

## ارائه رابطه نیمه تجربی پارامتر درصد ریزدانه فعال (b) برای محاسبه نسبت تخلخل بین دانه‌ای معادل به عنوان متغیر حالت در بررسی رفتار خاک‌های مخلوط

وحید محمدی قلعه عزیز\*<sup>۱</sup>، هادی بهادری<sup>۲</sup>

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۱۰/۱۸

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۱۴

### چکیده

بیشتر رسوبات ماسه حاوی مقادیر مختلف ریزدانه‌های سیلت می‌باشند که تأثیر قابل توجهی بر رفتار خاک مخلوط می‌گذارند. نسبت تخلخل بین دانه‌ای معادل ( $e_{seq}$ ) به عنوان یک متغیر حالت در بررسی رفتار خاک‌های مخلوط در شرایطی که درصد ریزدانه کمتر از مقدار حدی باشد ( $FC < FC_{th}$ )، پیشنهاد می‌شود. نسبت تخلخل بین دانه‌ای معادل به عنوان تابعی از مقدار ریزدانه با پارامتر b بیان می‌شود. این پارامتر به عنوان درصد ریزدانه‌های فعال تعریف می‌شود که توسط برخی از محققین یک مقدار ثابت قابل محاسبه با تحلیل برگشتی از داده‌های تجربی تعریف می‌شود. لذا جمع‌آوری نتایج حاصل از کارهای محققین و پردازش داده‌های خام آن‌ها در یک چارچوب منحصر به فرد می‌تواند به یک رویکرد مؤثر برای ساده‌سازی فرآیند پیش‌بینی رفتار ماسه‌های دارای ریزدانه و ارزیابی پارامتر b منجر شود. برای این منظور، داده‌های حاصل از آزمایش فشاری انجام شده توسط مولفین بر روی نمونه‌های ماسه فیروزکوه با درصد مختلف سیلت و تعدادی از داده‌های خام تجربی استخراج شده از ۱۰ اثر منتشر شده روی ۱۰ نوع خاک مختلف، پردازش، تجزیه و تحلیل گردید و با دخالت دادن پارامترهای مورفولوژی ماسه (زاویه‌دار بودن ذرات ماسه) یک رابطه نیمه تجربی با برازش غیر خطی (مدل ویبول) با دقت بالا برای پارامتر b ارائه گردید.

**کلید واژه‌ها:** نسبت تخلخل بین دانه‌ای معادل، تحلیل بازگشتی، ماسه فیروزکوه، پارامترهای مورفولوژی ماسه، مدل ویبول.

۱. عضو هیات علمی گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی آیین کمال ارومیه، ارومیه va.mohammadi@urmia.ac.ir

۲. عضو هیات علمی گروه مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه، ارومیه h.bahadori@urmia.ac.ir

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه

در طبیعت، خاک ماسه‌ای به ندرت به شکل تمیز و خالص می‌باشد و اغلب دارای مقادیر مختلفی ریزدانه است (خداپرست و همکاران، ۱۴۰۰). تأثیر این ریزدانه‌ها بر پاسخ ماسه‌ها تحت بارگذاری‌های یکنواخت و چرخه‌ای یکی از چالش برانگیزترین مباحث در مهندسی ژئوتکنیک بوده است (Li et al., 2024, Liu, 2020). وجود ریزدانه باعث پیچیده شدن رفتار ماسه می‌شود، بطوریکه می‌تواند ویژگی‌های رفتاری شامل مقاومت استاتیکی، پایداری و حساسیت به روانگرایی را تحت تأثیر قرار دهد. رفتار ماسه‌های حاوی سیلت عمدتاً توسط سه متغیر مقدار ریزدانه، نسبت تخلخل و سطح تنش کنترل می‌شود. آزمایش‌های آزمایشگاهی زیادی برای بررسی رفتار برشی زهکشی نشده مخلوط‌های ماسه و سیلت با در نظر گرفتن عوامل متعددی مانند اندازه دانه، نوع ریزدانه‌ها، فشار همه جانبه و تاریخچه بارگذاری انجام شده‌اند (Mohammadi and Qadimi, 2015, Papadopoulou and Tika, 2008) 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 حالت چگالی، ویژگی‌های مصالح و مقادیر ریزدانه (FC) وجود دارد (محمدی قلعه عزیز و بهادری، ۱۴۰۳، بهادری و محمدی قلعه عزیز، ۱۴۰۳-الف، یازرلو و همکاران، ۱۳۹۸).

## درصد ریزدانه حدی

شکل (۱) طبقه‌بندی ریزساختار خاک را نشان می‌دهد. سه دسته اصلی برای مخلوط خاک‌های دانه‌ای قابل تعریف می‌باشد (Thevanayagam and Martin, 2002).

(الف) دانه‌های ماسه در پاسخ برشی خاک نقش اصلی دارد و ریزدانه‌ها سهم ثانویه دارند که در این بخش ریزدانه کمتر از مقدار ریزدانه حدی می‌باشد ( $FC < FC_{th}$ ). این دسته به سه حالت تماس دانه ثانویه تقسیم می‌شود. حالت (i) ساختار خاکی است که در آن ریزدانه‌ها در فضای خالی بین دانه‌های درشت قرار می‌گیرند و سهمی در چرخه باربری اسکلت توده

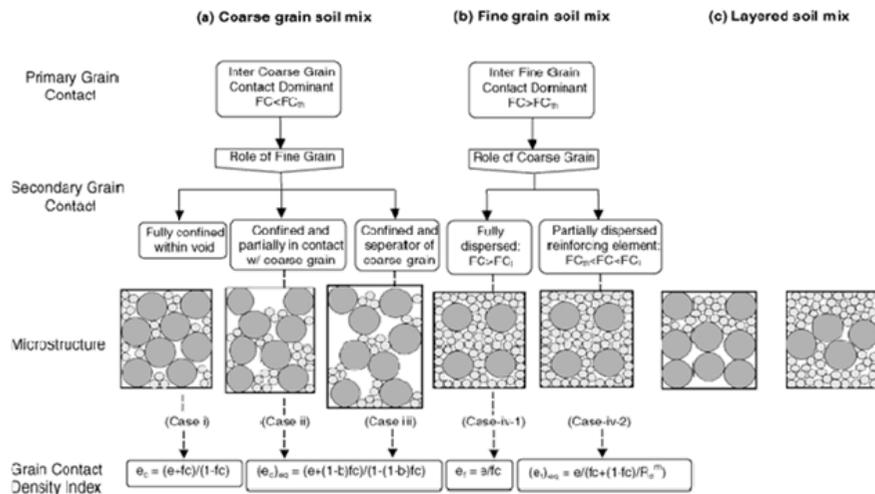
خاک ندارند. اگر فضای خالی بین دانه‌ای به طور کامل با ریزدانه‌ها پر نشده باشد معرف حالت (ii) می‌باشد. در این حالت ریزدانه‌ها تا حدی در چرخه اسکلت دانه دخالت می‌کنند. در حالت (iii) با زیاد شدن ریزدانه، دانه‌های درشت تا حدی از هم جدا می‌شوند. (شکل ۱-a).

