



بررسی نقش دانه‌های ریز و درشت در مخلوط‌های خاکی با استفاده از روش اجزای مجزا

سجاد ذوقی، سید احسان سیدی حسینی نیا^۱

^۱دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۳-۲۲
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۵-۰۸
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۵-۰۹
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۵-۲۳

کلمات کلیدی:

روش اجزای مجزا
محتوای درشت‌دانه
محتوای ریزدانه
ضریب مشارکت
حالت حد بحرانی

خلاصه: در مهندسی ژئوتکنیک، قبلاً تصور می‌شد که با افزایش سهم فاز ریزدانه غیرخمیری به فاز درشت دانه باعث افزایش مقاومت برشی خاک و کاهش نسبت تخلخل کلی خاک می‌گردد، در صورتی که طبق نتایج آزمایشگاهی چنین نیست. در این مقاله با استفاده از روش اجزای مجزا، چندین نمونه خاک با مخلوط کردن دو نوع خاک مختلف با فاز درشت دانه و ریزدانه تهیه شده و بصورت دوبعدی تحت بارگذاری دومیحوری قرار گرفتند. دانه‌های مورد استفاده بصورت دایروی در نظر گرفته شدند. بارگذاری نمونه‌ها تا رسیدن به حالت حد بحرانی ادامه یافت. بر طبق نتایج بدست آمده، پارامترهای مربوط به مشارکت سهم بخش‌های درشت دانه و ریزدانه بدست آمدند. بدین منظور، از شاخص‌های تماسی جایگزینی به نام نسبت تخلخل معادل محتوای درشت‌دانه و معادل محتوای ریزدانه استفاده شدند. بررسی نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان از انطباق خوب با نتایج آزمایشگاهی موجود در ادبیات فنی دارد. محتوای ریزدانه آستانه برای مجموعه نمونه‌ها، که بیانگر نقش غالب یکی از دو فاز درشت دانه و ریزدانه است، بدست آمد. شبیه‌سازی‌ها در فضای دوبعدی نشان داد که می‌توان برای خاک‌های با درصد‌های وزنی مختلف فاز درشت و ریز، به حالت حد بحرانی منحصر به خود رسید. اگر از تعریف نسبت تخلخل‌های معادل فاز درشت و ریز استفاده شود، می‌توان به یک خط بحرانی واحد برای مجموعه‌ای از خاک‌ها با درصد‌های وزنی مختلف فاز درشت و ریز رسید. همچنین، در این مقاله، روند تغییرات پارامترهای سهم مشارکت دو فاز درشت و ریز بر حسب درصد ریزدانه بدست آمد.

۱- مقدمه

خاک ماسه‌ای اشاره کرد. در پدیده روان‌گرایی، در اثر بالارفتن فشار آب حفره‌ای و کاهش تنش مؤثر، افت شدید در مقاومت برشی توده خاک بوجود می‌آید. مقاومت در برابر روان‌گرایی خاک ماسه‌ای، تابعی از درصد ریزدانه (مثلاً لای) در آن است. پژوهش‌های اولیه بر روی روان‌گرایی بر اساس مطالعات آزمایشگاهی با ماسه تمیز انجام گرفته بود [۲، ۳]. در گذشته این اعتقاد وجود داشت که افزودن مصالح ریزدانه نظیر لای به ماسه باعث افزایش مقاومت در برابر روان‌گرایی بخاطر پرکردن منافذ بین محتوای درشت‌دانه می‌شود [۴-۶]. از طرف دیگر، در تحقیقات دیگر مشاهده

در بسیاری از موارد، خاک به صورت ترکیبی از دانه‌ها با اندازه‌های مختلف است، بطوری که می‌توان آن را بصورت دو دانه‌بندی مختلف درشت و ریز تعریف کرد. آن دانه‌بندی که از نظر وزنی غالب است، محتوای میزبان نام دارد و دانه‌بندی دیگر که از نظر وزنی، کمتر است، محتوای مهمان گفته می‌شود. این گونه ترکیبات خاک، رفتاری به مراتب متفاوت نسبت به خاک با محتوای میزبان نشان می‌دهند. به عنوان مثال، می‌توان به پدیده روان‌گرایی

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: eseyedi@um.ac.ir



داد. برای درصد‌های بزرگتر محتوای ریزدانه، شاخص‌های دیگری مثل «نسبت تخلخل ریزدانه»^۶ و «نسبت تخلخل معادل ریزدانه»^۷ تعریف شد [۲۶].

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، دلیل تعریف این شاخص‌ها، امکان مطالعه رفتار خاک در قالب مکانیک خاک حالت بحرانی است. در مقالاتی که به آن‌ها اشاره شد، محدوده اضافه کردن محتوای ریزدانه به درشت دانه تا حدود ۳۰ یا ۴۰ درصد بوده است و کمتر به درصد بزرگتر محتوای ریزدانه توجه شده است و لذا، همچنان، لازم است تا بر تأثیر محتوای ریزدانه و درشت دانه در ترکیبات مختلف خاک‌ها مطالعه نمود. از طرف دیگر، نیاز است تا به تأثیر دانه‌ها بر هم و نقش آن‌ها در انتقال نیروی بین دانه‌ای توجه ویژه‌ای داشت.

