکده فنی، گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی آیین کمال ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده

بیشتر رسوبات ماسه حاوی مقادیر مختلف ریزدانه‌های سیلت می‌باشند که تأثیر قابل توجهی بر رفتار ماسه می‌گذارند. لذا خواص مهندسی ماسه سیلت دار توجه محققین زیادی را جلب کرده است. در این راستا در ادبیات فنی دو شاخص نسبت تخلخل دانه‌ای (eg) و دانه‌ای معادل (eg_{eq}) به عنوان متغیر چگالی در بررسی رفتار خاک‌های مخلوط پیشنهاد می‌شوند. eg_{eq} به عنوان تابعی از مقدار ریزدانه با پارامتر b تعریف می‌شود که با دو روش تحلیل برگشتی از داده‌های تجربی و یا استفاده از روابط ارائه شده (رایج ترین آن‌ها b_{Rahman}) قابل محاسبه است. در این پژوهش، سه دسته آزمایش فشاری زهکشی نشده بر روی نمونه‌های ماسه فیروزکوه با درصد کم سیلت (۳، ۵ و ۷ درصد) بر مبنای مقادیر یکسان eg و eg_{eq} با دو روش بیان شده محاسبه b انجام می‌شوند. در نتایج آزمایش‌ها با eg و eg_{eq} با استفاده از رابطه b_{Rahman} ، با تغییرات کم ریزدانه یک تغییر شدید از رفتار انقباضی به اتساعی مشاهده می‌شود که با منطق و درصد ریزدانه افزوده شده ناسازگار است. لذا eg و eg_{eq} با استفاده از b_{Rahman} یک متغیر حالت منطقی و مناسب برای مشخص کردن رفتار خاک‌های مخلوط نیستند. ولی نتایج نمونه‌های حاوی درصد کم سیلت بر اساس eg_{eq} (با b محاسبه شده به روش تحلیل بازگشتی) رفتار منطقی و متناسب با درصد ریزدانه افزوده شده نشان می‌دهند. لذا eg_{eq} محاسبه شده با این روش و دانسیته مرتبط با آن (D_r^{S*}) به عنوان یک شاخص جدید و جایگزین برای خاک‌های مخلوط با بافت غالب ماسه پیشنهاد می‌شود.

کلمات کلیدی: نسبت تخلخل دانه‌ای معادل، تحلیل بازگشتی، ماسه فیروزکوه، رفتار انقباضی، رفتار اتساعی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.457250.3414	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2024.457250.3414	۱۴۰۳/۱۲/۳۰	۱۴۰۳/۰۴/۲۰	۱۴۰۳/۰۴/۲۰	۱۴۰۳/۰۴/۰۶	۱۴۰۳/۰۲/۲۷
هادی بهادری				*نویسنده مسئول:		
h.bahadori@urmia.ac.ir				پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

رفتار برشی زهکشی نشده رسوبات ماسه شامل مقاومت، ویژگی‌های تغییر شکل و اضافه فشار آب منفذی یک چالش در مطالعات ژئوتکنیکی می‌باشد. این اطلاعات برای طراحی سازه‌های مختلف تحلیل پتانسیل روانگرایی ضروری است [۱-۳]. مشاهدات میدانی در مناطق رسوبی نشان می‌دهد که بیشتر رسوبات ماسه طبیعی و مصنوعی حاوی مقادیر ریزدانه‌های سیلت غیر پلاستیک هستند [۴-۱۲]. به دلیل وجود ذرات ریزدانه رفتار ماسه بسیار پیچیده می‌شود و این ریزدانه‌ها به طور قابل توجهی بر ویژگی‌های مهندسی و رفتاری ماسه تأثیر می‌گذارند [۱۳-۱۸]. این مصالح را می‌توان تحت عنوان مواد واسطه^۱ تعریف کرد زیرا نمی‌توانند با رفتار کلاسیک ماسه‌ها و یا خاک‌های ریزدانه مطابقت کامل داشته باشند و ارزیابی و مدل‌سازی خاک‌های واسطه (ماسه‌های سیلت‌دار) یک مسئله مهم و مشکل‌ساز در کارهای مهندسی است [۱۹]. مطالعه و درک رفتار زهکشی نشده ماسه‌های سیلت‌دار به منظور جلوگیری از حوادث فاجعه باری که در گذشته آن‌ها را تحت تأثیر قرار داده است از اهمیت اساسی برخوردار است، لذا خواص مهندسی ماسه سیلت دار توجه زیادی از محققین را جلب کرده است و آزمایش‌های آزمایشگاهی زیادی برای بررسی رفتار برشی مخلوط‌های ماسه و سیلت با در نظر گرفتن عوامل متعددی مانند اندازه دانه، نوع ریزدانه‌ها، فشار همه جانبه^۲ و تاریخچه بارگذاری انجام شده‌اند [۲۵-۲۰] و به نظر می‌رسد که در برخی مواقع متناقض نیز می‌باشند و دیدگاه‌های بسیار متنوعی در مورد منفی یا مثبت بودن اثر ریزدانه‌ها برای مقاومت برشی و پتانسیل روان‌گرایی ماسه، بسته به مقادیر ریزدانه (FC)، ساختار^۳، چگالی^۴ و ویژگی‌های مصالح وجود دارد [۲۶-۲۸].

مطالعه تأثیر ریزدانه‌ها بر پاسخ زهکشی نشده ماسه‌ها یکی از چالش برانگیزترین موضوعات در مهندسی ژئوتکنیک بوده است زیرا ساختار و اسکلت مخلوط ماسه و سیلت با افزایش مقدار ریزدانه سیلنتی به طور قابل توجهی تغییر می‌کند. هنگامی که مقدار ریزدانه کم باشد رفتار مخلوط عمدتاً توسط ماتریس ماسه کنترل می‌شود (ماسه محور^۵) و هنگامی که مقدار ریزدانه زیاد شود، ماتریس سیلت متشکل از ریزدانه‌ها بر رفتار خاک غالب می‌شود (سیلت محور^۶). این نوع تغییر نشان دهنده وجود حد مرزی مربوط به تغییر اساسی در اسکلت و توزیع فضای خالی می‌باشد که این مقدار محدود کننده (نقطه گذار)، مقدار ریزدانه آستانه (FC_{th}) نامیده می‌شود [۲۹]. مقادیر گزارش شده ریزدانه آستانه در ادبیات فنی بین ۲۰ تا ۳۵ درصد گزارش شده است [۲۲، ۳۰، ۳۱]. مقدار ریزدانه آستانه را می‌توان با روش تجربی از طریق تحلیل برگشتی نسبت‌های تخلخل محدود کننده (e_{max}, e_{min}) [۳۲، ۳۳] یا با استفاده از روابط تجربی طبق رابطه (۱) تعیین کرد [۳۴].

$$FC_{th} \approx 0.4 \left[\frac{1}{1 + \exp(0.5 - 0.13\chi)} + \frac{1}{\chi} \right] \quad (1)$$

$$\chi = \frac{D_{10}}{d_{50}}$$

که در این رابطه D_{10} قطر موثر دانه‌های ماسه و d_{50} قطر متوسط سیلت می‌باشد.

در ادبیات فنی دو معیار مختلف چگالی نسبت تخلخل عمومی (e) و دانسیته نسبی عمومی ($D_r = (e_{max} - e)/(e_{max} - e_{min})$) در بررسی رفتار مخلوط‌های ماسه-سیلت به عنوان مبنای مقایسه‌ای به طور گسترده استفاده می‌شود، با این حال، هنوز اجماع در مورد این دو حاصل نشده است. نسبت تخلخل نسبت حجم فضاهای خالی (V_v) بر حجم ذرات جامد (V_s) در یک نمونه خاک است. این پارامتر شاخصی از تماس ذرات خاک را با استفاده از فضای پر شده توسط ذرات خاک و فضای پر شده توسط آب منفذی با فرض اشباع کامل خاک

¹ Intermediate

² Effective Confining Pressure

³ Fabric

⁴ Density

⁵ Sand-Like

⁶ Silt-Like

تعریف می‌کند. این پارامتر بر اساس ویژگی‌های عمومی خاک بوده و ویژگی‌های ریزساختاری را در نظر نمی‌گیرد. به این ترتیب، نسبت تخلخل دو ایراد مهم در تعیین چگالی مخلوطی از ماسه و ریزدانه دارد:

(۱) نسبت تخلخل هیچ اطلاعاتی در مورد محدوده چگالی بالقوه خاک ارائه نمی‌دهد. محدوده تراکم بالقوه خاک معمولاً با نسبت های تخلخل حداکثر و حداقل، e_{min} و e_{max} توصیف می‌شود.

(۲) نسبت تخلخل هیچ اطلاعاتی در مورد ترکیب اندازه ذرات خاک ارائه نمی‌دهد. این مورد اشاره به ترکیب اندازه ذرات خاک به حجم ذرات جامد (V_s) و عدم تقسیم بین ذرات ماسه و ریزدانه در این پارامتر دارد. V_s مقادیر نسبی ماسه و ذرات ریزدانه در خاک که با تغییر درصد ریزدانه خاک به وضوح تغییر می‌کند را مشخص نمی‌کند، این عدم تقسیم به این معنی است که جایگزینی ذرات ماسه با ذرات ریزدانه منجر به تعداد متفاوت تماس ذرات خاک در زنجیره تحمل نیرو خاک می‌شود.