(ب) در دسته دوم بخش ریزدانه بیشتر از مقدار ریزدانه حدی می‌باشد ( $FC > FC_{th}$ ). ریزدانه‌ها غالب بوده و دانه‌های درشت کاملاً در ماتریس دانه‌های ریز پراکنده شده‌اند (شکل ۱-b-iv).

(ج) در این دسته، دانه‌های درشت و ریز به صورت لایه لایه قرار گرفته‌اند و لایه‌های دانه درشت هیچ ریزدانه‌ای در خود ندارند یا لایه‌های ریزدانه هیچ درشت‌دانه‌ای در خود ندارند (شکل ۱-c).

## نسبت تخلخل بین دانه‌ای معادل

دو معیار مختلف چگالی نسبت تخلخل عمومی و دانسیته نسبی عمومی در بررسی رفتار مخلوط‌های ماسه-سیلت به عنوان مبنای مقایسه‌ای به طور گسترده استفاده می‌شود. این نسبت تخلخل به عنوان شاخصی برای ارزیابی رفتار مکانیکی برای مصالح درشت دانه در شرایط استاتیک و خاک‌های رسی ریزدانه در شرایط بارگذاری سریع می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. لیکن کاربرد این پارامتر برای طبقه‌بندی ماسه‌های سیلتی با مشکلاتی مواجه می‌باشد (Thevanayagam et al., 2002). محققین زیادی به استفاده از دانسیته نسبی در مقایسه با نسبت تخلخل (به دلیل عدم تمایز بین ماسه و ذرات ریزدانه در خاک در مفهوم نسبت تخلخل) به عنوان رویکرد مناسب‌تر برای توصیف رفتار مکانیکی ماسه سیلتی توصیه می‌کنند (Zhu et al., 2020). در نتیجه، نگرانی‌هایی در مورد مقبولیت  $D_r$  و  $e$  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.



شکل ۱. ساختارهای دانه ای مختلف مخلوط ماسه و ریزدانه (Thevanayagam and Martin, 2002).

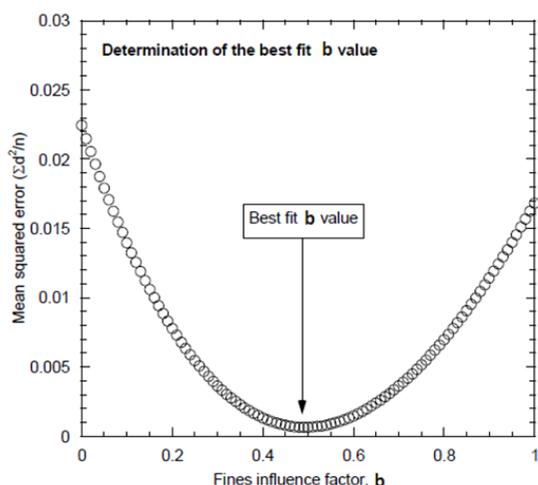
تعیین مقدار b و عوامل مؤثر بر آن در این مقاله به طور جامع مورد بحث قرار خواهد گرفت. ضریب b عامل تاثیرگذار ریزدانه‌ها، درصدی از ریزدانه‌ها را نشان می‌دهد که به ساختار نیرو کمک می‌کند (Rahman et al., 2008, Thevanayagam et al., 2002) و مقدار آن بین ۰ و ۱ متغیر است.

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

$$e_{s(eq)} = \frac{e+(1-b)FC}{1-(1-b)FC} \quad (2)$$

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 (Back-Calculation) از داده‌های تجربی تعیین کرد، بطور مثال مقدار ۰/۲۵ برای تمام درصد ریزدانه‌ها توسط برخی محققین توصیه شده است (Thevanayagam et al., 2002, and Martin, 2002). یانگ و همکاران (Yang et al., 2006) مقدار ۰/۲۵ برای مقادیر ریزدانه زیر ۲۰ درصد و مقدار ۰/۴ برای مقادیر بالای ۲۰ درصد ریزدانه توصیه کرده‌اند. کاررا و همکاران (Carrera et al., 2011) مقدار b برابر با ۰/۸ را به عنوان مقدار بهینه برای خاک‌های مدفون استاوا (Stava) با محتوای ریزدانه کمتر از محتوای ریزدانه حدی تعیین کردند. در روش تحلیل برگشتی

یکی از معیارهای حالت پیشنهادی برای بررسی رفتار خاک‌های مخلوط، در نظر گرفتن ساختار ماسه به طور مستقل از ریزدانه‌ها بود (Shen, 1977). بر اساس این معیار در پاسخ زهکشی نشده یک خاک مخلوط تنها ذرات ماسه عمل کرده و کنترل خاک توسط ماسه صورت می‌گیرد و ریزدانه‌ها در طول بارگذاری هیچ نقشی در زنجیره تحمل نیروی خاک بازی نمی‌کنند. این پارامتر به عنوان نسبت تخلخل بین دانه‌ای (Intergranular Void Ratio- $e_s$ ) طبق رابطه (۱) تعریف می‌شود (Mitchell and Soga, 1993). با توجه به فرض اساسی در این مفهوم نمی‌توان آنرا به عنوان یک متغیر حالت مناسب استفاده کرد (بهادری و محمدی قلعه عزیز، ۱۴۰۳-ب). توانایاگام مفهوم نسبت تخلخل بین دانه‌ای معادل (Equivalent Intergranular Void Ratio- $e_{s(eq)}$ ) را طبق رابطه (۲) به عنوان متغیر حالت برای توصیف رفتار ماسه‌های حاوی ریزدانه معرفی کرد (Thevanayagam et al., 2002). در تعریف این متغیر، سهم ریزدانه‌ها و دانه‌های درشت در تماس‌های بین ذرات به خوبی از یکدیگر متمایز شده است. در نتیجه این واقعیت، همانطور که توسط چندین محقق (Mohammadi and Bahadori, 2024, Rahman et al., 2008)) نشان داده شده است، استفاده از این متغیر به عنوان جایگزین بهتری برای نسبت تخلخل در ماسه‌های حاوی ریزدانه به طور قابل توجهی موفقیت‌آمیز بوده است. با این حال، چالش‌های جدی در تعیین پارامتر فیزیکی b وجود دارد.



شکل ۲. تعیین مقدار مناسب  $b$  برای خاک‌ها به روش تحلیل برگشتی بر اساس نتایج آزمایشگاهی.