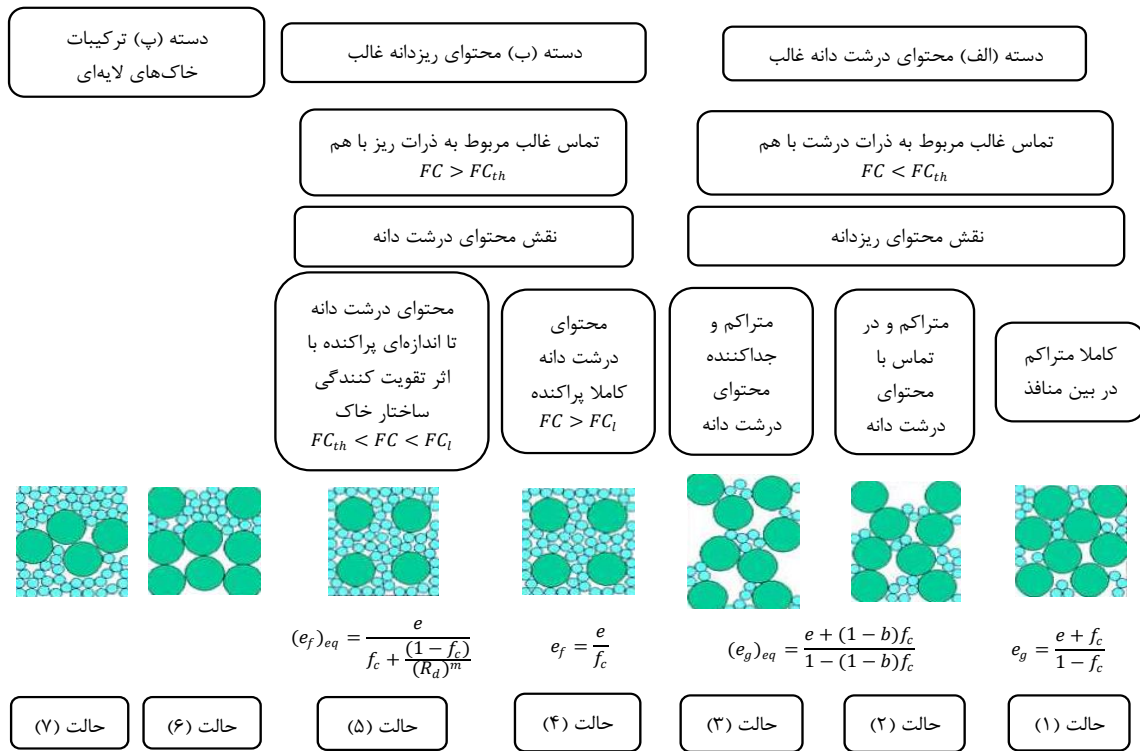
هم‌اکنون، با رشد علوم و تجهیزات رایانه‌ای، می‌توان محیط دانه‌ای را شبیه‌سازی نمود و رفتار بزرگ مقیاس آن را بصورت ریزمقیاس مطالعه کرد. روش اجزای مجزا (DEM^۸) روشی است که در آن، هر دانه بطور جداگانه در نظر گرفته می‌شود و نحوه تماس دانه‌ها با هم تعریف می‌گردد و در نتیجه، می‌توان نقش دانه‌های ریز و درشت در انتقال بار و همچنین، رفتار توده خاک را مطالعه نمود. در زمینه مطالعه خاک‌های مخلوط با دو فاز درشت دانه و ریزدانه از روش عددی اجزای مجزا استفاده شده است. به عنوان مثال به مطالعات انجام گرفته بر روی بررسی تأثیر حفرات فعال و غیر فعال در باربری محیط دانه‌ای [۱۵]، مقدار سختی خاک‌های مخلوط [۲۷]، تأثیر خصوصیات تماسی و مقاومتی تماس‌های بین دانه‌ای [۲۸] و اندازه دانه‌ها و نقش اسکلت شکل یافته [۲۹] اشاره می‌شود. در خصوص مطالعه خاک‌های مخلوط در قالب مکانیک خاک حالت بحرانی، لشکری و کریمی [۳۰] به شبیه‌سازی سه بعدی مخلوط خاک ماسه‌ای به همراه لای پرداختند. آن‌ها با کمک روش اجزای مجزا، رفتار زه‌کشی شده خاک‌های مخلوط را مطالعه کردند و نشان دادند که اثر افزودن ریزدانه بر حالت بحرانی بدست آمده از شبیه‌سازی آزمایش‌های زه‌کشی شده به روش اجزای مجزا کاملاً مشابه الگوی رفتاری مشاهده شده در آزمایش‌های سه محوری زهکشی نشده واقعی

شد که خاکریزهای طبیعی و یا ساخته دست بشر که دارای مقادیر قابل توجهی محتوای ریزدانه در ترکیب با محتوای درشت‌دانه هستند، افت مقاومت برشی دارند [۷-۹]. همچنین، در مطالعات آزمایشگاهی متعددی نشان داده شده است که اضافه شدن مقداری ریزدانه (لای) به فاز درشت دانه (ماسه) می‌تواند مقاومت برشی مخلوط را کاهش داده ولی از یک حد به بعد، مقاومت برشی مخلوط خاک افزایش می‌یابد [۱۰-۱۳]. در چنین خاک‌هایی، توجه به فضا و حفرات فعال و غیرفعال اهمیت پیدا می‌کند [۱۴، ۱۵]. با توجه به توضیحات داده شده، می‌توان گفت که نمی‌توان مقاومت برشی و بطور کلی، رفتار خاک را صرفاً به درصد حجمی یا وزنی بخش ریز یا درشت دانه ربط داد، بلکه لازم است بصورت بهتری به نقش دانه‌های ریز و درشت در انتقال بار میان دانه‌ها توجه نمود.

در سال‌های اخیر، «مکانیک خاک حالت بحرانی» بخوبی توانسته است رفتار خاک را در بارگذاری‌های مختلف توضیح داده و آن را پیش‌بینی کند. طبق مفهوم مکانیک خاک حالت بحرانی، رفتار خاک بر اساس پارامتر «حالت»^۱ که بر اساس سطح تنش و نسبت تخلخل خاک تعریف می‌شود، مطالعه می‌شود. بدین صورت که حالت خاک تحت بارگذاری و در تغییرشکل‌های بزرگ، به یک حالت واحدی^۲ می‌رسد که به آن حالت حد بحرانی یا پایدار^۳ گویند. مطالعه رفتار خاک‌های ترکیبی در قالب مکانیک خاک حالت بحرانی نشان می‌دهد که متاسفانه، این حالت واحد قابل دست‌یابی نیست و نمی‌توان با نسبت تخلخل کلی خاک، به حالت واحدی رسید. برای حل این مشکل، شاخص جایگزینی به نام «نسبت تخلخل درشت‌دانه»^۴ در ترکیب خاک ماسه با رس معرفی گردید [۱۶، ۱۷]. بعد از آن، محققان استفاده از این نسبت تخلخل را به همراه دانه‌های ریز غیرخمیری (لای) اضافه شده به ماسه گسترش دادند [۱۸-۲۳]. توانایاگام [۱۲] پیشنهاد نمود که برای ماسه با محتوای ریزدانه کمتر از ۱۲ درصد می‌توان از «نسبت تخلخل محتوای درشت‌دانه» برای توضیح رفتار مخلوط خاک استفاده کرد. برای مقادیر محتوای دانه‌ها ریز بیشتر از ۲۵ درصد، توانایاگام [۲۴، ۲۵] این نسبت تخلخل را به «نسبت تخلخل معادل درشت‌دانه»^۵ تغییر