عده‌ای از محققین آزمایش‌هایی را بر روی ماسه سیلنتی با e ثابت انجام دادند که بر اساس نتایج حاصل شده مقاومت به روانگرایی نمونه‌ها در مقایسه با ماسه تمیز کمتر می‌باشد [۳۵، ۳۶]. با این حال، محققین زیادی به استفاده از دانسیته نسبی در مقایسه با نسبت تخلخل به عنوان رویکرد مناسب‌تر برای توصیف رفتار مکانیکی ماسه سیلنتی توصیه می‌کنند [۳۷-۳۹]. دانسیته نسبی با استفاده از نسبت تخلخل (e)، نسبت تخلخل حداکثر (e_{max}) و نسبت تخلخل حداقل (e_{min}) تعریف شده است. این شاخص شامل حد بالا و پایین نسبت تخلخل نیز می‌شود. از فقدان کامل محدوده تراکم بالقوه خاک همانطور که برای نسبت فضای تخلخل بحث شد جلوگیری می‌کند، اما روش‌های محاسبه e_{min} و e_{max} برای مقادیر ریزدانه بالای ۱۵ درصد توصیه نمی‌شوند. استانداردهای مورد استفاده در سراسر جهان (آمریکایی، بریتانیا، ژاپن، نیوزلند) همگی برای تعیین e_{min} و e_{max} برای ماسه‌های تمیز و ماسه‌هایی با مقادیر ریزدانه کم طراحی شده‌اند. این امر باعث می‌شود که e_{min} و e_{max} برای خاک‌های با ریزدانه بالاتر به طور بالقوه غیرقابل اعتماد به دست آمده باشند. از آنجایی که نسبت تخلخل حداکثر و حداقل با تغییر مقادیر ریزدانه‌ها متفاوت است دو پارامتر دانسیته نسبی را می‌توان متمایز کرد:

۱- دانسیته نسبی بر اساس مقادیر نسبت تخلخل حداکثر و حداقل ماسه میزبان (Host Sand) (رابطه ۲)

۲- دانسیته نسبی بر اساس مقادیر نسبت تخلخل حداکثر و حداقل مخلوط ماسه-ریزدانه (Mixture) (رابطه ۳)

$$D_r = \frac{e_{max(Host\ Sand)} - e}{e_{max(Host\ Sand)} - e_{min(Host\ Sand)}} \quad (2)$$

$$D_r^s = \frac{e_{max(Mixture)} - e}{e_{max(Mixture)} - e_{min(Mixture)}} \quad (3)$$

در نتیجه، نگرانی‌هایی در مورد مقبولیت e و D_r عمومی در توصیف واکنش چنین خاک مخلوطی مطرح شد و فرضیه‌هایی مطرح گردید که بتوان محتوای ریزدانه خاک را با یک معیار حالت جدید در نظر گرفت، معیاری که بین ذرات ماسه و ذرات ریزدانه تفاوت قائل شود و رفتار خاک مشابهی را در مقادیر مشابه این معیار اندازه‌گیری کند. یکی از رویکردهای پیشنهادی برای توضیح تفاوت در ماسه و ذرات ریزدانه خاک، در نظر گرفتن ساختار ماسه به طور مستقل از ریزدانه‌ها بود. این ایده نشان می‌دهد که واکنش زهکشی نشده یک خاک تنها توسط ذرات ماسه در خاک کنترل می‌شود و ریزدانه‌ها در طول بارگذاری هیچ نقشی در زنجیره تحمل نیروی خاک بازی نمی‌کنند. این پارامتر به عنوان نسبت تخلخل بین دانه‌های^۷ طبق رابطه (۴) تعریف می‌شود (e_g) [۴۰] که بطور شماتیک در شکل (۱-الف) نشان داده شده است. به دنبال این ایده، نسبت فضای خالی بین دانه‌های اصلاح شد تا به برخی از ذرات ریزدانه اجازه دهد تا در زنجیره نیروی خاک شرکت کنند، نه اینکه صرفاً تأثیر آنها را نادیده بگیرند که این موضوع منجر به تعریف نسبت تخلخل دانه‌های معادل^۸ طبق رابطه (۵) گردید ($e_{g(eq)}$) [۴۱] که بطور شماتیک در شکل (۱-ب) نشان داده شده است. برخی محققین استفاده از چگالی نسبی معادل را در

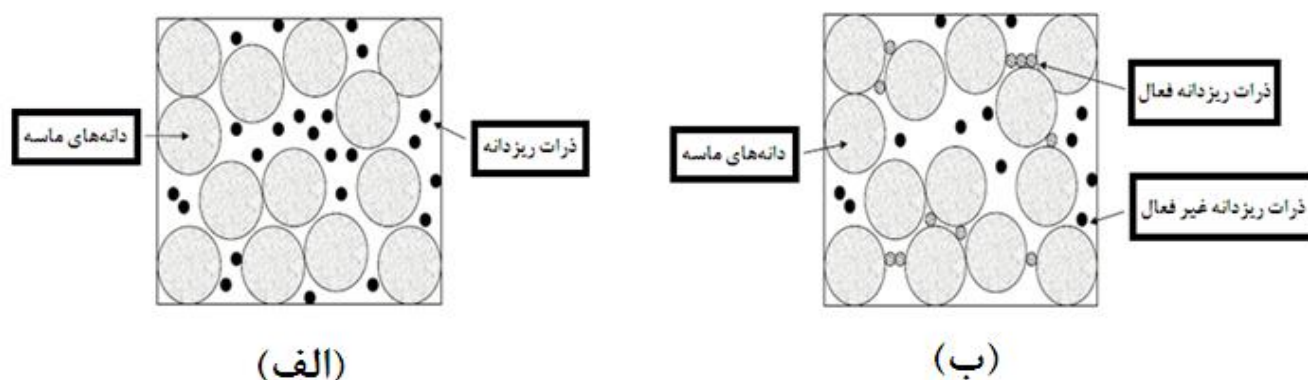
⁷ Intergranular Void Ratio

⁸ Equivalent Intergranular Void Ratio

ارزیابی پتانسیل روانگرایی مخلوط‌های حاوی طیف وسیعی از ریزدانه با قرار دادن نسبت تخلخل دانه‌ای معادل به جای نسبت تخلخل عمومی توصیه می‌کنند [۱۷، ۴۲].

$$e_g = \frac{e + FC}{1 - FC} \quad (۴)$$

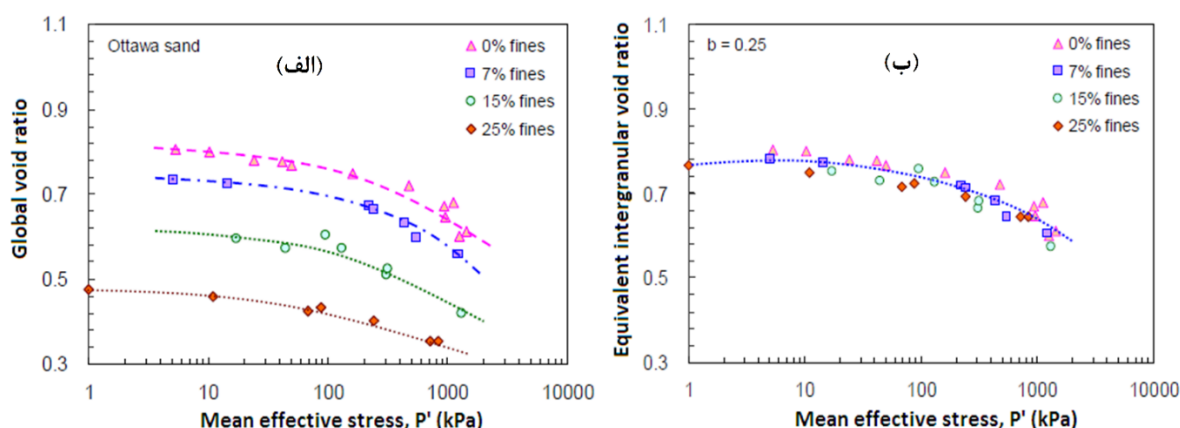
$$e_{g(eq)} = \frac{e + (1-b)(FC)}{1 - (1-b)(FC)} \quad (۵)$$



شکل ۱: شکل شماتیک از دو مفهوم نسبت تخلخل دانه‌ای و بین دانه‌ای معادل

ضریب b عامل تاثیرگذار ریزدانه‌ها، درصدی از ریزدانه‌ها را نشان می‌دهد که به ساختار نیرو کمک می‌کند [۳۴، ۴۱] و مقدار آن بین ۰ و ۱ متغیر است. فرض بر این است، وقتی b صفر باشد، e_g به $e_{g(eq)}$ تبدیل می‌شود، به این معنی که ریزدانه‌ها به صورت فضای خالی عمل می‌کنند و وقتی $b=1$ باشد، به این معنی می‌باشد که ریزدانه‌ها مانند ذرات ماسه میزبان عمل می‌کنند و $e_{g(eq)}$ به e تبدیل می‌شود.

تئوری حالت بحرانی به طور گسترده‌ای به عنوان یک حالت مشخصه رفتار خاک استفاده می‌شود که بر اساس آن یک رابطه منحصر به فرد بین نسبت تخلخل (e) و میانگین تنش موثر (P') وجود دارد که با خط حالت بحرانی (CSL) بیان می‌شود. در صفحه $e_0 - P'$ بر اساس مفهوم حالت بحرانی، رفتار یک ماسه علاوه بر چگالی به سطح تنش نیز بستگی دارد. لذا وضعیت واقعی یک ماسه با موقعیت تنش و نسبت حجمی آن نسبت به CSL توصیف می‌شود. در ادبیات فنی از مفهوم نسبت تخلخل دانه‌ای معادل برای ترسیم داده‌های حالت بحرانی ماسه پایه و مخلوط آن با ریزدانه‌ها در یک نوار باریک (در یک CSL تقریباً واحد) در صفحه $e_{g(eq)} - P'$ استفاده می‌کنند [۳۴، ۴۱، ۴۳، ۴۴]. به عنوان نمونه در شکل (۱) نتایج آزمایش‌های سه محوری بر روی یک ماسه تمیز مخلوط با ریزدانه‌های غیر پلاستیکی (سیلت) را نشان می‌دهد [۴۵]. نمودار CSL خاک مخلوط در صفحه $e_{g(eq)} - P'$ که در آن $e_{g(eq)}$ با استفاده از $b=0.25$ رسم می‌شوند (شکل ۲-ب)، داده‌ها در یک باند باریک قرار می‌گیرند که بهترین CSL را می‌توان استخراج کرد [۴۱]. توجه به این نکته مهم است که CSL برای ماسه میزبان دیگر منحصر به فرد نیست و به FC وابسته است، در نتیجه اصل مکانیک خاک حالت بحرانی را که وجود یک CSL منحصر به فرد برای یک خاک معین را تصریح می‌کند، نقض می‌کند.