#### معیار شکل دانه‌ها

بر اساس مطالعات صورت گرفته در ادبیات فنی عامل تأثیر گذار مهم بر پارامتر  $b$  ویژگی‌های مورفولوژی (به عنوان مثال شکل ذره) می‌باشد که عموماً نادیده گرفته می‌شود. با این وجود، وابستگی رفتار ماکروسکوپی مواد دانه‌ای به مکانیسم‌های میکروسکوپی سطح ذرات اثبات شده است، و این چنین مکانیسم‌های سطح ذرات به طور قابل توجهی تحت تأثیر ویژگی‌های ذرات منفرد، مانند اندازه و شکل قرار می‌گیرند (Andò et al., 2012). لذا شکل ذره به طور قابل توجهی بر پاسخ مکانیکی مواد دانه‌ای تأثیر می‌گذارد و با بسیاری از مشکلات ژئوتکنیکی ارتباط نزدیک دارد. (Ali et al., 2023). خیاط و همکاران (Khayat et al., 2012) مطالعه گسترده‌ای را بر روی خاک‌های مخلوط (ماسه-سیلت) انجام دادند. در این پژوهش تأثیر میزان سیلت بر رفتار سه ماسه میزبان (فیروزکوه، همدان و تهران) مختلف مورد بررسی قرار گرفت. افزودن سیلت به ماسه میزبان می‌تواند تأثیر مهمی بر مقاومت و رفتار آن ایجاد کند. ولی در این تأثیرگذاری شکل دانه ماسه میزبان نقش مهمی ایفا می‌کند. بطوریکه با افزایش گرد گوشگی مقاومت نمونه‌ها کاهش می‌یابد، زیرا گردی دانه‌ها بر پیوند ماسه به ماسه و ماسه به ریزدانه تأثیر می‌گذارد.

که بر پاسخ خاک در آزمایش‌های آزمایشگاهی استوار است، با اختصاص یک مقدار اولیه به  $b$ ، داده‌های حالت پایدار بر حسب  $e_s(eq)$  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. نمونه‌ای از نتایج محاسبه شده به این روش بصورت شماتیک در شکل (۲) ارائه شده است. توضیحات کامل این روش توسط ریس (Rees, 2010) ارائه شده است.

برخی محققین استفاده از روابط ارائه شده را برای تخمین این پارامتر پیشنهاد می‌کنند (Benahmed et al., 2015, Mohammad and Qadimi, 2015). که معادله ارائه شده توسط رحمان و همکاران (Rahman et al., 2008) برای تخمین پارامتر  $b$  از رایج ترین معادلات می‌باشد. خلاصه‌ای از روش‌های محاسبه  $b$  در جدول (۱) ارائه شده است.

با مراجعه به ادبیات فنی، وجود مقادیر  $b$  متعدد برای یک مجموعه داده معین مشاهده می‌شود. به عنوان مثال، برای نتایج آزمایش بر روی یک ماسه آبرفتی مخلوط با ۹ درصد ریزدانه-ها غیر پلاستیکی، مقدار ۰/۷ را برای پارامتر  $b$  برای توصیف مقاومت حالت پایدار یا بحرانی خاک مخلوط ارائه شده است و برای همان داده‌ها با استفاده از رابطه رحمان و همکاران مقدار ۰/۳۳ پیش بینی می‌شود. با توجه به مفهوم عامل تأثیرگذار ریزدانه‌ها، مقدار ۰/۷ پارامتر  $b$  نشان دهنده مشارکت ۷۰ درصد از ریزدانه‌ها در انتقال نیرو می‌باشد، و مقدار ۰/۳۳ مشارکت کمتر از ۴ درصد از ریزدانه‌ها در انتقال نیرو را نشان می‌دهد. بنابراین این معادله برای ارزیابی پارامتر  $b$  و پیش بینی رفتار خاک مخلوط ماسه و ریزدانه دارای نقاط ضعف مهمی می‌باشد، که از آن آن جمله می‌توان به عدم توانایی در پیش بینی رفتار خاک حاوی درصد کم ریزدانه و عدم توجه ویژگی‌های مورفولوژی (به عنوان مثال شکل ذره) می‌باشد که توسط بهادری و محمدی به تفسیر مورد بررسی قرار گرفته است (بهادری و محمدی قلعه عزیز، ۱۴۰۳-ب).

## جدول ۱. خلاصه‌ای از روش‌های تعیین مقدار b.

Reference	Effective Parameter	Formula and Calculation Method
Thevanayagam et al. (2002)	b=constant	Back-Calculation
Rahman et al. (2008)	b=f(FC, $\chi$ )	$b = \left[ 1 - \exp\left(-0.3 \frac{FC/FC_{th}}{1 - \chi^{-0.25}}\right) \right] \left( \frac{1}{\chi} \cdot \frac{FC}{FC_{th}} \right)^{1/\chi}, \quad \chi = D_{10}/d_{50}$
Goudarzy et al. (2016)	b=f( $\chi$ )	b=3.25- $\chi$

ارائه شده، پیش‌بینی رفتار ماسه‌ها به روشی منحصر به فرد بدون نیاز به انجام آزمایش‌ها و ارزیابی پارامتر b می‌باشد. این مطالعه امکان پیش‌بینی پاسخ رفتار ماسه‌ها تنها با استفاده از داده‌های موجود از مصالح و بررسی مسئله پیش‌بینی مقدار b و تسهیل تعیین تجربی آن به عنوان یک نکته کلیدی در به حداقل رساندن تعداد آزمایش‌های مورد نیاز، توسعه داده شده است. بدین منظور از پارامتر زاویه دار بودن ذرات ماسه بر اساس طبقه‌بندی کیفی استاندارد ذرات گرد تا تیز گوشه گزارش شده در منابع استفاده می‌شود و دخالت دادن این پارامتر یک رابطه نیمه تجربی با برازش غیر خطی ارائه می‌شود. لازم به ذکر است تعیین نوع زاویه داری مصالح که در نتایج موثر می‌باشد، بر اساس مطالعات کامل و استفاده از تصاویر میکروسکوپی می‌باشد. مطالعات مربوط به ماسه فیروزکوه نیز توسط مولفین بر همین مبنا ارائه شده است. در شکل (۳) نمونه‌ای از تصاویر مربوط به ماسه فیروزکوه شماره ۱۶۱ ارائه شده است. بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی، با استفاده از تصاویر میکروسکوپ، این ماسه از دانه‌های سیلیسی خرد شده و گرد تشکیل شده است (SA-SR) می‌باشد (بهادری و محمدی قلعه عزیز، ۱۴۰۳-ب).

در ادبیات فنی مطالعات زیادی بر رفتار خاک‌های مخلوط انجام گرفته است، لیکن این مطالعات عموماً بصورت آزمایشگاهی و رفتار شناسی می‌باشد که تاکید بر تاثیر شکل دانه (بطور کلی بر مورفولوژی) دارند. ولی تاثیر مورفولوژی بصورت کمی بر رفتار خاک‌های مخلوط، خصوصاً بر پارامتر تاثیر درصد ریزدانه (b) مورد بررسی قرار نگرفته است.