-
- 1 State
 - 2 Unique
 - 3 Steady
 - 4 Granular void ratio
 - 5 Equivalent granular void ratio

-
- 6 Interfine void ratio
 - 7 Equivalent interfine void ratio
 - 8 Discrete Element Method



شکل ۱. طبقه بندی دانه‌های خاک‌های شامل دو فاز محتوای ریزدانه و محتوای درشت‌دانه (توانایاگام و همکاران [۱])

Fig. 1. Soil classification based on different amount of coarse and fines content

۲- ساختار دانه‌های مخلوط‌های شامل محتوای درشت‌دانه و ریزدانه

در شرایطی که یک توده خاک از دو فاز درشت دانه و ریزدانه تشکیل شده باشد، رفتار توده خاک تحت تأثیر فاز غالب قرار می‌گیرد. در این تحقیق، منظور از فاز، طبقه بندی دانه‌ها بر اساس درشتی و ریزی است. بر اساس نظر توانایاگام و همکاران [۱] و توانایاگام و مارتین [۲۵]، سه دسته کلی برای رفتار این گونه خاک‌ها مطابق شکل ۱ می‌توان تعریف کرد: در دسته اول، دانه‌های درشت نقش اصلی انتقال بار و تشکیل زنجیره نیرویی را بر عهده دارند و دانه‌های ریز توسط دانه‌های درشت در میان حفرات محبوس می‌شوند. سه حالت مختلف را می‌توان در نظر گرفت: در حالت (۱)، محتوای ریزدانه آنقدر کم هست که ممکن است در تماس با دانه‌های درشت نباشند. با زیادتر شدن محتوای ریزدانه، دانه‌های ریز در تماس با دانه‌های درشت قرار گرفته (حالت ۲) و با بیشتر شدن محتوای ریزدانه، ممکن است فاصله ای میان دانه‌های درشت ایجاد کنند (حالت ۳). در دسته دوم، محتوای ریزدانه نقش

است. خاطر نشان می‌شود که آنها محتوای ریزدانه را فقط برای کمتر از ۳۰٪ در نظر گرفتند.

در تحقیقات عددی انجام شده قبلی، نمونه‌ها بیشتر در حالتی بوده اند که فاز درشت دانه غالب بوده است و کمتر به نقش غالب فاز درشت دانه توجه شده است. در تحقیق حاضر با استفاده از روش اجزای مجزا، نمونه‌های مختلف خاکی بصورت ترکیب دو خاک با دانه بندی درشت و ریز شبیه‌سازی می‌شوند و پس از بارگذاری، رفتار مکانیکی نمونه‌ها مطالعه می‌شوند. در نمونه‌های خاکی، درصد‌های مختلفی از ریزدانه (شامل صفر تا ۱۰۰ درصد) با درشت دانه مخلوط می‌شوند. شبیه سازی‌ها در فضای دوبعدی انجام می‌گیرند و شکل هندسی دانه‌ها بصورت دایره در نظر گرفته می‌شوند. ابتدا هر نمونه خاک بصورت همه جانبه (از ۵۰ تا ۲۰۰ کیلوپاسکال) متراکم شده و سپس تحت بارگذاری انحرافی قرار می‌گیرند. بارگذاری تا رسیدن به حالت بحرانی ادامه می‌یابد. با مقایسه رفتار نمونه‌ها مقادیر شاخص‌های مختلف نسبت تخلخل بدست آمده و سهم مشارکت دانه‌های درشت و ریز مطالعه می‌شوند.

خاک توسط پارامتری مناسب در نظر گرفته شوند. توانایاگام [۲۴]، [۲۵] نسبت تخلخل محتوای درشت‌دانه را مورد بازبینی قرار داد و «نسبت تخلخل معادل محتوای درشت‌دانه» $(e_c)_{eq}$ را به صورت زیر ارائه کرد:

$$(e_c)_{eq} = \frac{e + (1-b)f_c}{1 - (1-b)f_c} \quad 0 < b < 1 \quad (2)$$

در رابطه بالا، b نشان دهنده سهم مشارکت محتوای ریزدانه در زنجیره‌های نیروی گذرنده از ساختار درشت‌دانه است. $b=0$ به این معنا است که هیچ یک از دانه‌های محتوای ریزدانه در پشتیبانی اسکلت محتوای درشت‌دانه عمل نمی‌کند که در این حالت برابر با نسبت تخلخل محتوای درشت‌دانه (e_c) می‌شود. $b=1$ به این معناست که تمامی محتوای ریزدانه بطور مساوی با محتوای درشت‌دانه در اسکلت باربر خاک نقش فعال دارد و برابر با نسبت تخلخل کلی می‌شود. توانایاگام و همکاران [۱] و توانایاگام و مارتین [۲۵] بیان کردند که با انتخاب پارامتر b برابر با ۰/۲۵ می‌توان به خط یک واحد حالت بحرانی (پایدار) برای مخلوط ماسه‌ی لای دار، دست یافت. اما از آن جایی که نمی‌توان مقدار ثابتی برای پارامتر b در تمام درصدهای مختلف محتوای ریزدانه‌ی اضافه شده در نظر گرفت، یانگ و همکاران [۳۵] دامنه‌ای از ۰/۲ تا ۰/۴۵ را برای پارامتر b برای محتوای ریزدانه متغیر از ۲۰ تا ۳۰ درصد وزنی مخلوط خاکی در نظر گرفتند. رحمان و لو [۳۶] رابطه‌ی تجربی را برای تعیین پارامتر b با مقدار محتوای ریزدانه (f_c) ، محتوای ریزدانه آستانه (f_{cth}) و نسبت میان اندازه دانه‌های ریز و درشت (χ) ارائه کردند:

$$b = \left[1 - \exp\left(m \frac{(f_c / f_{cth})^n}{k} \right) \right] \cdot \left(r \frac{f_c}{f_{cth}} \right)^r \quad (3)$$

در رابطه بالا $k = (1 - r^{0.25})$ ، $r = 1 / \chi$ و $\chi = D_{10} / d_{50}$ است. D_{10} اندازه‌ی مؤثر دانه‌های درشت‌دانه میزبان و d_{50} اندازه میانگین دانه‌های محتوای ریزدانه در نمودار دانه‌بندی مربوط به هرکدام است. مقادیر m و n نیز توسط محققان یاد شده به ترتیب برابر با ۰/۳- و ۱/۰ معرفی شده‌اند.