شکل ۲: داده‌های حالت بحرانی برای ماسه تمیز و مخلوط با ریزدانه در (الف) صفحه $e_0 - P'$ و (ب) صفحه $e_{g(eq)} - P'$ [۴۱]

بنابراین بر اساس این ایده جذاب علاقه به استفاده از نسبت تخلخل دانه‌ای معادل برای توصیف رفتار خاک‌های مخلوط ماسه-ریزدانه افزایش یافته است، لیکن مرحله کلیدی در انجام آن، تعیین ضریب b است که جای بحث دارد. برخی محققین معتقدند که b یک پارامتر ثابت است، که می‌توان آن را با تحلیل برگشتی^۹ از داده‌های تجربی تعیین کرد، بطور مثال مقدار 0.25 برای تمام درصد ریزدانه‌ها توسط برخی محققین توصیه شده است [۶، ۴۱، ۴۴]. یانگ و همکاران مقدار 0.25 برای مقادیر ریزدانه زیر ۲۰ درصد و مقدار 0.4 برای مقادیر بالای ۲۰ درصد ریزدانه توصیه کرده‌اند [۴۶]. البته استفاده از روش تحلیل برگشتی برای درصدهای متفاوت ریزدانه بر اساس نتایج آزمایشگاهی نیز قابل محاسبه است [۴۷، ۴۸]. برخی محققین استفاده از روابط ارائه شده را برای تخمین این پارامتر پیشنهاد می‌کنند [۲۲، ۳۴، ۴۹] که مرسوم‌ترین آن‌ها، رابطه نیمه تجربی ارائه شده توسط رحمان و همکاران [۳۴] با تجزیه و تحلیل چندین مجموعه از داده‌های طبق رابطه (۶) می‌باشد. با توجه به این معادله دیده می‌شود که تأثیر ویژگی‌های مورفولوژی (به عنوان مثال شکل ذره) بر مقدار b نادیده گرفته شده است، اما شکل ذره از طریق مشاهدات تجربی ثابت شده است که یک عامل اساسی تأثیرگذار بر b است [۴۸]. لازم به ذکر است در ادبیات فنی وجود مقادیر b متعدد برای یک مجموعه داده معین نیز مشاهده می‌شود. به عنوان مثال، برای نتایج آزمایش بر روی یک ماسه آبرفتی مخلوط با ۹ درصد ریزدانه‌ها غیر پلاستیکی، مقدار 0.7 را برای پارامتر b برای توصیف مقاومت حالت پایدار یا بحرانی خاک مخلوط ارائه شده است [۶] و برای همان داده‌ها با استفاده از رابطه (۶) مقدار b ، 0.33 پیش بینی می‌شود. با توجه به مفهوم عامل تأثیرگذار ریزدانه‌ها، مقدار 0.7 پارامتر b نشان دهنده مشارکت ۷۰ درصد از ریزدانه‌ها در انتقال نیرو می‌باشد، و مقدار 0.33 مشارکت کمتر از ۴ درصد از ریزدانه‌ها در انتقال نیرو را نشان می‌دهد.

$$b_{\text{Rahman}} = \left[1 - \exp \left(-0.3 \frac{FC/FC_{th}}{1 - \chi^{-0.25}} \right) \right] \left(\frac{1}{\chi} \cdot \frac{FC}{FC_{th}} \right)^{1/\chi} \quad (6)$$

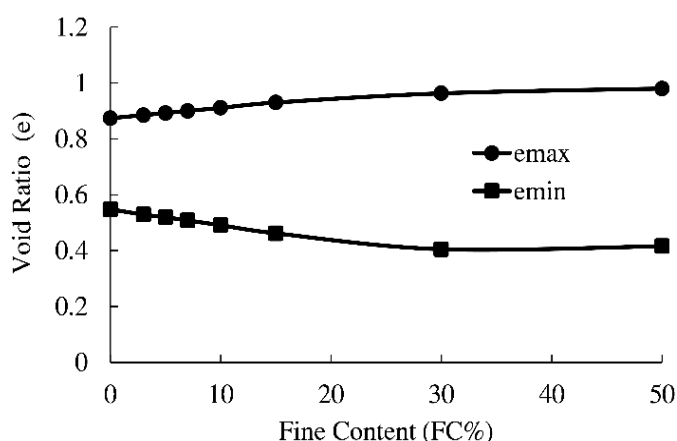
بدیهی است، اگر مفهوم نسبت تخلخل دانه‌ای و دانه‌ای معادل به طور گسترده پذیرفته شده است، تحقیقات برای پرداختن به مفاهیم فوق و به‌ویژه برای کشف منطق اساسی مورد نیاز است. فرضیه اصلی پشت این مفهوم این است که اگر یک خاک مخلوط ماسه و سیلت و ماسه تنها با مقدار یکسان نسبت تخلخل دانه‌ای و دانه‌ای معادل تحت شرایط یکسان مورد آزمایش قرار گیرند باید رفتار یکسان داشته باشند. از طرفی ارزیابی دقیق پارامتر b در بررسی نتایج نقش کلیدی را دارا است. همانطور که بیان شد در ادبیات فنی از مفهوم نسبت تخلخل دانه‌ای معادل برای ترسیم داده‌های حالت بحرانی ماسه پایه و مخلوط با ریزدانه‌ها در یک نوار باریک در یک CSL تقریباً واحد پس از محاسبه نسبت تخلخل بدست آمده در انتهای آزمایش‌ها استفاده می‌کنند (که در این تحقیق معکوس این روند ملاک خواهد بود) و عموماً نمونه‌ها حاوی درصد بالای ریزدانه هستند ولی توانایی این پارامتر به عنوان مبنای مقایسه‌ای و پارامتر حالت مورد ارزیابی قرار

⁹ Back-Calculation

نگرفته است و از طرفی چالش‌های جدی در تعیین پارامتر b ، وجود دارد. لازم به ذکر است تهیه نمونه‌هایی با نسبت تخلخل بین دانه‌های یکسان حاوی درصد بالا ریزدانه خیلی سخت یا حتی ناممکن است. برای مثال برای اینکه یک نمونه ماسه سیلت‌دار فیروزکوه با میزان سیلت ۳۰ درصد تهیه شود که نسبت تخلخل بین دانه‌های آن معادل نسبت تخلخل ماسه تمیز با دانسیته ۵۰ درصد ($e=0.72$) باشد، نسبت تخلخل ماتریس خاک مرکب می‌بایست برابر 0.2 باشد که این مقدار از تخلخل مینیمم خاک حاوی ۳۰ درصد سیلت مطابق شکل (۳) کمتر است. بنابراین برای نقد و بررسی پارامترها از درصد پایین در پژوهش استفاده می‌شود.

با توجه به موارد ذکر شده روند و اهداف این مقاله پژوهشی را می‌توان به قرار زیر بیان کرد:

- انجام آزمایش‌های فشاری بر روی نمونه‌های ماسه سیلت‌دار فیروزکوه با درصد کم سیلت (۳،۰، ۵ و ۷ درصد) بر مبنای نسبت تخلخل دانه‌های یکسان در انتهای آزمایش
- انجام آزمایش‌های فشاری بر روی نمونه‌های ماسه سیلت‌دار فیروزکوه با درصد کم سیلت (۳،۰، ۵ و ۷ درصد) بر مبنای نسبت تخلخل دانه‌های معادل یکسان در انتهای آزمایش با استفاده از عامل تاثیرگذار ریزدانه‌ها (b) طبق رابطه (۶)
- مقایسه نتایج دو بخش قبلی به عنوان مبنای مقایسه‌ای و علت عدم توانایی و کم بودن تفاوت در نتایج
- ارزیابی توانایی رابطه (۶) به عنوان رابطه مرسوم در ادبیات فنی و نقاط ضعف این پارامتر با مقایسه نتایج ارائه شده
- انجام آزمایش‌های فشاری بر روی نمونه‌های ماسه سیلت‌دار فیروزکوه با درصد کم سیلت (۳،۰، ۵، ۷ و ۱۰ درصد) بر مبنای نسبت تخلخل دانه‌های معادل یکسان و دانسیته مرتبط با آن بر اساس روش تحلیل بازگشتی