## ۲. روش تحقیق

مطالعات تجربی متعددی که در مورد تاثیر ریزدانه‌ها بر رفتار ماسه‌ها انجام شده است، یک پایگاه داده ارزشمند و گسترده در این زمینه فراهم کرده است. جمع‌آوری نتایج حاصل از این کارها و پردازش داده‌های خام آنها در یک چارچوب منحصر به فرد می‌تواند به یک رویکرد مؤثر برای ساده‌سازی فرآیند پیش‌بینی رفتار یکنواخت و چرخه‌ای ماسه‌های دارای ریزدانه منجر شود. برای این منظور، تعداد زیادی از داده‌های خام تجربی استخراج شده از ۱۱ اثر منتشر شده قبلی روی ۱۱ نوع خاک مختلف (دو اثر مولفین بر روی یک نوع ماسه و ۱۰ اثر دیگر)، پردازش و تجزیه و تحلیل می‌شوند. با توجه به اهمیت موضوع، مولفین سعی بر استفاده از داده‌های و نتایج معتبر نموده‌اند. تمامی پارامترهای استفاده شده بر اساس مطالعات دقیق آزمایشگاهی ارائه شده‌اند. عملکرد اصلی رویکرد



شکل ۳. تصاویر مربوط به ماسه فیروزکوه شماره ۱۶۱.

### ۳. نتایج

این پژوهش و تعداد زیادی از داده‌های تجربی معتبر استخراج شده از ۱۰ اثر منتشر شده قبلی و با پردازش و تحلیل آنها یک رابطه تجربی با برازش غیر خطی ارائه می‌شود. داده‌ها در جدول (۲) ارائه شده است.

موضوع چالش برانگیز اصلی در بحث نسبت تخلخل بین دانه‌های معادل محاسبه پارامتر  $b$  می‌باشد. لذا در این بخش با بررسی پارامترهای موثر بر این پارامتر و با استفاده از داده‌های

جدول ۲. خلاصه ای از مجموعه داده‌های پردازش شده مولفین و استخراج شده از تحقیقات قبلی.

Soil / Source	$D_{10}$	$D_{50}$	$d_{50}$	$\chi$	$R_d$	$F_C$	Shape	$A_f$	$b_{SSL}$	$\chi_e$	$R_{de}$
Firoozkuh Sand/Silt (Bahadori and Mohammadi, 2024)+ (Bahadori et al., 2008)	0.16	0.27	0.03	5.33	9	3-30	SA-SR	3	0.65	8.33	12
	0.16	0.27	0.03	5.33	9						
	0.16	0.27	0.03	5.33	9						
	0.16	0.27	0.03	5.33	9						
	0.16	0.27	0.03	5.33	9						
F55 Foundry (Thevanayagam et al., 2002)	0.16	0.25	0.01	16	25	7-25	R	0	0.257	16	25
	0.16	0.25	0.01	16	25						
	0.16	0.25	0.01	16	25						
Ottawa sand Sil-Co-Sil 106 (silt) (Murthy et al., 2007)	0.232	0.39	0.024	9.66	16.2	5-15	R	0	0.42	9.66	16.25
	0.232	0.39	0.024	9.66	16.2						
	0.232	0.39	0.024	9.66	16.2						
Toyoura sand- crushed silica (Yang et al., 2015)	0.166	0.198	0.054	3.07	3.66	5-15	SR-SA	1	0.675	4.07	4.66
	0.166	0.198	0.054	3.07	3.66						
	0.166	0.198	0.054	3.07	3.66						
M31 sand and Assyros silt (Papadopoulou and Tika, 2008)	0.18	0.36	0.02	9	18	5-20	R	0	0.431	9	18
	0.18	0.36	0.02	9	18						
	0.18	0.36	0.02	9	18						
Hokksund sand- Chengbei silt (Yang et al., 2006)	0.22	0.45	0.032	6.87	14	5-20	SA	8	0.288	14.8	22.06
	0.22	0.45	0.032	6.87	14						
	0.22	0.45	0.032	6.87	14						
Mai Liao silty sand (Huang et al., 2004)	0.083	0.12	0.044	1.88	2.72	15,30	A	11	0.433	12.9	13.72
	0.083	0.12	0.044	1.88	2.72						
Ardebil sand with Ardebil silt (Naeini and Baziar, 2004)	0.09	0.16	0.032	2.81	5	10-30	SR	0	0.72	2.81	5
	0.09	0.16	0.032	2.81	5						
	0.09	0.16	0.032	2.81	5						
Yatesville sand with Yatesville silt (Polito, 1999)	0.09	0.18	0.031	2.9	5.8	5-35	SR	0	0.65	2.9	5.8
	0.09	0.18	0.031	2.9	5.8						
	0.09	0.18	0.031	2.9	5.8						
	0.09	0.18	0.031	2.9	5.8						
	0.09	0.18	0.031	2.9	5.8						
Monterey sand with Yatesville silt (Polito, 1999)	0.31	0.43	0.031	10	13.8	5-25	SR-SA	1	0.414	11	14.87
	0.31	0.43	0.031	10	13.8						
	0.31	0.43	0.031	10	13.8						

	0.12	0.17	0.01	12	17						
Toyoura	0.12	0.17	0.01	12	17	530	SR-SA	1	0.355	13	18
sand- silt (Zlatović and Ishihara, 1995)	0.12	0.17	0.01	12	17						
	0.12	0.17	0.01	12	17						
	0.12	0.17	0.01	12	17						

Note: The values of the parameter b are provided by researchers based on laboratory results

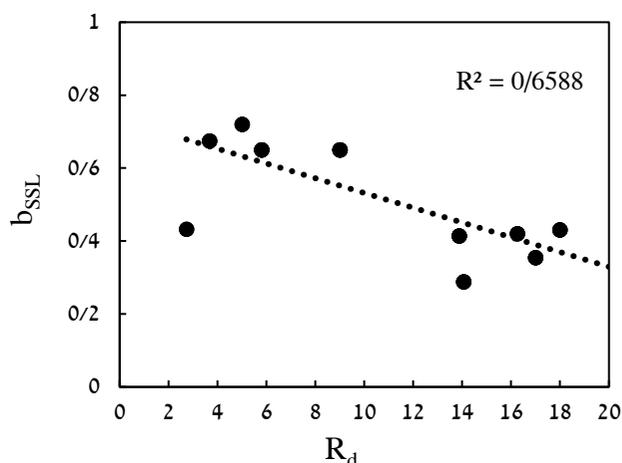
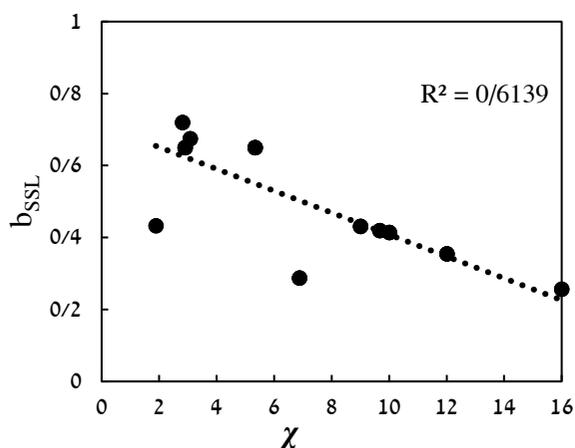
فیزیکی مورد انتظار است، به این صورت که کاهش اختلاف ذرات منجر به فضای خالی کمتر برای ریزدانه‌ها می‌شود، که به نوبه خود منجر به مشارکت بیشتر ریزدانه‌ها در زنجیره نیرو یا مقادیر بالاتر b می‌شود. با وجود این، واضح است که این دو پارامتر به تنهایی به طور رضایت‌بخشی با b همبستگی ندارد. علت این امر می‌تواند عوامل موثر دخیل دیگری مانند ویژگی‌های مورفولوژی (به عنوان مثال شکل ذره) باشد که عموماً نادیده گرفته می‌شود. با این وجود، وابستگی رفتار ماکروسکوپی مواد دانه‌ای به مکانیسم‌های میکروسکوپی سطح ذرات اثبات شده است، و این چنین مکانیسم‌های سطح ذرات به طور قابل توجهی تحت تأثیر ویژگی‌های ذرات منفرد، مانند اندازه و شکل قرار می‌گیرند (Andò et al., 2012). لذا شکل ذره به طور قابل توجهی بر پاسخ مکانیکی مواد دانه‌ای تأثیر می‌گذارد و با بسیاری از مشکلات ژئوتکنیکی ارتباط نزدیک دارد. (Ali et al., 2023). بدین منظور از پارامتر زاویه دار بودن ذرات ماسه بر اساس طبقه‌بندی کیفی استاندارد ذرات گرد تا تیزگوشه گزارش شده در منابع استفاده می‌شود، که بر این اساس 4 دسته بندی کلی را می‌توان مطابق شکل (5) ارائه کرد.