غالب در رفتار کلی توده خاک دارد. بدین صورت که دانه‌های درشت در میان دانه‌های ریز بصورت کاملاً پراکنده و غوطه‌ور قرار می‌گیرند و ارتباطی با هم ندارند (حالت ۴) و یا ممکن است ارتباط کمی با هم داشته و در عمل، نقش تقویت محتوای ریزدانه را داشته باشند (حالت ۵). تمایز قرارگیری توده خاک در دسته اول و دوم بر اساس مقایسه مقدار درصد محتوای ریزدانه (f_c) با درصد ریزدانه آستانه (f_{cth}) مشخص می‌شود، بطوری که اگر $f_{cth} > f_c$ محتوای درشت دانه بر رفتار غالب است و برعکس. دسته سوم توده خاک مربوط به شرایطی است که محتوای درشت دانه و ریزدانه بصورت ناهمگن در کنار هم قرار گرفته‌اند و در تماس با هم هستند. شایان ذکر است توده‌های خاکی مورد نظر در این تحقیق، فقط به توده‌های همگن (دسته اول و دوم) می‌پردازد و دسته سوم خارج از محدوده این مقاله است.

اخیراً برای مطالعه رفتار خاک‌های با دو دانه بندی ریز و درشت، بجای توجه به نسبت تخلخل کلی خاک، شاخص‌های مختلف دیگری تعریف شده است. در شرایطی که درصد محتوای ریزدانه خیلی کم باشد، بطوری که دانه‌های ریز فقط نقش پرکنندگی را داشته باشند (حالت ۱ نشان داده شده در شکل ۱)، شاخصی با نام‌های «نسبت تخلخل محتوای درشت‌دانه» یا «نسبت تخلخل بین دانه‌ای برای محتوای درشت‌دانه» و یا «نسبت تخلخل اسکلتی» تعریف گردید [۱۲، ۱۸-۲۱، ۲۳، ۳۱-۳۳]. چو و لئونگ [۳۴] نشان دادند که همگی آن‌ها یکسان بوده، به طوری که نقش محتوای ریزدانه را در ساختار باربر خاک نادیده می‌گیرند. نسبت تخلخل محتوای درشت دانه (e_c) به صورت زیر تعریف شده است [۱۲]:

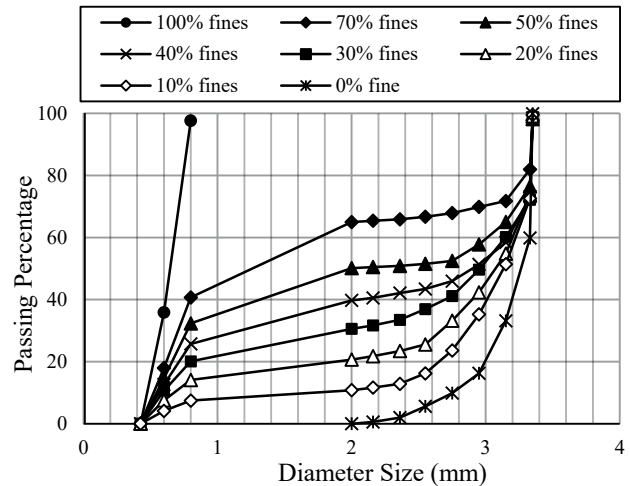
$$e_c = \frac{e + f_c}{1 - f_c} \quad (1)$$

در رابطه‌ی بالا e نسبت تخلخل کلی مخلوط و f_c مقدار محتوای ریزدانه به صورت اعشاری است. برای حالت‌های (۲) و (۳) نشان داده شده در شکل ۱، محتوای ریزدانه اضافه شده می‌تواند باعث جدایی میان دانه‌های درشت گردد. در این دو حالت، شاخص تماسی نسبت تخلخل محتوای درشت‌دانه قابل استفاده نبوده و باید تماس‌های مؤثر دانه‌های ریز در ساختار باربر

۳- شبیه‌سازی آزمونهای دومحوری به روش اجزای مجزا

در این مطالعه، از روش اجزای مجزا برای شبیه‌سازی مطالعه رفتار خاک‌های مخلوط استفاده می‌شود. برای شبیه‌سازی‌ها از دو ماسه با منحنی‌های دانه‌بندی متفاوت برای ایفای نقش محتوای درشت‌دانه و محتوای ریزدانه استفاده شده است. شبیه‌سازی‌ها در فضای دو بعدی انجام گرفته است. به عبارت دیگر، فرض می‌شود که دانه‌های خاک بصورت دیسک دایروی هستند. در این مطالعه، بخش درشت‌دانه شامل دانه‌های با قطرهای متغیر بین ۲/۰ تا ۳/۳۵ میلی‌متر و شامل نه گونه دانه است. بخش ریزدانه از دانه‌های با قطرهای متغیر بین ۰/۴۲۶ تا ۰/۸ میلی‌متر تشکیل شده است. برای ایجاد ترکیب‌های مختلف، درصد‌های مختلف محتوای ریزدانه از صفر تا ۱۰۰ درصد به محتوای درشت‌دانه اضافه شده و هر نمونه خاک شامل ۳۵۰۰ تا ۴۰۰۰ دانه دارد. منحنی‌های دانه‌بندی ترکیبات ایجاد شده نمونه‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. نسبت‌های اختلاط نمونه‌ها بر حسب حجم است. البته خاطر نشان می‌شود با توجه به یکسان در نظر گرفتن جرم مخصوص دانه‌های محتوای ریز و درشت (سنگدانه‌ها) برابر با ۲۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، نسبت وزنی برابر با نسبت وزنی است. شبیه‌سازی‌ها با کمک یک کد رایانه‌ای با نام Ball انجام شده است. این کد با زبان برنامه‌نویسی فرترن نوشته شده است. فرم اولیه این کد اولین بار توسط کاندا [۳۷] نوشته شده و در ادامه، توسط افراد مختلفی ارتقا یافته است [۳۸ و ۳۹]. برای تعیین و یا کنترل درصد محتوای ریزدانه و درشت‌دانه شکل گرفته در هر نمونه، از تعداد دانه‌های تولید شده و حجم آن‌ها (در فضای دوبعدی، منظور مساحت دانه‌های دایروی است)، استفاده شده است.