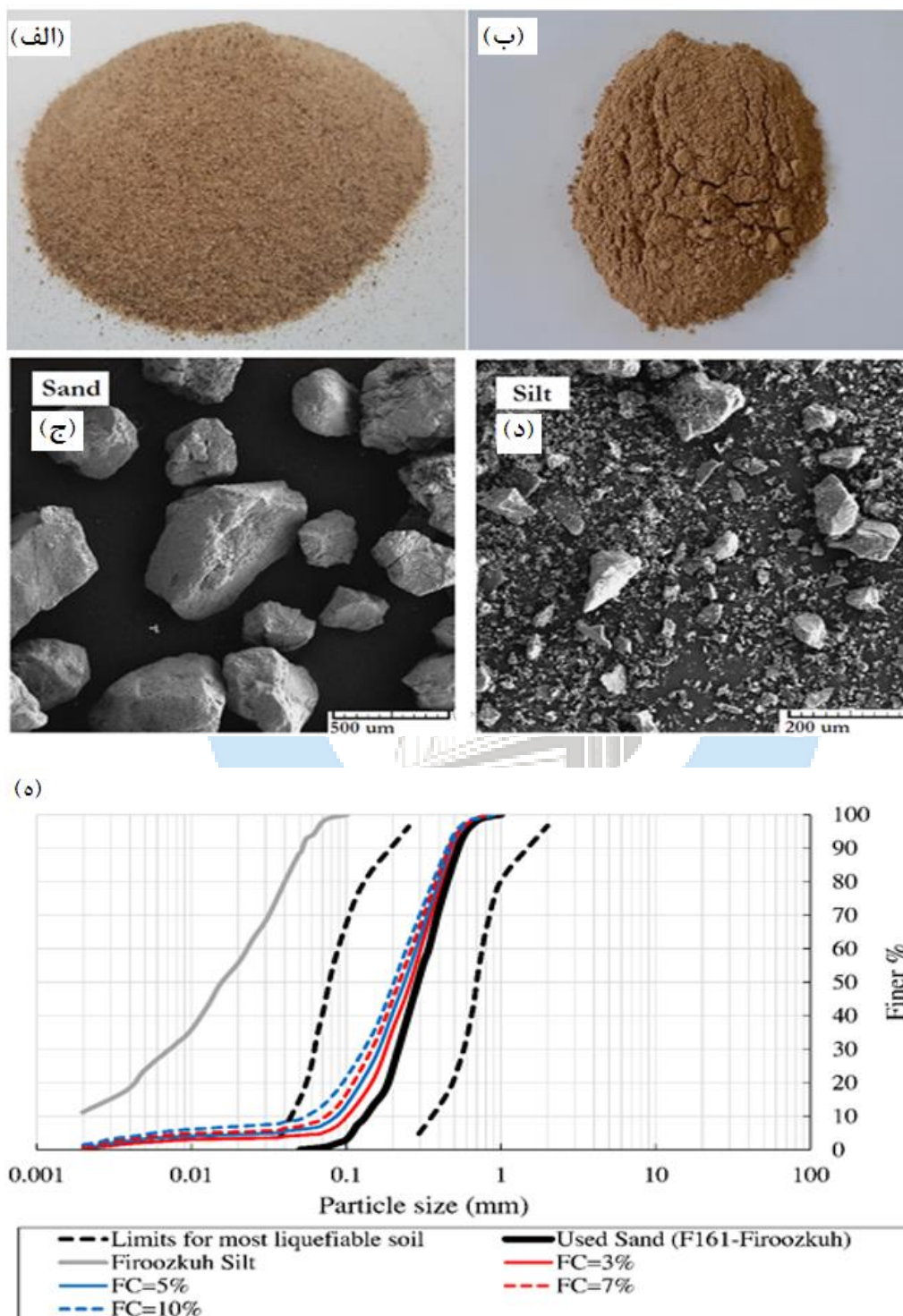


شکل ۳: حداقل و حداکثر نسبت تخلخل برای مخلوط ماسه و سیلت فیروزکوه

۲- مصالح و روش‌ها

مصالح آزمایش شده در این پژوهش ماسه فیروزکوه است که به اختصار ماسه ۱۶۱ نامیده می‌شود. این ماسه رنگ زرد متمایل به طلایی (شکل ۴-الف) داشته و از دانه‌های سیلیسی خرد شده و گرد تشکیل شده است (شکل ۴-د). ریزدانه مورد استفاده سیلت فیروزکوه به رنگ قهوه‌ای با دانه بندی همگن می‌باشد (شکل ۴-ب و شکل ۴-ج). شاخص پلاستیسیته سیلت حدوداً ۲ می‌باشد و با توجه به اینکه کمتر از ۵ درصد است، می‌توان آن را غیر پلاستیک در نظر گرفت. منحنی دانه بندی ماسه و تصاویر میکروسکوپی در شکل (۴-ه) و مشخصات فنی مصالح در **Error! Reference source not found.** ارائه شده است. با افزودن ریزدانه به ماسه میزبان مقادیر e_{min} و e_{max} تغییر می‌کند، بنابراین باید برای محتویات مختلف سیلت به دست آیند [۵۰-۵۲]. مقادیر به دست آمده (مخلوط ماسه و سیلت فیروزکوه) در شکل (۳) نشان داده شده است. حداقل نسبت تخلخل تا محدوده ۳۰ درصد ریزدانه کاهش یافت که می‌تواند به عنوان FC_{th} در نظر

گرفته شود. مقدار مشابه نیز با رویکرد تجربی با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود، که این رابطه به طور گسترده ای در ادبیات فنی مورد پذیرش قرار گرفته است [۲۲، ۵۳].



شکل ۴: تصاویر و منحنی دانه بندی مصالح مورد استفاده در پژوهش

جدول ۱: مشخصات مصالح ماسه و سیلت

مصالح	Gs	e _{max}	e _{min}	Cu	Cc	D10 (mm)	D50 (mm)	LL	PL	PI	رده بندی
ماسه فیروزکوه ۱۶۱	۲/۶۵	۰/۸۷۴	۰/۵۴۸	۱/۸۷	۰/۸۸	۰/۱۶	۰/۲۷	-	-	-	SP
سیلت	۲/۶۷	۱/۲۱	۰/۶۱۲	-	-	-	۰/۰۳	۲۴	۲۲	۲	ML

e_{min}= minimum void ratio, e_{max}= maximum void ratio; ASTM-D4253 [54] and ASTM-D4254 [55]

روش‌های مختلفی برای ساخت نمونه خاک‌های دانه‌ای در مقیاس آزمایشگاهی وجود دارد. خاک پایه می‌تواند خشک، مرطوب یا اشباع باشد. نمونه را می‌توان در صورت ریزشی و یا با ضربه زدن و فشرده کردن، تهیه کرد. در این مطالعه از روش ریزشی خشک با قیف به عنوان تکنیک تهیه نمونه استفاده شده که می‌توان نمونه یکنواختی را تهیه کرد [۵۶-۵۸]. تعداد زیادی از محققین تکنیک آماده سازی رسوبی خشک با قیف را مناسب‌ترین روش برای ارزیابی مقاومت ماسه‌ها می‌دانند [۵۹، ۶۰]. مخلوط ماسه و سیلت به کمک قیف بلند در کف داخل با ارتفاع سقوط تقریباً صفر (جهت جلوگیری از به هم خوردن همگنی نمونه) ریخته می‌شود. قبل از مرحله اشباع سازی، دی اکسید کربن CO₂ (با فشار تقریبی ۳ کیلوپاسکال) و آب بدون هوا از نمونه عبور داده شده و سپس مرحله اشباع سازی تا رسیدن به مقدار ضریب اسکیمتون (B) بالای ۹۷ درصد ادامه می‌یابد. برای جلوگیری از اثر ناهمسانگردی القایی نمونه‌ها به صورت همسان تحت تنش همه جانبه ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال تحکیم می‌شوند. پس از انجام مراحل اشباع و تحکیم جهت کنترل روش نمونه سازی یک نمونه از محفظه خارج شد و به صورت افقی به سه لایه مساوی برش داده شد تا میزان سیلت در هر لایه بررسی شود [۴۹]. بر اساس نتایج جایجایی ذرات سیلت مشاهده نگردید. تمام آزمایش‌ها با دستگاه پیچشی توخالی (شکل ۵) بصورت فشاری زهکشی نشده (CU) کنترل کرنش انجام می‌شوند. پس از اتمام آزمایش نسبت تخلخل نمونه‌ها بر اساس درصد رطوبت اندازه گیری شده محاسبه می‌شود [۶۱] که مبنای محاسباتی در کلیه روابط این پژوهش می‌باشد. ابعاد نمونه با ارتفاع ۱۲ سانتیمتر و قطر داخلی و خارجی ۶ و ۱۰ سانتیمتر می‌باشد.

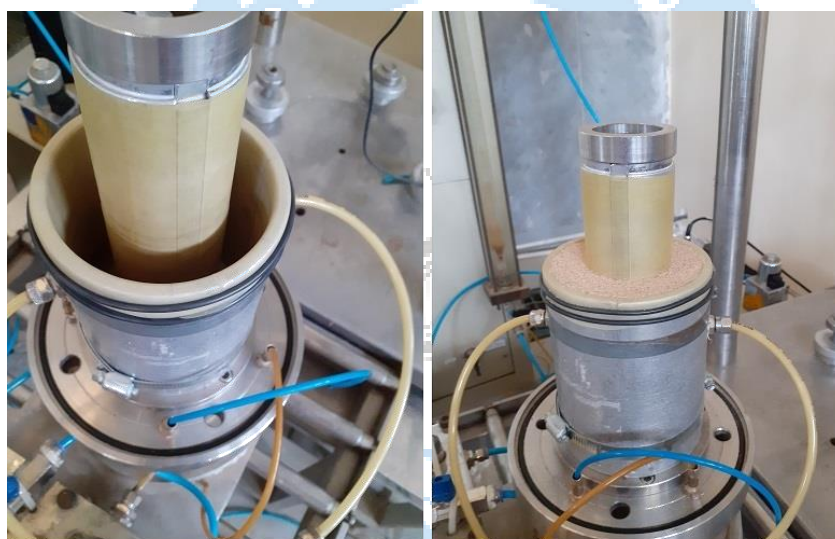
دستگاه استوانه پیچشی توخالی قابلیت اعمال شرایط بارگذاری مختلف و مسیر تنش‌های متفاوت با زاویه تنش اصلی متغیر را دارد. این شرایط از بارگذاری فشاری (مانند دستگاه سه محوری مرسوم) تا بارگذاری کششی می‌باشد. در دستگاه برشی سه محوری معمولی کنترل بر جهت‌های تنش اصلی امکان پذیر نمی‌باشد لیکن دستگاه برشی پیچشی استوانه توخالی با اعمال همزمان بار محوری، گشتاور، فشارهای داخلی و خارجی این امکان را فراهم می‌کند. از این رو یک کنترل بر روی هر دو جهت تنش اصلی و تنش اصلی میانی در رویکرد مسیر تنش گنجانده شده است. به این ترتیب بررسی بهتر رفتار خاک و وابستگی آن به جهت تنش اصلی (رفتار ناهمسان) و پیامدهای آن بر رفتار تنش-کرنش (پس از اوج) فراهم شده است. از سه مبدل الکتریکی/پنوماتیکی [E/P] برای اعمال فشار مورد نیاز برای فشار داخلی و خارجی سلول و نیروی محوری استفاده می‌شود. در این تحقیق که هدف نقد و بررسی متغیرهای حالت می‌باشد از بارگذاری فشاری استفاده شده است.

این دستگاه علاوه بر ویژگی‌های منحصر به فرد دارای محدودیت‌هایی نیز می‌باشد که استفاده از آن را در ایران و سایر کشورها محدود کرده است که این موارد را می‌توان به ترتیب زیر بیان کرد:

- ۱- شکل ساخت نمونه استوانه توخالی (شکل ۶) که حساسیت و امکان ایجاد خطا در نمونه سازی را افزایش می‌دهد
- ۲- شکل نمونه امکان ساخت به روش‌های مختلف را محدود می‌کند
- ۳- وجود سنسورها و مبدل‌های مختلف، استفاده از این دستگاه را برای محققین سخت و زمان بر می‌کند
- ۴- مراحل کالیبراسیون سنسورها زمان بر می‌باشد
- ۵- گران بودن خود دستگاه و اجزاء مصرفی آن



شکل ۵: دستگاه استوانه پیچشی توخالی



آماده سازی محل نمونه

نمونه استوانه‌ای توخالی

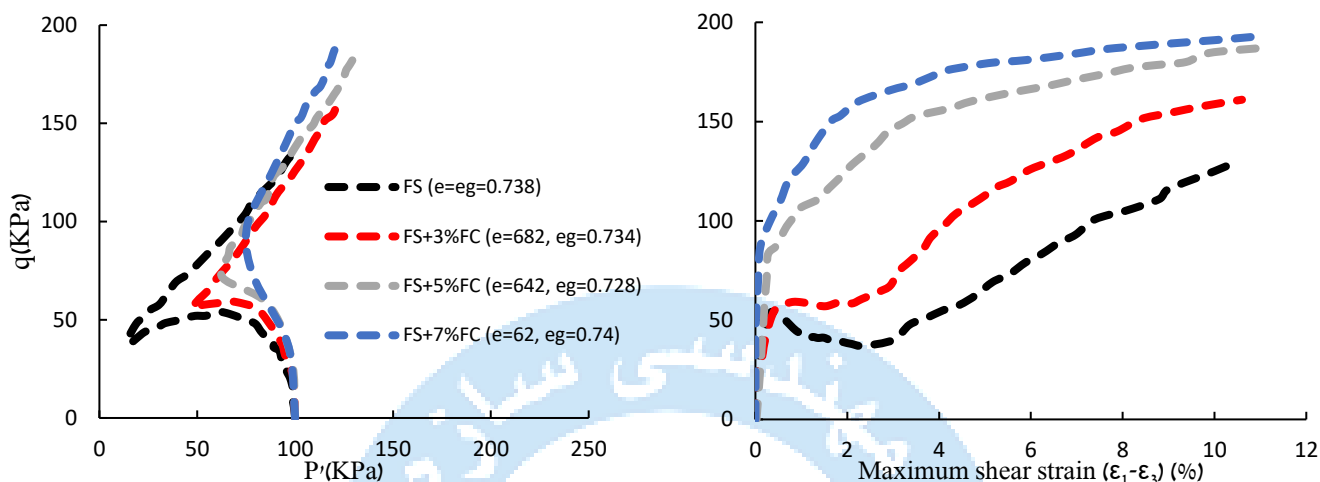
شکل ۶: شکل نمونه در دستگاه استوانه پیچشی توخالی