نی و همکاران (Ni et al., 2004) پیشنهاد کردند که مقدار b می‌تواند تابعی از نسبت اندازه ذرات ( $\chi = D_{10}/d_{50}$ ) باشد. کاناگالینگام و توانایاگام (Kanagalingam and Thevanayagam, 2005) و چنگ و دنگ (Chang and Deng, 2019) این موضوع را مورد بحث قرار دادند و با معنی فیزیکی b و برخی داده‌های تجربی وابستگی این پارامتر را به  $R_d$  مطرح کردند ( $R_d = D_{50}/d_{50}$ ). لذا ابتدا امکان ارتباط ضریب b با ویژگی‌های دانه بندی مخلوط اشاره شده در این بخش بررسی می‌شود. از این پس، مقدار b که باعث ایجاد بهترین انطباق بین داده‌های حالت بحرانی و همچنین به حداقل رساندن پراکندگی ممکن در داده‌ها می‌شود،  $b_{SSL}$  نامیده می‌شود. شکل (4) بر اساس داده‌های جدول (2) نشان می‌دهد که مقدار  $b_{SSL}$  را می‌توان برای هر مخلوط ماسه به عنوان تابع خطی  $\chi$  و  $R_d$  طبق روابط (3) و (4) پیش بینی کرد.

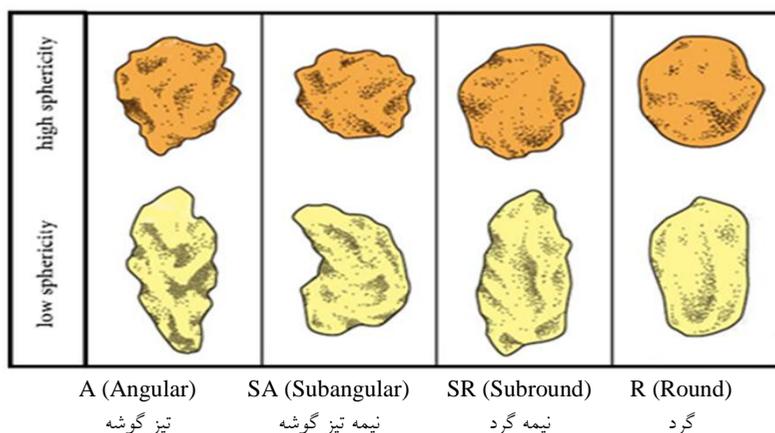
$$b_{SSL} = -0.0304 \chi + 0.7118 \quad (3)$$

$$b_{SSL} = -0.0304 R_d + 0.7118 \quad (4)$$

طبق نتایج یک روند نزولی کلی با افزایش نسبت دو پارامتر ( $R_d$  و  $\chi$ ) مشاهده می‌شود این روند به دلیل ملاحظات



شکل 4. رابطه بین  $b_{SSL}$  و پارامترهای دانه بندی.



شکل ۵. طبقه بندی شکل بصری دانه‌ها (Cherif Taiba et al., 2018).

لذا دو پارامتر جدید اصلاح شده دانه بندی موثر  $\chi_e$  و  $R_{de}$  را طبق روابط (۵) و (۶) می‌توان تعریف کرد، تا به نقاط روی شکل (۴) اجازه جابجایی و همگرایی بیشتر با در نظر گرفتن اثرات زاویه‌داری ذرات داده شود. لذا پارامتر  $A_f$  یا اثر زاویه داری برای کمی سازی این تاثیر تعریف می‌شود. دانه‌های زاویه‌دار تیز گوشه مقادیر  $A_f$  بالاتر و برای دانه‌های گرد مقدار

$A_f \approx 0$  می‌توان در نظر گرفت. محدوده‌های تخمینی  $A_f$  ارائه شده توسط ریس (Rees, 2010) طبق جدول (۳) متناسب با زاویه بندی کیفی دانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که این محدوده‌ها برای خاک ماسه ارائه شده است.

$$\chi_e = \chi + A_f \quad (5)$$

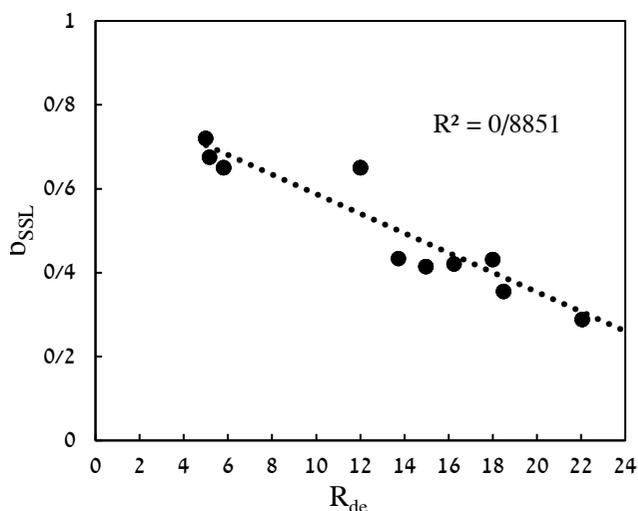
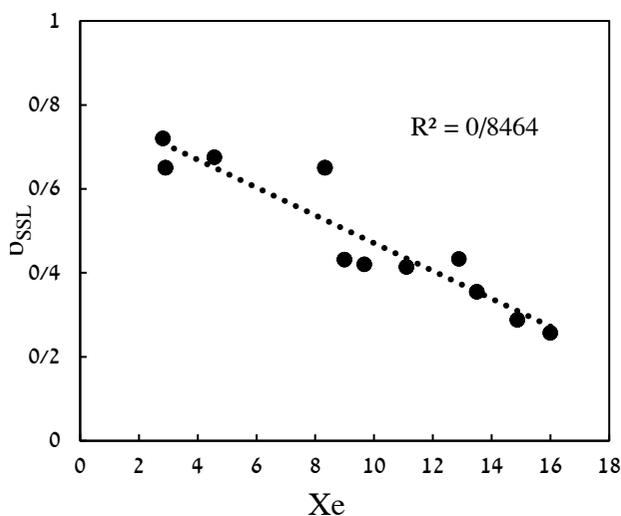
$$R_{de} = R_d + A_f \quad (6)$$

جدول ۳. مقادیر پیشنهادی برای پارامتر زاویه داری دانه‌ها  $A_f$  (Rees, 2010).