نمونه‌های خاک تحت آزمون دومحوری فشاری بارگذاری شده‌اند. شکل ۳ مراحل مختلف شبیه‌سازی آزمون دومحوری فشاری را برای یک نمونه با محتوای ۷۰٪ ریزدانه و تحت فشار محصورشدگی ۱۰۰ کیلوپاسکال نشان می‌دهد. اولین مرحله شبیه‌سازی، ساخت و ایجاد نمونه اولیه است. این نمونه به شکل دایره و به قطر اولیه ۴۴ میلی‌متر است. قطر نمونه بر این اساس انتخاب شده است که اندازه نمونه و اثرات مرز نمونه بر رفتار مکانیکی نمونه تأثیری نداشته باشد. با توجه به مراجع فنی آزمایشگاهی نظیر آزمون‌های برش مستقیم و



شکل ۲. نمودار دانه‌بندی نمونه‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی اجزای مجزا

Fig. 2. Soil gradation curves for DEM samples

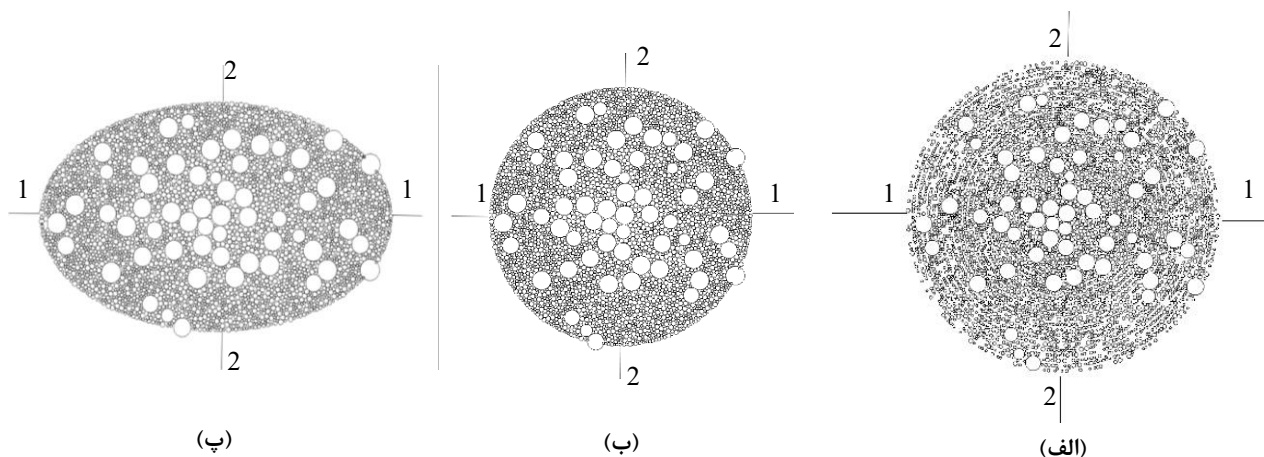
برای دسته‌ی دوم مخلوط و وقتی که محتوای ریزدانه نسبت به محتوای درشت‌دانه غالب می‌شود، پارامترهای دیگری تعریف شده‌اند. برای حالت ۴، توانایاگام [۱۲] پیشنهاد کرد که اثر دانه‌های محتوای درشت‌دانه به کلی نادیده گرفته شود و «نسبت تخلخل محتوای ریزدانه» (e_f) را بصورت زیر تعریف کرد:

$$e_f = \frac{e}{f_c} \quad (4)$$

برای حالت (۵) که در آن، محتوای درشت‌دانه به عنوان عواملی برای تقویت ساختار باربر خاک عمل می‌کند، سعی شد تا بجای رابطه (۴)، از پارامتر جدیدی با نام «نسبت تخلخل محتوای ریزدانه معادل» استفاده شود. توانایاگام [۲۴، ۲۵] نسبت تخلخل محتوای ریزدانه معادل ($(e_f)_{eq}$) را به صورت رابطه (۵) تعریف کرد:

$$(e_f)_{eq} = \frac{e}{f_c + \frac{(1-f_c)}{(R_d)^m}} \quad (5)$$

در رابطه بالا، R_d بصورت D_{50}/d_{50} تعریف شده است. منظور از D_{50} ، اندازه متوسط درشت‌دانه‌های میزبان است.



شکل ۳. نمایش نمونه دارای ۳۰٪ وزنی درشت‌دانه و ۷۰٪ وزنی ریزدانه، (الف) مرحله اول ایجاد توده شل، (ب) توده متراکم شده در فشار همه جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال، (پ) توده برش یافته در آزمون دو محوری در کرنش ۲۵ درصد در امتداد ۲-۲

Fig. 3. Sample containing 70 percent of fine content in different stages of DEM simulation: (a) loosely generated; (b) isotropically compacted; (c) biaxially-loaded assembly

نمونه در هر گام محاسباتی بوده است. این مقدار نرخ بارگذاری طوری انتخاب می شود که آشفتگی تغییرمکانی در نمونه ایجاد نشود و مقدار نسبت نیروی غیرمتعادل شده به نیروی کل وارد شده بر کل نمونه از یک حد مشخص (مثلاً نسبت ۰/۰۰۱) بیشتر نشود. نمونه ها در شرایط تحکیم یافته -زه کشی شده انجام می شوند. مطابق شکل ۳-پ، نمونه دایروی در اثر این نوع بارگذاری تبدیل به یک بیضی می شود. در حین مراحل مختلف شبیه سازی، می توان متغیرهای مختلف تنش و کرنش شامل مولفه های σ_{11} و ϵ_{11} (نشان دهنده مقدار تنش و کرنش در راستای افق) و σ_{22} و ϵ_{22} (نشان دهنده مقدار تنش و کرنش در راستای قائم) در هر مرحله را بدست آورد. مهمترین پارامترهای شبیه سازی در روش اجزای مجزا عبارتند از: سختی فنرهای تماسی برشی (k_s) و عمودی (k_n) و ضریب اصطکاک سطح تماس دانه‌ها با هم (μ). مقدار سختی فنرهای برشی و عمودی مثل هم و برابر با $k_s = k_n = 10^9 \text{ N/m}$ و ضریب اصطکاک برابر با $\mu = 0.5$ در نظر گرفته شد. این ضرایب برای دانه های داخلی و مرزی یکسان هستند. شایان ذکر است چسبندگی برای سطوح تماس دانه‌ها لحاظ نشده است. مقادیر پارامترهای سختی فنرهای تماسی و ضریب اصطکاک بر اساس پارامترهای سطح تماس دانه‌های ماسه کوارتزی انتخاب شده اند که در مراجع مختلف [۳۷-۳۹] در روش اجزای مجزا استفاده می‌شود. خاطر نشان می‌شود که در مرحله