۳- نتایج

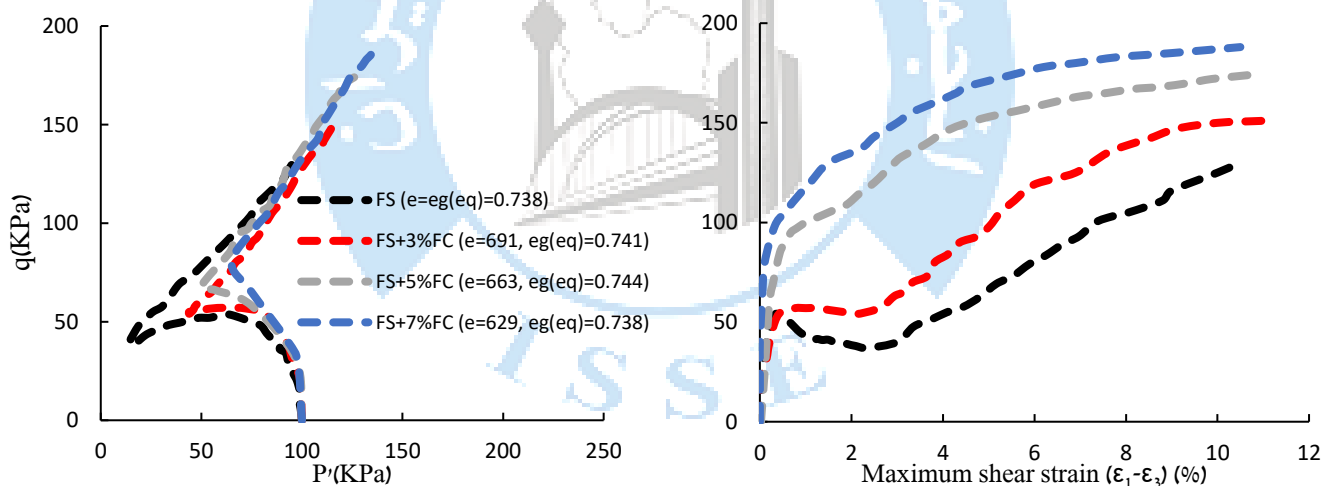
۳-۱- تاثیر ریزدانه بر رفتار ماسه - آزمایش نمونه‌ها با نسبت تخلخل دانه‌ای و دانه‌ای معادل ثابت با استفاده از پارامتر عامل تاثیرگذار ریزدانه‌ها محاسباتی (bRahman)

در این بخش از مطالعه، نمونه‌ها با نسبت تخلخل دانه‌ای و دانه‌ای معادل ثابت، با حفظ همان مقدار ماسه و افزودن تدریجی ذرات ریزدانه آماده شدند. دو سری آزمایش با دو نسبت تخلخل دانه‌ای و نسبت تخلخل دانه‌ای معادل در حدود ۰.۷۳۸ تحت تنش همه جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال انجام گردید. مقادیر ریزدانه ۰، ۳، ۵ و ۷ درصد در نظر گرفته شد و با استفاده از روابط ۴، ۵، ۶ و محاسبات صورت می‌گیرد. شایان ذکر است که استفاده از این دو مفهوم زمانی مناسب است که درصد ریزدانه‌ها کمتر از ریزدانه آستانه باشد که برای مخلوط

ماسه و فیروزکوه ۳۰ درصد می‌باشد. اشکال (۷) و (۸) مسیر تنش مؤثر و منحنی تنش-کرنش را به ترتیب برای نمونه‌های مخلوط با نسبت تخلخل دانه‌ای و دانه‌ای معادل ثابت نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۷) نشان داده شده است، ماسه تمیز با $e=0.738$ یک رفتار نرم شونده و انقباضی اولیه و به دنبال آن رفتار اتساع کننده را نشان می‌دهد، در حالی که نمونه حاوی ۷ درصد ریزدانه با $e=0.741$ رفتار اتساعی غالب را نشان می‌دهد. نمونه حاوی ۵ درصد ریزدانه با $e=0.728$ رفتار با حالت تبدیل فاز که پاسخ‌های انقباضی و اتساعی را جدا می‌کند از خود نشان می‌دهد.



شکل ۷: تأثیر درصد کم سیلت بر رفتار مکانیکی مخلوط ماسه و سیلت با نسبت تخلخل دانه‌ای یکسان

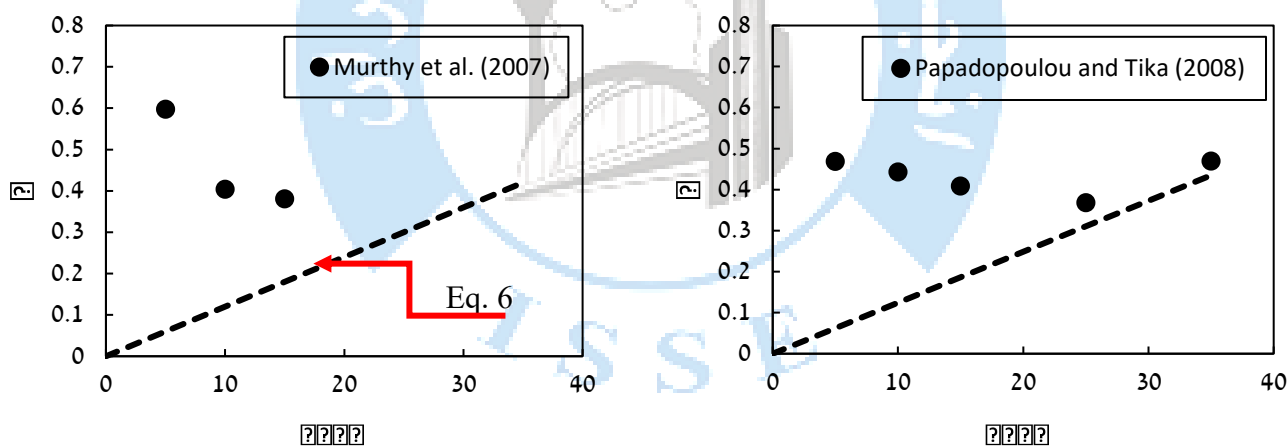


شکل ۸: تأثیر درصد کم سیلت بر رفتار مکانیکی مخلوط ماسه و سیلت با نسبت تخلخل دانه‌ای معادل یکسان

در شکل (۸)، نمونه‌ها با فرض نسبت تخلخل دانه‌ای معادل ثابت نیز رفتار مشابه را نشان می‌دهند. بنابراین وجود ریزدانه‌ها میل به اتساع ماسه را ناشی از کاهش نسبت تخلخل عمومی بعد از تحکیم افزایش می‌دهد و به افزایش مقاومت نمونه‌ها کمک می‌کند. در چندین مطالعه در ادبیات فنی به این نتیجه رسیده‌اند که وجود ریزدانه تأثیر مفیدی دارند لیکن از لحاظ مقدار تأثیر در رفتار با مقدار ریزدانه جای بحث وجود دارد و چنین نتیجه‌گیری گمراه‌کننده است، زیرا با استفاده از نسبت تخلخل دانه‌ای به‌عنوان مبنای مقایسه، که فرض اصلی آن عملکرد ریزدانه‌ها به‌عنوان فضای خالی می‌باشد و هیچ کمکی به ساختار نیرو ندارند، در تضاد است و افزایش مقاومت و تغییر رفتار شدید با افزودن درصد کم ریزدانه ناسازگار است. این ناسازگاری منطقی نشان می‌دهد که نسبت تخلخل دانه‌ای یک متغیر حالت منطقی برای مشخص کردن رفتار خاک‌های مخلوط نیست.

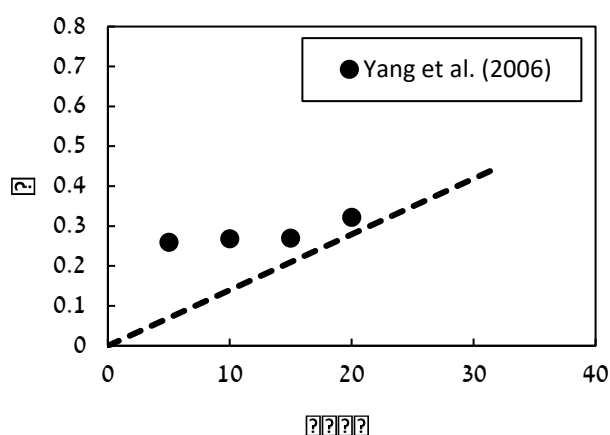
همانطور که بیان شد در بررسی نتایج با نسبت تخلخل دانه‌های معادل نیز نتایج مشابه با نسبت تخلخل دانه‌ای مشاهده می‌شود که علت این امر پارامتر b محاسبه شده بر اساس رابطه (۶) و فرضیات آن می‌باشد. مشکل در مقدار پارامتر b در FC پایین است که مقدار آن از صفر شروع می‌شود و سپس با افزایش مقدار ریزدانه مقدار b افزایش می‌یابد [۴۱]. که این فرض ممکن است معتبر نباشد. با در نظر گرفتن تنها یک ذره ریز منفرد که به یک ساختار درشت دانه اضافه شده است، بین دو ذره درشت فرو می‌رود و اگرچه این ذره سهم بسیار کمی در حمل بار دارد، اما ذره همچنان فعال است. بنابراین، طبق تعریف، مقدار b به جای صفر باید ۱ لحاظ شود. این وضعیت زمانی که اندازه ذره ریزدانه بزرگتر شود مشهودتر خواهد بود. زیرا اگر ذره ریز با اندازه‌های بزرگ باشد که نتواند در فضای خالی بین درشت دانه جا شود، به ناچار ذره فعالی است که با ذرات درشت مجاور در تماس خواهد بود. بنابراین، مقدار b از لحاظ منطقی نباید صفر باشد. از این رو، اگرچه مقدار ریزدانه بسیار کم است و سهم ریزدانه از نظر حمل بار ناچیز است، اما ممکن است بخشی از ریزدانه‌ها فعال باشد. در نتیجه مقدار b از نظر فیزیکی لزوماً صفر نیست. از طرف دیگر با نزدیک شدن مقدار ریزدانه به صفر، نسبت تخلخل دانه‌های معادل صرف نظر از مقادیر b برابر با نسبت فضای عمومی ذرات ماسه خواهد شد [۶۲]، بنابراین هیچ الزامی به صفر شدن پارامتر b در FC پایین نخواهد بود.