Qualitative Angularity	$A_f$	Description	
R and SR	0	-	-
SR - SA	1~3	Subround (SR) with low content of Subangular (SA)	$A_f=1$
		Subround (SR) with high content of Subangular (SA)	$A_f=3$
SA - A	8~11	Subangular (SA) with low content of Angular (A)	$A_f=8$
		Angular (A) materials	$A_f=11$

با استفاده از داده‌های جدول (۲) و (۳)، شکل (۴) مجدداً در شکل (۶) با استفاده از پارامترهای دانه بندی موثر  $\chi_e$  و  $R_{de}$  اصلاح و ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مقدار  $b_{SSL}$  را می‌توان برای هر مخلوط ماسه به عنوان تابع خطی از پارامترهای دانه بندی موثر ( $\chi_e$  و  $R_{de}$ ) طبق روابط (۷) و (۸) با استفاده از کمی سازی معیار زاویه دار بودن دانه‌ها با دقت بیشتری و همبستگی بیشتر داده‌ها ( $R^2$ ) نسبت به پارامترهای دانه بندی ساده پیش بینی کرد. اگرچه این نمودار صرفاً بر اساس توصیفات کیفی زاویه ذرات است، اما می‌توان روند مشخصی را مشاهده کرد. خاک‌های ماسه‌ای با ذرات ماسه‌ای گرد، تمایل به داشتن مقادیر  $b$  بالاتر دارند، در حالی

که خاک‌های با ذرات ماسه‌ای زاویه‌دار، مقادیر  $b$  پایین‌تری دارند. خاک‌های ماسه‌ای با ذرات نیمه تیز گوشه تا نیمه گرد گوشه تمایل دارند در محدوده روند ذرات گرد گوشه یا کمی پایین‌تر قرار گیرند. این ایده که ذرات زاویه‌دار، مقادیر  $b$  پایین‌تری دارند، از این استدلال پیروی می‌کند که ذرات زاویه‌دار، فضاهای خالی بزرگ‌تری ایجاد می‌کنند که به نوبه خود باعث مشارکت کمتر ذرات ریز در زنجیره نیروی خاک می‌شود، از این رو مقادیر  $b$  پایین‌تری دارند. ولی به عنوان نتیجه کلی، می‌توان تغییر در پارامتر  $b$  را ناشی از اندرکنش چندین پارامتر غیر خطی مانند ویژگی‌های دانه بندی و زاویه داری بیان کرد.



شکل ۶. رابطه بین  $b_{SSL}$  و پارامترهای دانه بندی موثر

از آنجایی که  $b_{SSL}$  نماینده مقدار  $b$  از مقادیر مختلف ریزدانه‌ها است، وجود یک رابطه قوی بین  $b_{SSL}$  و ویژگی‌های دانه بندی مخلوط، همانطور که ارائه شد، با وابستگی همزمان مقدار  $b$  به ریزدانه‌ها تناقض ندارد. در نتیجه، مقدار  $b_{SSL}$  را می‌توان با تعداد معقولی از داده‌های حالت بحرانی به طور قابل اعتماد تخمین زد. لذا مقدار  $b$  ارائه شده در این تحقیق باعث می‌شود داده‌های حالت بحرانی انطباق خوبی را در فضای CSL داشته باشند. لازم به ذکر است که رابطه مشتق شده طیف گسترده‌ای از اشکال دانه‌ای از گرد و نیمه گرد تا نیمه تیز گوشه و تیز گوشه را پوشش می‌دهد.

علیرغم یافته‌های جالب به دست آمده از این ارزیابی، و این واقعیت که این روش پیش بینی دارای مبنایی منطقی است، پذیرش تعمیم پذیری آن به همه خاک‌ها همچنان مستلزم تأیید بیشتر با انجام مطالعات تجربی در سایر مخلوط‌های ماسه-ریزدانه است که می‌تواند باعث بروزسانی داده‌ها و روابط ارائه شده شود تا به عنوان مرجعی برای پیش بینی  $b_{SSL}$  استفاده کرد.

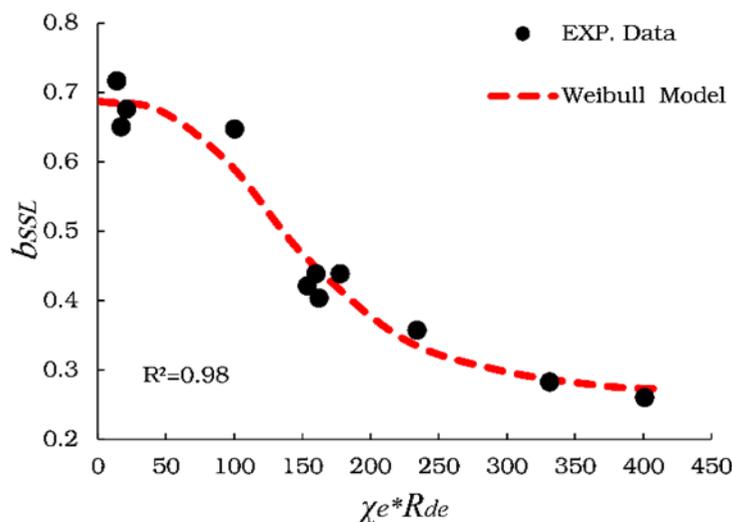
$$b_{SSL} = -0.0332 \chi_e + 0.8 \quad (V)$$