سه محوری، نسبت قطر نمونه به قطر بزرگترین دانه بیشتر از ۱۰ (در اینجا حدود ۱۱ تا ۱۴) انتخاب شده است. در این مرحله، دانه‌های با دانه‌بندی مشخص در داخل این فضای دایروی چیده می شوند. برای ساخت و تولید یک نمونه، از الگوریتمی استفاده شده است که در آن، مکان اولیه قرارگیری دانه‌ها بصورت تصادفی انتخاب می شود و سپس، پراکندگی و توزیع قرارگیری دانه‌ها در داخل نمونه کنترل می‌گردد. بدین منظور، ابتدا دانه‌های درشت تر در داخل نمونه چیده شده و سپس، به ترتیب دانه‌های کوچکتر در میان حفرات دانه‌های درشت‌تر قرار داده می شوند. در نهایت، یک نمونه خاک بصورت توده متراکم نشده شکل می‌گیرد (شکل ۳-الف). با توجه به عدم تماس میان دانه‌ها و تشکیل یک توده شل، در مرحله دوم، نمونه تحت فشار همه جانبه مشخصی (مثلاً ۱۰۰ کیلوپاسکال مطابق شکل ۳-ب) از طریق اعمال نیرو به مرز نمونه متراکم می‌گردد. به عنوان آخرین مرحله شبیه سازی، بارگذاری نمونه بصورت دومحوری انجام می‌شود. در این مرحله، با ثابت نگهداشتن تنش در راستای ۱-۱ و برابر با فشار محصورشدگی، نمونه در راستای ۲-۲ بصورت کرنش-کنترل (از طریق جابه جایی مرز در راستای قائم)، بارگذاری می‌شود و بدین صورت، نمونه تحت بارگذاری انحرافی قرار می‌گیرد. بارگذاری کرنش-کنترل بصورت اعمال جابه جایی در هر گام محاسباتی تعریف شده است که مقدار آن در این مطالعه برابر با ۰/۰۰۲ برابر قطر

عنوان مثال، شکل ۵ مجموعه این چهار دسته نمودار را برای نمونه با محتوای ریزدانه ۷٪ و برای سه تنش جانبه مختلف ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال نشان می دهد. دلیل انجام آزمایش با سه تنش همه جانبه مختلف، یافتن خط حالت بحرانی (CSL) برای هر نمونه بوده است که در دو فضای تنش انحرافی- تنش میانگین و نسبت تخلخل کلی- تنش میانگین قابل حصول است. حالت بحرانی در شرایط انتخاب شده است که تغییرات کلی تنش انحرافی و نسبت تخلخل با تغییرات کرنش محوری ثابت باشد. با اینکه نوساناتی در نمودارها مشاهده می شود، مقدار متوسط نوسانات در نظر گرفته شده است.

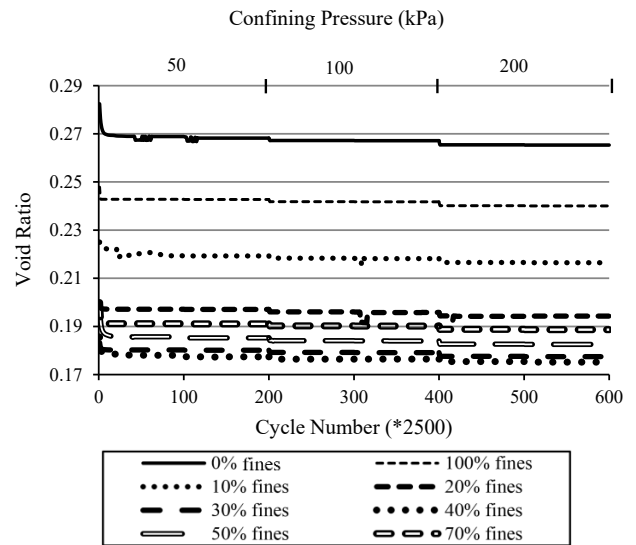
۴- نتایج و بحث

با توجه به توضیحات شرح داده شده در بخش مقدمه مقاله، اولین نکته ای که در بحث ترکیب خاک با دانه بندی ریز و درشت پیش می آید، یافتن فاز غالب (محتوای درشت دانه و یا ریزدانه) است. بدین منظور، لازم است تا مقدار درصد محتوای ریزدانه آستانه ($f_{c_{th}}$) بدست آید. برای تعیین این حد دو روش در ادبیات فنی ارائه شده است. در روش اول، محتوای ریزدانه آستانه می تواند به وسیله نسبت تخلخل کلی نمونه ها در حالت بحرانی مورد محاسبه قرار گیرد. در این روش که توسط رحمان و لو [۳۶] مورد استفاده قرار گرفت، محتوای ریزدانه آستانه برابر با کمینه نسبت تخلخل کلی خاک در حالت بحرانی (e_{cs}) است. شکل ۶ تغییرات نسبت تخلخل کلی در حالت بحرانی (e_{cs}) برای مخلوطهای مختلف را بر اساس درصد حضور محتوای ریزدانه مشخص می کند. همان طور که در شکل ۶ ملاحظه می گردد، مقدار محتوای ریزدانه آستانه بر اساس این روش برابر ۴۰ درصد وزنی (و یا حجمی) بدست می آید.