در شکل (۹)، پیش بینی به دست آمده از رابطه (۶) در مقایسه با مقادیر گزارش شده از چهار مطالعه مستقل معتبر از مقادیر b در ادبیات فنی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود این رابطه توانایی ارزیابی مقادیر b خصوصاً در درصد پایین ریزدانه را ندارد، البته در مقادیر بالاتر یک همگرایی نتایج مشاهده می‌شود. اما یک روش دقیق برای تعیین b ، محاسبه آن بر اساس پاسخ مشاهده شده خاک است. به این ترتیب، در روش تحلیل برگشتی با اختصاص یک مقدار اولیه به b ، داده‌های حالت پایدار بر حسب $e_{g(eq)}$ اصلاح شده برای هر درصد ریزدانه محاسبه و میانگین مربع انحراف (MSE) این داده‌ها با ماسه پایه محاسبه می‌شود. با تغییر مقدار b از ۰ به ۱ با فاصله ۰/۰۲، می‌توان تغییر در MSE با مقدار b را تعیین کرد. مقدار b بهینه برای خاک مخلوط با کمترین MSE مطابقت دارد [۴۷، ۴۸]. مثالی در شکل (۱۰) برای ماسه فیروزکوه با ۱۰ درصد ریزدانه ارائه شده است.

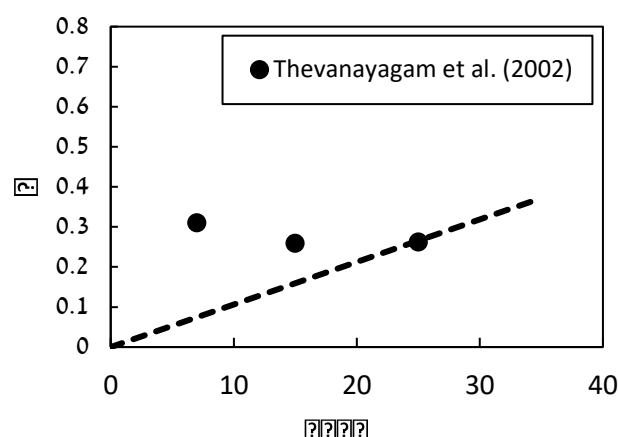


[۱۴] Ottawa sand-Sil-Co-Sil 106 silt

[۲۱] M31 sand-Assyros silt

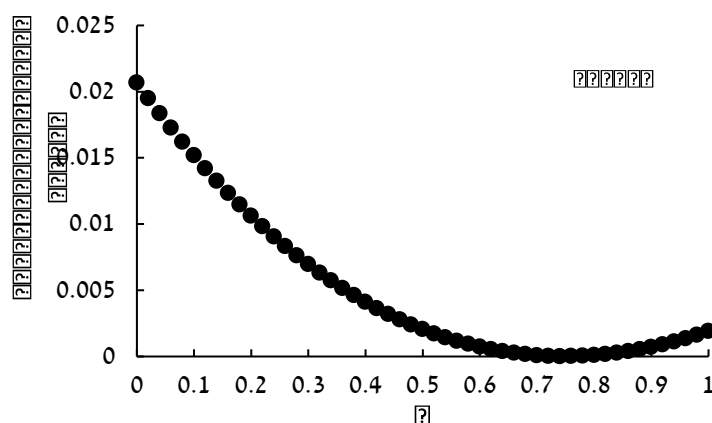


[۴۶] Hokksund sand-Chengbei silt



[۴۱] F55, Foundry sand-Sil-Co-Sil 40

شکل ۹: مقایسه مقادیر b محاسبه شده رابطه (۶) با مقادیر گزارش شده در ادبیات فنی (داده‌ها بر گرفته از [۴۳])



شکل ۱۰: مثالی برای تعیین ضریب b با استفاده از داده‌های آزمایش برای نمونه حاوی ۱۰ درصد سیلت (FC=10%)

۲-۳- تاثیر ریزدانه بر رفتار ماسه - آزمایش نمونه‌ها با نسبت تخلخل دانه‌ای معادل محاسبه شده با استفاده از پارامتر عامل تاثیرگذار ریزدانه‌ها از روش تحلیل بازگشتی (b)

هدف از این مطالعه این بخش بررسی اثر محتوای سیلت کم بر خواص مخلوط ماسه و سیلت می‌باشد و ۱۰ آزمایش برشی زهکشی نشده (CU) بر روی ماسه فیروزکوه (F161) با تنش محصور کننده ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال و محتوای سیلت ۰ تا ۱۰ درصد مطابق جدول (۲) انجام شد. در شکل (۱۱)، اثر افزودن درصد‌های مختلف سیلت (۳، ۵، ۷، و ۱۰ درصد) را می‌توان بر روی رفتار ماسه ارزیابی کرد. افزودن ذرات سیلت به ماسه میزان تا ۵ درصد، حداکثر مقاومت برشی نمونه را حدود ۱۸/۵ درصد افزایش می‌دهد. سپس مقاومت نمونه با افزایش میزان سیلت تا ۱۰ درصد کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که با محتوای سیلت ۱۰ درصد، مقاومت نمونه حدود ۱۲ درصد کمتر از ماسه میزان بود. این رفتار برای هر دو تنش همه جانبه ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال مشاهده شد. نتایج مشابهی توسط سایر محققان ارائه شده است که با افزایش مقدار دانه‌های ریزدانه در محتوای کم (حدود ۵ درصد) افزایش مقاومت در ماسه‌ها را مشاهده کردند [۲۸، ۳۱، ۳۶]. نمونه‌ها بطور کلی یک رفتار نرم شوندگی کرنشی با کرنش محدود را نشان دادند. این نوع رفتار در ماسه‌های سست مشاهده می‌شود که با حداکثر مقاومت برشی اولیه در یک کرنش کوچک مشخص می‌شود، سپس مقاومت برشی در کرنش متوسط به حداقل مقدار کاهش می‌یابد و پس از دستیابی به حداقل مقاومت برشی مقاومت برشی به حداکثر مقدار خود افزایش می‌یابد و فشار آب منفذی به حداقل مقدار خود در کرنش بزرگ کاهش می‌یابد. حداقل مقاومت برشی نقطه شبه پایدار (QSS) نامیده می‌شود و به عنوان

نقطه ای تعریف می شود که رفتار زهکشی نشده از انقباض به اتساع تغییر می کند. نتایج حاصل شده بر خلاف نتایج زیر بخش (۳-۱) که تغییر غیر منطقی رفتار از حالت انقباضی به اتساعی با افزودن فقط ۷ درصد سیلت را نشان دادند، یک روند منطقی و قابل دفاع متناسب با درصد ریزدانه افزوده شده را ارائه می دهد.

با افزایش مقدار سیلت (تا ۱۰ درصد)، نسبت تخلخل عمومی (e) نمونه از ۰/۷۳۸ (ماسه تمیز) به ۰/۶۹ در ۱۰۰ کیلو پاسکال P'c کاهش یافت. در نتیجه، چگالی نسبی (D_r^s) از ۴۱/۷ درصد به ۵۲/۳ درصد افزایش یافت. بنابراین با افزایش مقدار سیلت، روند کاهش نسبت تخلخل نمونه ها و افزایش چگالی نسبی مشاهده می شود، اما این روند افزایش چگالی الزاما منجر به افزایش مقاومت نمونه نمی شود. لذا، برای مبنای مقایسه ای نمونه ها، نسبت تخلخل بین دانه های معادل و چگالی نسبی بین دانه های معادل (D_r^{s*}) پیشنهاد می شود و بر اساس نتایج آزمایش های تجربی، روش تحلیل برگشتی برای محاسبه پارامتر b درگیر در رابطه چگالی نسبی بین دانه های معادل به منظور ارزیابی اثر عملکرد دانه سیلت اتخاذ شد. نسبت تخلخل بین دانه های معادل ($e_{g(eq)}$) برای ماسه تمیز و ۰/۷۳۶ برای ماسه حاوی ۱۰ درصد سیلت و مفهوم چگالی نسبی بین دانه های معادل (D_r^{s*}) ۴۱/۷ درصد برای ماسه تمیز و ۴۱/۶ درصد برای ماسه حاوی ۱۰ درصد سیلت می باشد.

تنش موثر اولیه (P'c) یکی از پارامترهای اساسی است که تأثیر مهمی بر رفتار مکانیکی خاک دارد. با افزایش تنش تحکیم از ۱۰۰ کیلو پاسکال به ۲۰۰ کیلو پاسکال، مقاومت پیک افزایش می یابد. کرنش محوری مرتبط با مقاومت پیک نیز با افزایش P'c افزایش می یابد. به عنوان مثال، مقاومت پیک به مقدار ۵۳ کیلو پاسکال (در تنش موثر اولیه ۱۰۰ کیلو پاسکال) در کرنش ۰/۳۴٪ می رسد. در حالی که در تنش موثر اولیه ۲۰۰ کیلو پاسکال در کرنش ۰/۳۷٪، مقاومت پیک به ۹۲ کیلو پاسکال افزایش می یابد.