$$b_{SSL} = -0.0232 R_{de} + 0.816 \quad (A)$$

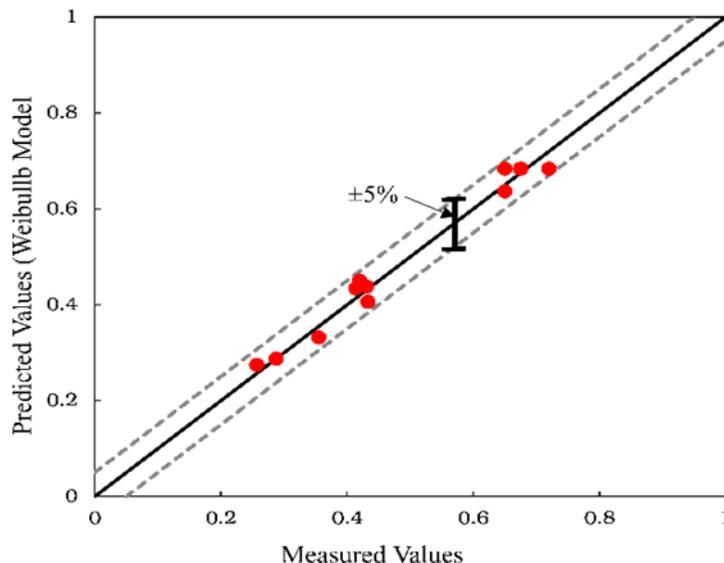
طبق مطالب و نتایج ارائه شده، پارامترهای دانه بندی و میزان تیز گوشه بودن ماسه پتانسیل قابل توجه برای تبدیل شدن به یک روش تعمیم یافته مناسب برای پیش بینی مقدار  $b$  را دارد. لذا برای افزایش دقت و تاثیر همزمان سه عامل ذکر شده از یک برازش غیر خطی با مدل ویبول (Weibull Model) استفاده می‌شود و رابطه (۹) بر اساس شکل (۷) بر اساس نتایج ۱۱ پژوهش (دو اثر مولفین بر روی یک نوع ماسه و ۱۰ اثر دیگر) در ادبیات فنی ارائه می‌شود. برای اعتبارسنجی معادله ارائه شده، شکل (۸) مقایسه‌ای بین مقادیر  $b_{SSL}$  تعیین شده از آزمایش‌های تجربی و پیش‌بینی شده توسط مدل ویبول را نشان می‌دهد. محدوده خطای ثابت  $\pm 5\%$  در شکل رسم شده است. بنابراین، همگرایی خوبی بین مقادیر اندازه‌گیری شده (تجربی) و پیش‌بینی شده توسط مدل وایبل به وضوح مشاهده می‌شود.

$$b_{SSL} = 0.684 - 0.426e^{-1.207e+6(\text{sqrt } \chi_e * R_{de})^{-5.74}} \quad (9)$$

$$R^2 = 0.98$$



شکل ۷. رابطه غیرخطی پیشنهادی بین  $b_{SSL}$  و پارامترهای دانه بندی و میزان تیزگوشه بودن ماسه



شکل ۸. مقایسه بین مقادیر اندازه گیری شده (آزمایشی) و مقادیر پیش بینی شده  $b_{SSL}$  توسط معادله پیشنهادی.

#### ۴. جمع بندی و نتیجه گیری

عمومی ذرات ماسه خواهد شد، بنابراین الزامی به صفر شدن پارامتر  $b$  در  $FC$  پایین نخواهد بود و حتی بایستی از مقادیر بالاتر استفاده کرد.

- محققین زیادی پیشنهاد کردند که مقدار  $b$  می تواند تابعی از نسبت اندازه ذرات باشد، طبق نتایج یک روند نزولی کلی با افزایش نسبت دو پارامتر ( $\chi$  و  $R_d$ ) مشاهده می شود این روند به دلیل ملاحظات فیزیکی مورد انتظار است، به این صورت که کاهش اختلاف ذرات منجر به فضای خالی کمتر برای ریزدانه ها می شود، که به نوبه

- برای اکثر مخلوط های ماسه-سیلت، استفاده از نسبت تخلخل بین دانه ای معادل به جای نسبت تخلخل کلی به عنوان شاخص هایی برای توصیف سهم ریز دانه ها در مخلوط خاک برای  $FC < FC_{th}$  نتایج خوبی را نشان می دهد. با این حال، چالش های جدی در تعیین پارامتر فیزیکی  $b$  وجود دارد. و مقدار آن بین ۰ و ۱ متغیر است.
- با نزدیک شدن مقدار ریزدانه به صفر، نسبت تخلخل دانه ای معادل صرف نظر از مقادیر  $b$  برابر با نسبت فضای

دانه‌ای به مکانیسم‌های میکروسکوپی سطح ذرات اثبات شده است، و این چنین مکانیسم‌های سطح ذرات به طور قابل توجهی تحت تأثیر ویژگی‌های ذرات منفرد، مانند اندازه و شکل قرار می‌گیرند. لذا شکل ذره به طور قابل توجهی بر پاسخ مکانیکی مواد دانه‌ای تأثیر می‌گذارد و با بسیاری از مشکلات ژئوتکنیکی مانند ارتباط نزدیک دارد. ولی روابط مرسوم نسبت تخلخل دانه‌ای معادل فاقد مکانیسم‌هایی برای توضیح این عوامل است.

- ایجاد یک رویکرد مؤثر برای ساده‌سازی فرآیند پیش‌بینی رفتار یکنواخت و چرخه‌ای ماسه‌های دارای ریزدانه امری ضروری است. بنابراین به منظور تأثیر پارامتر زاویه‌دار بودن ذرات ماسه بر اساس طبقه‌بندی کیفی استاندارد ذرات گرد تا تیزگوشه، تعداد زیادی از داده‌های خام تجربی استخراج شده از ۱۱ اثر منتشر شده روی ۱۱ نوع خاک مختلف، پردازش و تجزیه و تحلیل شد و با توجه به استقبال از روابط ریاضی در رفتار شناسی خاک‌های مخلوط، بر اساس نتایج موجود یک رابطه نیمه تجربی با برازش غیر خطی (مدل ویبول) با دقت بالا ارائه شد (محدوده خطای ثابت  $\pm 5\%$ ).

خود منجر به مشارکت بیشتر ریزدانه‌ها در زنجیره نیرو یا مقادیر بالاتر b می‌شود. با وجود این، واضح است که این دو پارامتر به تنهایی به طور رضایت‌بخشی با b همبستگی ندارد.

- خاک‌های ماسه‌ای با ذرات ماسه‌ای گرد، تمایل به داشتن مقادیر b بالاتر دارند، در حالی که خاک‌های با ذرات ماسه‌ای زاویه‌دار، مقادیر b پایین‌تری دارند. خاک‌های ماسه‌ای با ذرات نیمه تیزگوشه تا نیمه گردگوشه تمایل دارند در محدوده روند ذرات گرد گوشه یا کمی پایین‌تر قرار گیرند. این ایده که ذرات زاویه‌دار، مقادیر b پایین‌تری دارند، از این استدلال پیروی می‌کند که ذرات زاویه‌دار، فضاهای خالی بزرگ‌تری ایجاد می‌کنند که به نوبه خود باعث مشارکت کمتر ذرات ریز در زنجیره نیروی خاک می‌شود، از این رو مقادیر b پایین‌تری دارند. ولی به عنوان نتیجه کلی، می‌توان تغییر در پارامتر b را ناشی از اندرکنش چندین پارامتر غیر خطی مانند ویژگی‌های دانه بندی و زاویه داری بیان کرد.
- عامل تأثیر گذار مهم بر پارامتر b ویژگی‌های مورفولوژی (به عنوان مثال شکل ذره) می‌باشد که عموماً نادیده گرفته می‌شود. با این وجود، وابستگی رفتار ماکروسکوپی مواد