در روش دوم که براساس جمع آوری اطلاعات حاصل از آزمونهای آزمایشگاهی مختلف بدست آمده و توسط رحمان و لو [۳۶] به تکامل رسیده است، محتوای ریزدانه آستانه از رابطه (۶) محاسبه می گردد:

$$f_{c_{th}} = 0.4 \left(\frac{1}{1 + \exp(\alpha - \beta\chi)} + r \right) \quad (6)$$

که در آن، مقادیر α و β به ترتیب برابر با ۰/۵ و ۰/۱۳ پیشنهاد شده است. نمودار تغییرات $f_{c_{th}}$ با نسبت در شکل ۷ ارائه شده است. در این شکل، مقادیر آزمایشگاهی حاصل از تحقیقات تجربی



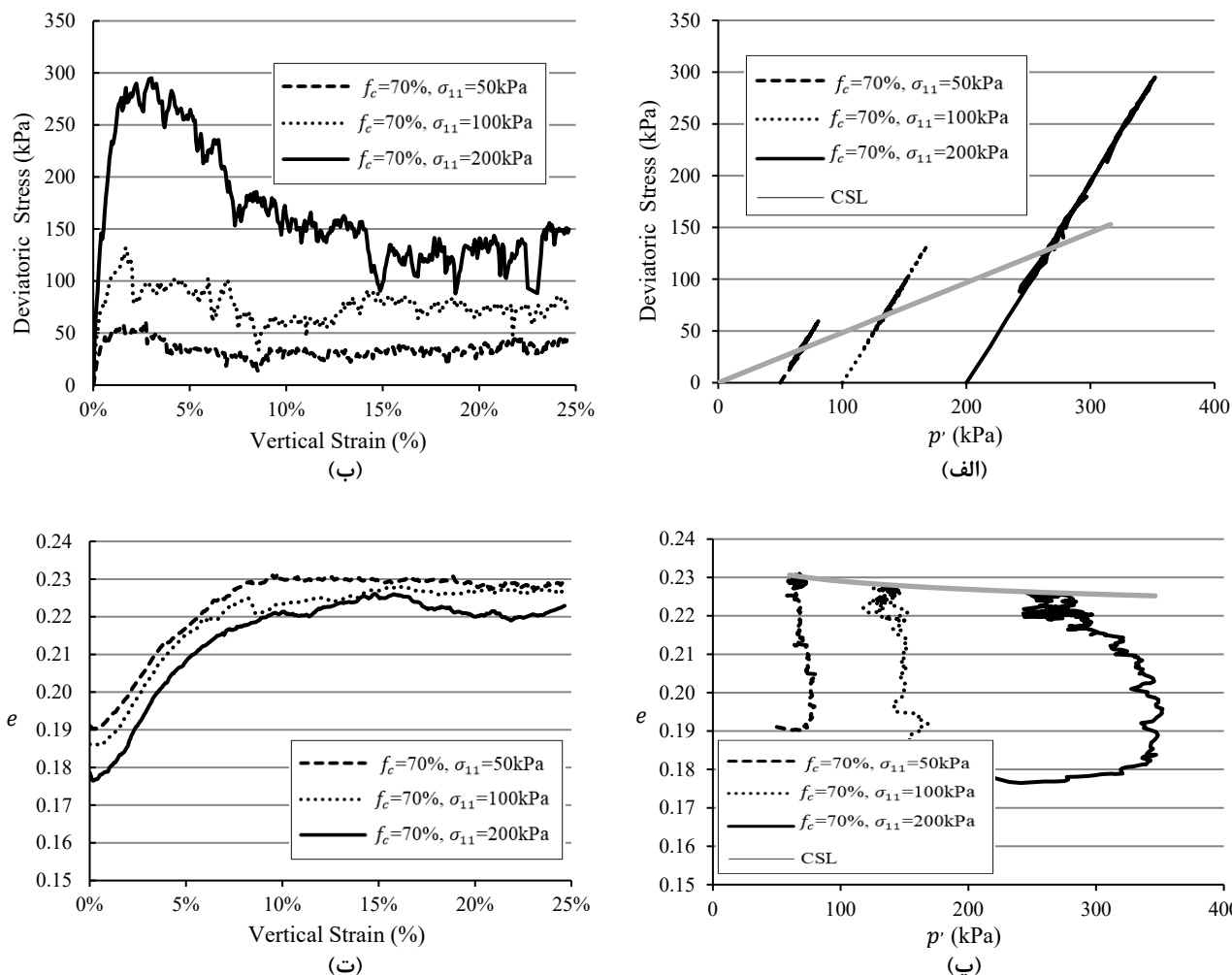
شکل ۴. تغییرات نسبت تخلخل کلی مخلوطهای خاکی در برابر تعداد چرخه

Fig. 4. Traditional void ratio of soil assemblies in different stages of compaction

ساخت اولیه و تراکم نمونه ها، ضریب اصطکاک دانه ها برابر با صفر انتخاب شده تا نمونه ها تا حد امکان متراکم شوند.

همانطور که گفته شد، مرحله دوم شبیه سازی شامل اعمال تنش محصورشدگی و یا همه جانبه است. بدین صورت که بارگذاری و تعداد گام های محاسباتی آنقدر ادامه پیدا می کند که اولاً تنش در داخل مجموعه به مقدار مورد نظر برسد و دوم اینکه، تغییر حجم نمونه به صفر برسد. اعمال تنش همه جانبه بصورت پله ای مطابق شکل ۴ انجام شده است. در این شکل مشاهده می شود که نمونه ها (با درصد محتوای ریزدانه برابر با صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰٪) تحت سه فشار همه جانبه مختلف (۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال) متراکم شده و در پایان هر فشار، تغییرات حجم ناچیز شده است.