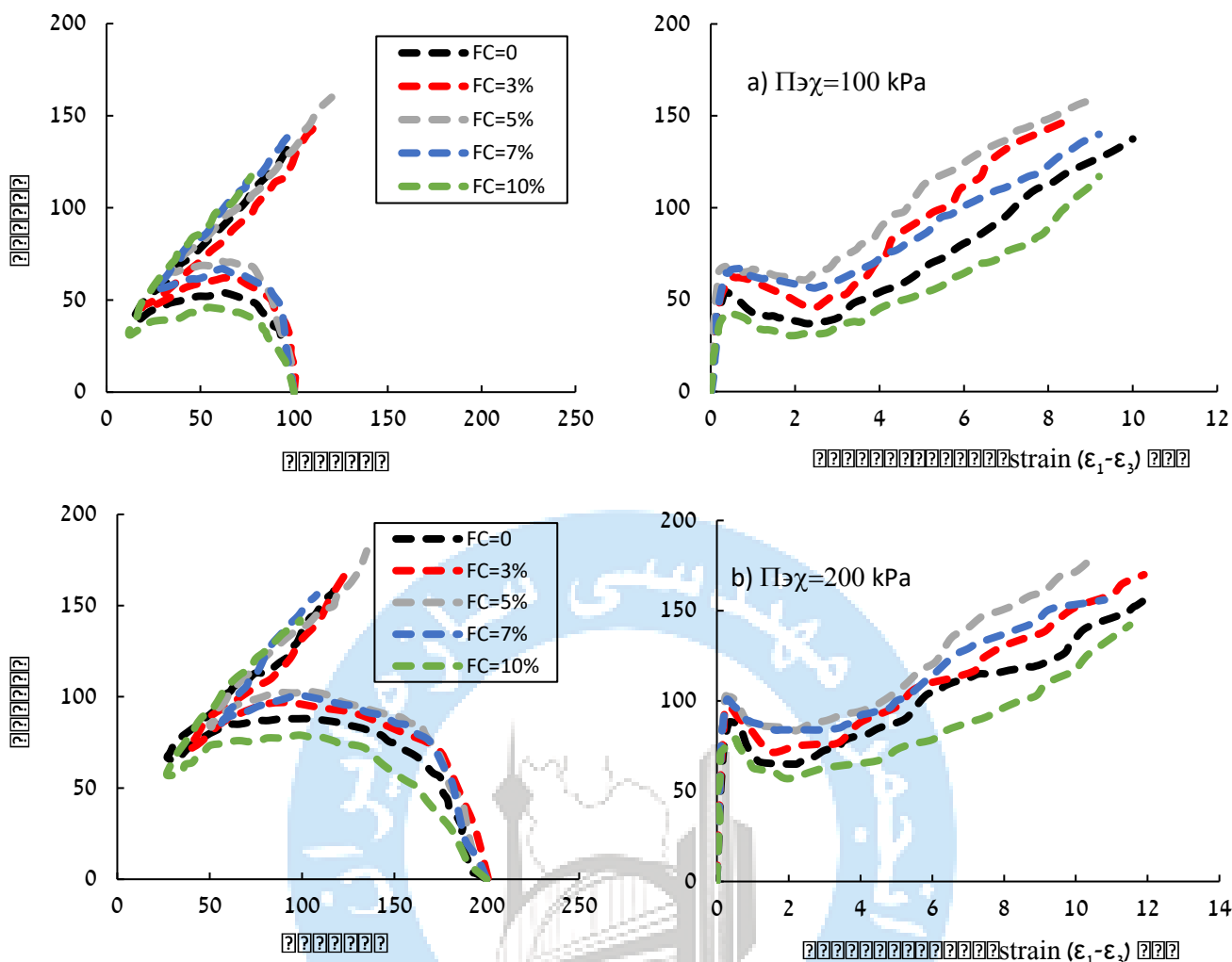
جدول ۲: مشخصات آزمایش های انجام شده با نسبت تخلخل دانه های معادل یکسان با روش تحلیل بازگشتی

D_r^{s*} iii ($e_{g(eq)}$)	D_r^s ii (e)	$e_{g(eq)}$	b	e_g	e_{min}	e_{max}	P'c (kPa)	e'	درصد ریزدانه	مشخصات آزمایش
۴۱/۷	۴۱/۷	۰/۷۳۸	۰	۰/۷۳۸	۰/۵۴۸	۰/۸۷۴	۱۰۰	۰/۷۳۸	۰	SF-0- eg(eq)-100
۴۵	۴۵	۰/۷۲۷	۰	۰/۷۲۷	۰/۵۴۸	۰/۸۷۴	۲۰۰	۰/۷۲۷	۰	SF-0- eg(eq)-200
۴۱	۴۲/۴	۰/۷۳۹	۰/۹	۰/۷۸۷	۰/۵۲۹	۰/۸۸۵	۱۰۰	۰/۷۳۴	۳	SF-3- eg(eq)-100
۴۳/۸	۴۵/۲	۰/۷۲۹	۰/۹	۰/۷۷۷	۰/۵۲۹	۰/۸۸۵	۲۰۰	۰/۷۲۴	۳	SF-3- eg(eq)-200
۴۰/۹	۴۲/۹	۰/۷۴	۰/۹	۰/۸۲۳	۰/۵۱۹	۰/۸۹۲	۱۰۰	۰/۷۳۲	۵	SF-5- eg(eq)-100
۴۳/۲	۴۵/۵	۰/۷۳	۰/۹	۰/۸۱۲	۰/۵۱۹	۰/۸۹۲	۲۰۰	۰/۷۲۲	۵	SF-5- eg(eq)-200
۴۰/۷۵	۴۵/۴	۰/۷۴	۰/۸۵	۰/۸۵۱	۰/۵۰۸	۰/۹	۱۰۰	۰/۷۲۲	۷	SF-7- eg(eq)-100
۴۳/۸	۴۸/۴	۰/۷۲۸	۰/۸۵	۰/۸۳۸	۰/۵۰۸	۰/۹	۲۰۰	۰/۷۱	۷	SF-7- eg(eq)-200
۴۱/۶	۵۲/۳	۰/۷۳۶	۰/۷۴	۰/۸۷۸	۰/۴۹۱	۰/۹۱۱	۱۰۰	۰/۶۹	۱۰	SF-10- eg(eq)-100
۴۴/۸	۵۵/۴	۰/۷۲۲	۰/۷۴	۰/۸۶۴	۰/۴۹۱	۰/۹۱۱	۲۰۰	۰/۶۷۸	۱۰	SF-10- eg(eq)-200

e' : نسبت تخلخل عمومی در انتهای آزمایش

D_r^s ii (e): دانسیته نسبی بر اساس نسبت تخلخل عمومی

D_r^{s*} iii ($e_{g(eq)}$): دانسیته نسبی بر اساس نسبت تخلخل بین دانه های معادل



شکل ۱۱: تأثیر درصد کم سیلت بر رفتار مکانیکی مخلوط ماسه و سیلت با چگالی نسبی بین دانه‌های معادل یکسان

۴- جمع بندی و نتیجه گیری

این مقاله یک بررسی آزمایشگاهی از رفتار ماسه‌ها با محتوای کم سیلت در شرایط زهکشی نشده با استفاده از دستگاه برشی پیچشی استوانه توخالی بر اساس سه مبنای مقایسه‌ای (متغیر حالت) مختلف ارائه می‌کند. یافته‌ها و نتایج اصلی این مقاله را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

۱. هنگامی که متغیرهای حالت مختلف به عنوان مبنای مقایسه برای یک مجموعه داده یکسان استفاده می‌شوند، می‌توان دیدگاه‌های مختلفی را در مورد تأثیر ریزدانه‌ها به دست آورد.
۲. هنگام ارزیابی نتایج با متغیر حالت نسبت تخلخل دانه‌های مشابه (eg)، با افزایش ریزدانه‌های سیلت یک افزایش مقاومت برشی همراه با تغییر رفتار از انقباضی به اتساعی مشاهده می‌شود. این دیدگاه منطقاً با فرضی که در مفهوم نسبت تخلخل دانه‌های (ریزدانه‌ها هیچ کمکی به انتقال نیرو ندارند) ناسازگار است.
۳. هنگام ارزیابی نتایج با متغیر حالت نسبت تخلخل دانه‌های معادل مشابه (eg_{eq}) با استفاده از b_{Rahman}، با افزایش ریزدانه‌های سیلت خاک‌های مخلوط از نظر تنش-کرنش و مسیر تنش مانند ماسه پایه خود رفتار نمی‌کنند و یک افزایش مقاومت برشی همراه با

تغییر رفتار از انقباضی به اتساعی ناشی از کاهش نسبت تخلخل بعد تحکیم مشاهده می‌شود. این نتیجه با درصد کم افزوده شده ریزدانه (تا ۷ درصد) ناسازگار است.

۴. مشکل رویکرد فعلی برای تعیین عامل b بر اساس رابطه b_{Rahman} در FC پایین است که مقدار آن از صفر شروع می‌شود که این فرض ممکن است معتبر نباشد. با در نظر گرفتن رفتار یک ذره ریز در یک ساختار درشت دانه مقدار b از نظر فیزیکی لزوماً صفر نیست و مقدار ۱ به جای صفر در درصد کم ریزدانه توصیه شود.

۵. با نزدیک شدن مقدار ریزدانه به صفر، نسبت تخلخل دانه‌ای معادل صرف نظر از مقادیر b برابر با نسبت فضای عمومی ذرات ماسه خواهد شد، بنابراین الزامی به صفر شدن پارامتر b در FC پایین نخواهد بود.

۶. هنگام ارزیابی نتایج با متغیر حالت نسبت تخلخل دانه‌ای معادل مشابه (eg_{eq}) با استفاده از b تحلیل برگشتی، خاک‌های مخلوط از نظر تنش-کرنش و مسیر تنش مانند ماسه پایه خود رفتار می‌کنند و افزودن درصد‌های مختلف سیلت (۳، ۵، ۷، و ۱۰ درصد) را می‌توان بر روی رفتار ماسه ارزیابی کرد. افزودن ذرات سیلت به ماسه میزبان تا ۵ درصد، حداکثر مقاومت برشی نمونه را حدود ۱۸/۵ درصد افزایش می‌دهد. سپس مقاومت نمونه با افزایش میزان سیلت تا ۱۰ درصد کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که با محتوای سیلت ۱۰ درصد، مقاومت نمونه حدود ۱۲ درصد کمتر از ماسه میزبان بود. لذا نتایج بر خلاف متغیرهای حالت قبلی که تغییر غیر منطقی رفتار از حالت انقباضی به اتساعی با افزودن فقط ۷ درصد سیلت را نشان دادند، یک روند منطقی و قابل دفاع متناسب با درصد ریزدانه افزوده شده را ارائه می‌دهند.

۷. eg_{eq} محاسبه شده با استفاده از b تحلیل برگشتی و دانسیته مرتبط با آن (D_r^{S*}) به عنوان یک شاخص جدید و جایگزین برای خاک‌های مخلوط با بافت غالب ماسه پیشنهاد می‌شود.