## منابع

- بهادری، ه.، محمدی قلعه عزیز، و.، ۱۴۰۳-الف. بررسی آزمایشگاهی رفتار ناهمسان ماسه حاوی مقادیر کم رس کائولین با استفاده از دستگاه برش پیچشی استوانه‌ای توخالی، مجله مهندسی سازه و ساخت، جلد ۱۱، شماره ۶، شهریور، ۶۸-۴۷.
- بهادری، ه.، محمدی قلعه عزیز، و.، ۱۴۰۳-ب. ارزیابی توانایی نسبت تخلخل دانه‌ای معادل به عنوان یک متغیر حالت در بررسی رفتار زهکشی نشده ماسه‌های سیلت دار. مجله مهندسی سازه و ساخت، جلد ۱۱، شماره ۱۲، اسفند، ۴۲-۲۴.
- خداپرست، م.، یوسفعلی، م.، وحیدی نیا، ف.، ۱۴۰۰. بررسی و مقایسه ویژگی‌های مقاومتی خاک‌های ماسه‌ای با تغییر درصد رطوبت و مشخصات بخش ریزدانه. نشریه انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، جلد ۱۴، شماره ۳، آذر، ۱۰۳-۸۹.
- محمدی قلعه عزیز، و.، بهادری، ه.، ۱۴۰۳. تأثیر چرخش جهت تنش اصلی بر مقاومت برشی زهکشی نشده ماسه لای دار. مجله علوم زمین خوارزمی، جلد ۱۰، شماره ۱، ۲۰۷-۱۷۹.
- یازلو، ر.، خامه چیان، م.، نیکودل، م.، ۱۳۹۸. تأثیر رس کائولینیت بر مقاومت خاک ماسه ای در برابر روانگرایی، مطالعه موردی شهرستان گرگان در شمال ایران. نشریه انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، جلد ۱۲، شماره ۴، اسفند، ۴۱-۲۳.

Ali, U., Kikumoto, M., Ciantia, M., Cui, Y., Previtali, M., 2023. Systematic effect of particle roundness/angularity on macro-and microscopic behavior of granular materials. *Granular Matter*, 25(3):

- Andò, E., Hall, S. A., Viggiani, G., Desrues, J., Bésuelle, P., 2012. Grain-scale experimental investigation of localised deformation in sand: a discrete particle tracking approach. *Acta Geotechnica*, 7: 1-13.
- Bahadori, H., ghalandarzadeh, A., Towhata, I., 2008. Effect of non plastic silt on the anisotropic behavior of sand. *Soils and foundations*, 48(4): 531-545.
- Benahmed, N., Nguyen, T. K., Hicher, P. Y., Nicolas, M., 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 .
- Carrera, A., Coop, M., Lancellotta, R., 2011. Influence of grading on the mechanical behaviour of Stava tailings. *Géotechnique*, 61(11): 935-946 .
- Chang, C. S., Deng, Y., 2019. Revisiting the concept of inter-granular void ratio in view of particle packing theory. *Géotechnique Letters*, 9(2): 121-129 .
- Cherif Taiba, A., Mahmoudi, Y., Belkhatir, M., Schanz, T., 2018. Experimental investigation into the influence of roundness and sphericity on the undrained shear response of silty sand soils. *Geotechnical testing journal*, 41(3): 619-633.
- Goudarzy, M., Rahman, M.M., König, D., Schanz, T., 2016. Influence of non-plastic fines content on maximum shear modulus of granular materials. *Soils and Foundations*, 56(6): 973-983.
- Huang, Y.T., Huang, A.B., Kuo, Y.C., Tsai, M.-D., 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.
- Kanagalingam, T., Thevanayagam, S., 2005. Discussion: Contribution of fines to the compressive strength of mixed soils. *Géotechnique*, 55(8): 627-628.
- Khayat, N., Ghalandarzadeh, A., Jafari, M.K., 2014. Grain shape effect on the anisotropic behaviour of silt-sand mixtures. *ICE Proceedings Geotechnical Engineering*, 167(3): 281-296.
- Li, P., Zhu, C., Pan, X., Lv, B., Pan, K., 2024. Undrained shear behavior of silty sand with a constant state parameter considering initial stress anisotropy effect. *Scientific Reports*, 14(1): 2213 .
- Liu, J., 2020. Influence of fines contents on soil liquefaction resistance in cyclic triaxial test. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(5): 4735-4751 .
- Mitchell, J., Soga, K., 1993. *Fundamental of soil behaviour*. 2nd John Wiley and Sons Inc. In: NY.
- Mohammadi, A., Qadimi, A., 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 .
- Mohammadi, V., Bahadori, H., 2024. Influence of Low Silt Content on the Anisotropic Behaviour of Sand. *International Journal of Civil Engineering*, 22(8): 1507-1522 .
- Murthy, T., Loukidis, D., Carraro, J., Prezzi, M., Salgado, R., 2007. Undrained monotonic response of clean and silty sands. *Géotechnique*, 57(3): 273-288 .
- Naeini, S., Baziar, M., 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 .
- Ni, Q., Tan, T., Dasari, G., Hight, D., 2004. Contribution of fines to the compressive strength of mixed soils. *Géotechnique*, 54(9): 561-569 .
- Papadopoulou, A., Tika, T., 2008. The effect of fines on critical state and liquefaction resistance characteristics of non-plastic silty sands. *Soils and foundations*, 48(5): 713-725 .
- Polito, C. P., 1999. The effects of non-plastic and plastic fines on the liquefaction of sandy soils. Ph.D thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Rahman, M. M., Lo, S., Gnanendran, C., 2008. On equivalent granular void ratio and steady state behaviour of loose sand with fines. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(10): 1439-1456 .

- 
- Rees, S. D., 2010. Effects of fines on the undrained behaviour of Christchurch sandy soils. PhD thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand .
- Shen, C., 1977. The effect of fines on liquefaction of sands. Proc. of the 9th ICSMFE ,
- Thevanayagam, S., Martin, G., 2002. Liquefaction in silty soils—screening and remediation issues. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 22(9-12): 1035-1042 .
- Thevanayagam, S., Shenthan, T., Mohan, S., Liang, J., 2002. Undrained fragility of clean sands, silty sands, and sandy silts. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 128(10): 849-859.
- Yang, J., Wei, L., Dai, B., 2015. State variables for silty sands: Global void ratio or skeleton void ratio? Soils and foundations, 55(1): 99-111 .
- Yang, S., Lacasse, S., Sandven, R., 2006. Determination of the transitional fines content of mixtures of sand and non-plastic fines. Geotechnical testing journal, 29(2): 102 .
- Zhu, Z., Zhang, F., Dupla, J.-C., Canou, J., Foerster, E., 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 .
- Zlatović, S., Ishihara, K., 1995. On the influence of nonplastic fines on residual strength. Proceedings of IS-Tokio, 239-244.