مراجع

- [1] Liu, J. (2020). Influence of fines contents on soil liquefaction resistance in cyclic triaxial test. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(5): 4735-4751.
- [2] Li, P., et al. (2024). Undrained shear behavior of silty sand with a constant state parameter considering initial stress anisotropy effect. *Scientific Reports*, 14(1): 2213.
- [3] Cherif Taiba, A., et al. (2016). Insight into the effect of granulometric characteristics on the static liquefaction susceptibility of silty sand soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34: 367-382.
- [4] Karami, A., I. Shooshpasha, and H.A. Alikhani. (2023). Effects of *Sporosarcina Pasteurii*'s on Curing Time and Strength of Silty Sand Soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 41(6): 3289-3304.
- [5] Janalizadeh Choobbasti, A., H. Selatahneh, and M. Karimi Petanlar. (2020). Effect of fines on liquefaction resistance of sand. *Innovative Infrastructure Solutions*, 5: 1-16.
- [6] Ni, Q., et al. (2004). Contribution of fines to the compressive strength of mixed soils. *Géotechnique*, 54(9): 561-569.
- [7] Hazirbaba, K. and E.M. Rathje. (2009). Pore pressure generation of silty sands due to induced cyclic shear strains. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 135(12): 1892-1905.
- [8] Missoum, H., et al. (2013). Laboratory investigation into the effects of silty fines on liquefaction susceptibility of Chlef (Algeria) sandy soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 31: 279-296.
- [9] Guo, C. and Y. Cui. (2020). Pore structure characteristics of debris flow source material in the Wenchuan earthquake area. *Engineering Geology*, 267: 105499.
- [10] Kokusho, T. (2016). Major advances in liquefaction research by laboratory tests compared with in situ behavior. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 91 : 3-22.
- [11] Yang, J. and L. Wei. (2012). Collapse of loose sand with the addition of fines: the role of particle shape. *Géotechnique*, 62(12): 1111-1125.

- [12] Akbari Paydar, N. and M.M. Ahmadi. (2016). Effect of fines type and content of sand on correlation between shear wave velocity and liquefaction resistance. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34: 1857-1876.
- [13] Carraro, J., P. Bandini, and R. Salgado. (2003). Liquefaction resistance of clean and nonplastic silty sands based on cone penetration resistance. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 129(11): 965-976.
- [14] Murthy, T., et al. (2007). Undrained monotonic response of clean and silty sands. *Géotechnique*, 57(3): 273-288.
- [15] Hyodo, M., et al. (2017). Effect of fines on the compression behaviour of poorly graded silica sand. *Geomechanics & engineering*, 12(1): 127-138.
- [16] Patil, U.D., et al. (2017). Modeling critical-state shear strength behavior of compacted silty sand via suction-controlled triaxial testing. *Engineering Geology*, 231: 21-33.
- [17] Porcino, D.D. and V. Diano. (2017). The influence of non-plastic fines on pore water pressure generation and undrained shear strength of sand-silt mixtures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 101: 311-321.
- [18] Cheng, K. and Y. Zhang. (2023). A Cyclic Resistance Ratio Model of Sand-Fines Mixtures Based on Cyclic Triaxial Test. *Geotechnical and Geological Engineering*, 1-13.
- [19] Huang, A.-B. (2016). The seventh James K. Mitchell lecture: Characterization of silt/sand soils. *Proceedings of Geotechnical and Geophysical Site Characterisation 5 (ISSMGE TC-102-ISC'5)*, 3-18.
- [20] Chu, J. and W. Leong. (2002). Effect of fines on instability behaviour of loose sand. *Géotechnique*, 52(10): 751-755.
- [21] Papadopoulou, A. and T. Tika. (2008). The effect of fines on critical state and liquefaction resistance characteristics of non-plastic silty sands. *Soils and foundations*, 48(5): 713-725.
- [22] Mohammadi, A. and A. Qadimi. (2015). A simple critical state approach to predicting the cyclic and monotonic response of sands with different fines contents using the equivalent intergranular void ratio. *Acta geotechnica*, 10: 587-606.
- [23] Akhila, M., K. Rangaswamy, and N. Sankar. (2019). Undrained response and liquefaction resistance of sand-silt mixtures. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37: 2729-2745.
- [24] Lentini, V. and F. Castelli. (2019). Liquefaction resistance of sandy soils from undrained cyclic triaxial tests. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37(1): 201-216.
- [25] Bouri, D.E., et al. (2021). Compression behaviour of Chlef sand and transition of fines content using pressure-dependent maximum void ratios of sand. *Geotechnical and Geological Engineering*, 1-18.
- [26] Rabbi, A.T.M.Z., M.M. Rahman, and D.A. Cameron. (2019). The relation between the state indices and the characteristic features of undrained behaviour of silty sand. *Soils and Foundations*, 59(4): 801-813.
- [27] Bobei, D., et al. (2009). Modified state parameter for characterizing static liquefaction of sand with fines. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(3): 281-295.
- [28] Dash, H. and T. Sitharam. (2011). Undrained cyclic and monotonic strength of sand-silt mixtures. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29: 555-570.
- [29] Cabalar, A.F. (2011). The effects of fines on the behaviour of a sand mixture. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29: 91-100.
- [30] Thevanayagam, S., T. Shenthan, and T. Kanagalingam. (2003) *Role of intergranular contacts on mechanisms causing liquefaction & slope failures in silty sands*. University at Buffalo, State University of New York, Department of Civil.
- [31] Dash, H., T. Sitharam, and B. Baudet. (2010). Influence of non-plastic fines on the response of a silty sand to cyclic loading. *Soils and Foundations*, 50(5): 695-704.
- [32] Zuo, L. and B.A. Baudet. (2015). Determination of the transitional fines content of sand-non plastic fines mixtures. *Soils and Foundations*, 55(1): 213-219.
- [33] Naeini, S. and M. Baziar. (2004). Effect of fines content on steady-state strength of mixed and layered samples of a sand. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 24(3): 181-187.
- [34] Rahman, M.M., S. Lo, and C. Gnanendran. (2008). On equivalent granular void ratio and steady state behaviour of loose sand with fines. *Canadian Geotechnical Journal*, 10(45): 1439-1456.
- [35] Stamatopoulos, C.A. (2010). An experimental study of the liquefaction strength of silty sands in terms of the state parameter. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(8): 662-678.

- [36] Polito, C.P. and J.R. Martin II ,Effects of nonplastic fines on the liquefaction resistance of sands. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 127(5): 408-415.
- [37] Sadek, S. and M. Saleh. (2007). The effect of carbonaceous fines on the cyclic resistance of poorly graded sands. *Geotechnical and Geological Engineering*, 25: 257-264.
- [38] Zhu, Z., et al. (2020). Investigation on the undrained shear strength of loose sand with added materials at various mean diameter ratios. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 137: 106276.
- [39] Karim, M.E. and M.J. Alam. (2017). Effect of nonplastic silt content on undrained shear strength of sand–silt mixtures. *International Journal of Geo-Engineering*, 8: 1-26.
- [40] Mitchell, J. and K. Soga. (1993). *Fundamental of soil behaviour*. 2nd John Wiley & Sons Inc. NY.
- [41] Thevanayagam, S., et al. (2002). Undrained fragility of clean sands, silty sands, and sandy silts. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 128(10): 849-859.
- [42] Bensoula, M., H. Missoum, and K. Bendani. (2015). Critical undrained shear strength of loose-medium sand-silt mixtures under monotonic loadings. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 53(2): 331-344.
- [43] Yang, S., R. Sandven, and L. Grande. (2006). Steady-state lines of sand–silt mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*, 43(11): 1213-1219.
- [44] Thevanayagam, S. and G. Martin. (2002). Liquefaction in silty soils—screening and remediation issues. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(9-12): 1035-1042.
- [45] Zlatović, S. and K. Ishihara. (1995). On the influence of nonplastic fines on residual strength. *Proceedings of IS-Tokio*, 239-244.
- [46] Yang, S., S. Lacasse, and R. Sandven. (2006). Determination of the transitional fines content of mixtures of sand and non-plastic fines. *Geotechnical Testing Journal*, 29(2): 102.
- [47] Rees, S.D. (2010). *Effects of fines on the undrained behaviour of Christchurch sandy soils*. PhD thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- [48] Yang, J., L. Wei, and B. Dai. (2015). State variables for silty sands: Global void ratio or skeleton void ratio? *Soils and Foundations*, 55(1): 99-111.
- [49] Benahmed, N., et al. (2015). An experimental investigation into the effects of low plastic fines content on the behaviour of sand/silt mixtures. *European Journal of environmental and civil engineering*, 19(1): 109-128.
- [50] Huang, Y.-T., et al. (2004). A laboratory study on the undrained strength of a silty sand from Central Western Taiwan. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(9-10): 733-743.
- [51] Dash, H. and T. Sitharam. (2011). Undrained monotonic response of sand–silt mixtures: effect of nonplastic fines. *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, 6(1): 47-58.
- [52] Lieske, W., et al.. (2024). On the Impact of Plastic Fines on the Compaction Characteristics of Sand. *Geotechnical and Geological Engineering*, 1-19.
- [53] Rahman, M.M. and T. Sitharam. (2020). Cyclic liquefaction screening of sand with non-plastic fines: Critical state approach. *Geoscience Frontiers*, 11(2): 429-438.
- [54] ASTM, ASTM. D4253. (2006a). *Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.
- [55] ASTM, ASTM. D4254. (2006b). *Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.
- [56] Miura, S. and S. Toki. (1982). A sample preparation method and its effect on static and cyclic deformation-strength properties of sand. *Soils and foundations*, 22(1): 61-77.
- [57] Bahadori, H., A. GHALANDARZADEH, and I. Towhata. (2008). Effect of non plastic silt on the anisotropic behavior of sand. *Soils and foundations*, 48(4): 531-545.
- [58] Khayat, N., A. Ghalandarzadeh, and M.K. Jafari. (2014). Grain shape effect on the anisotropic behaviour of silt–sand mixtures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 167(3): 281-296.
- [59] Della, N., A. Arab, and M. Belkhatir. (2011). Effect of confining pressure and depositional method on the undrained shearing response of medium dense sand. *Journal of Iberian Geology*, 37(1): 37-44.
- [60] Kim, M. and H. Seo. (2019). Evaluation of one-and two-parameter models for estimation of void ratio of binary sand mixtures deposited by dry pluviation. *Granular Matter*, 21(3): 71.

- [61] Verdugo, R. and K. Ishihara. (1996). The steady state of sandy soils. *Soils and foundations*, 36(2): 81-91.
- [62] Chang, C., et al. (2021). Discussion: Revisiting the concept of inter-granular void ratio in view of particle packing theory. *Géotechnique Letters*, 11(1): 126-129.
- [63] Lashkari, A. (2014). Recommendations for extension and re-calibration of an existing sand constitutive model taking into account varying non-plastic fines content. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 61: 212-238.