جهت بررسی رفتار نمونه ها، نمودارهای تنش انحرافی (σ_{11}) - σ_{22} بر حسب کرنش قائم (کرنش در راستای ۲-۲)، تنش انحرافی بر حسب تنش میانگین ($p' = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{2}$)، تغییرات نسبت تخلخل کلی (e) بر حسب کرنش قائم و تغییرات نسبت تخلخل کلی بر حسب تنش میانگین، برای هر مخلوط به صورت جداگانه رسم و بررسی شده است. هر نمونه تحت سه تنش همه جانبه ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال بارگذاری شده اند. با در نظر گرفتن هشت درصد اختلاط مختلف، در مجموع ۲۴ آزمون دومیحوری شبیه سازی شده است. به



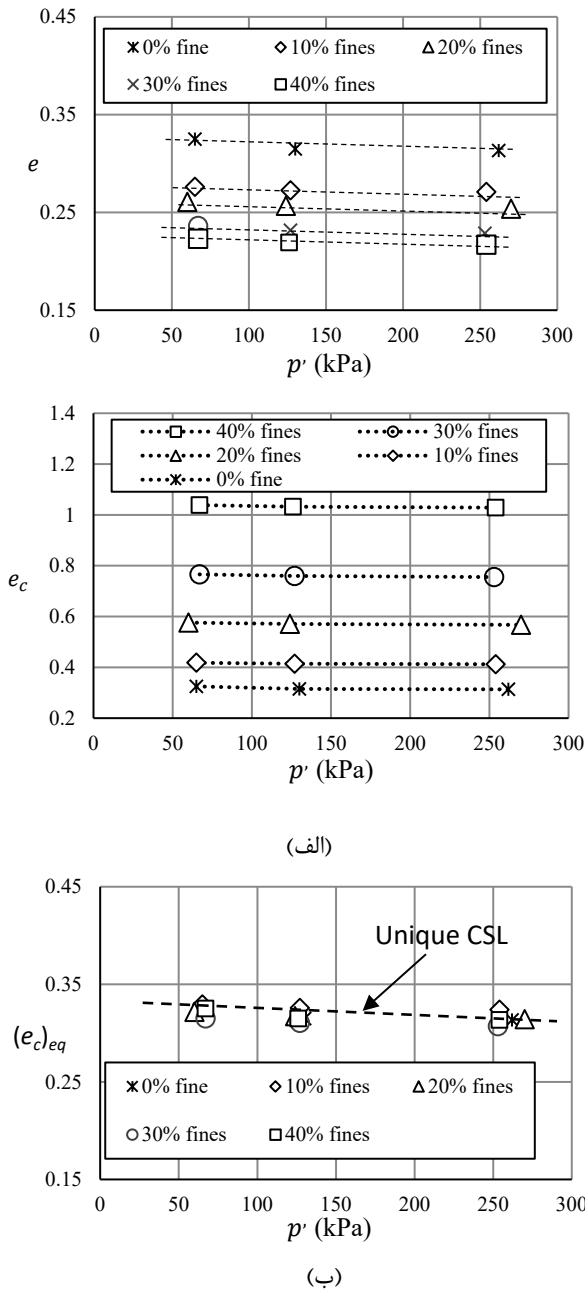
شکل ۵. منحنی تغییرات (الف) تنش انحرافی بر حسب تنش میانگین، (ب) تنش انحرافی بر حسب کرنش قائم، (پ) تغییرات نسبت تخلخل کلی بر حسب تنش میانگین و (ت) تغییرات نسبت تخلخل کلی بر حسب کرنش قائم برای نمونه با ۷۰٪ محتوای ریزدانه

Fig. 5. Changes in: (a) deviatoric stress with mean stress; (b) deviatoric stress with vertical strain; (c) void ratio with mean stress; (d) void ratio with vertical strain for assemblies containing 70 percent fines particles

در نظر گرفته می شود.

با یافتن حد محتوای ریزدانه آستانه، می توان گفت که نمونه های با درصد محتوای ریزدانه صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد، جزء دسته اول توده های خاک قرار می گیرند که در آن ها، دانه های درشت نقش اساسی در انتقال نیرو میان دانه های توده خاک را ایفا می کنند. در شکل ۸، مقادیر مختلف تعریف های نسبت تخلخل در حالت بحرانی برای این نمونه ها را نشان می دهد. شکل ۸-الف، مقدار نسبت تخلخل کلی نمونه ها را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، هر یک از نمونه ها بر روی یک خط بحرانی مختص بخود قرار گرفته اند و در نتیجه، با در نظر گرفتن نسبت تخلخل کلی، نمی توان همه

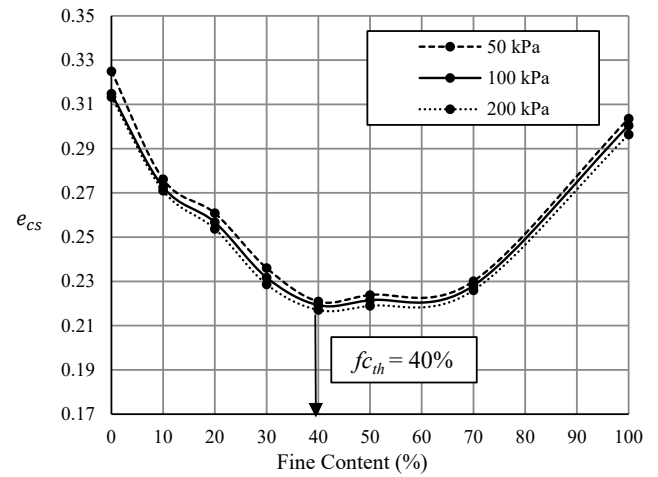
مختلف [۴۵-۴۰، ۳۵، ۲۵، ۱] نیز نشان داده شده اند. همان طور که مشاهده می شود، با افزایش نسبت χ تا ۵/۵، محتوای ریزدانه آستانه تا حد ۳۰ درصد کاهش یافته و با افزایش بیشتر نسبت χ ، مقدار $f_{c_{th}}$ تا ۴۰٪ افزایش یافته و سپس ثابت می ماند. در تحقیق حاضر با داشتن $\chi = D_{10} / d_{50} = 4.14$ ، مقدار محتوای ریزدانه آستانه برابر با $f_{c_{th}} = 38\%$ بدست می آید. خاطر نشان می شود تحقیقات گذشته بر اساس نتایج بر روی ماسه و در شرایط سه بعدی بوده، ولی نتیجه بدست آمده در این تحقیق، در فضای دو بعدی انجام شده است. با این حال، مقادیر بدست آمده از دو روش انطباق خوبی با هم دارند. در این تحقیق، مقدار $f_{c_{th}} = 40\%$ به عنوان محتوای ریزدانه آستانه



شکل ۸. تغییرات (الف) نسبت تخلخل کلی، (ب) نسبت تخلخل محتوای درشت‌دانه، (پ) نسبت تخلخل معادل محتوای درشت‌دانه بر حسب تنش میانگین برای حالت بحرانی نمونه‌های با درصد ریزدانه کمتر از حد آستانه (فاز درشتدانه غالب است).

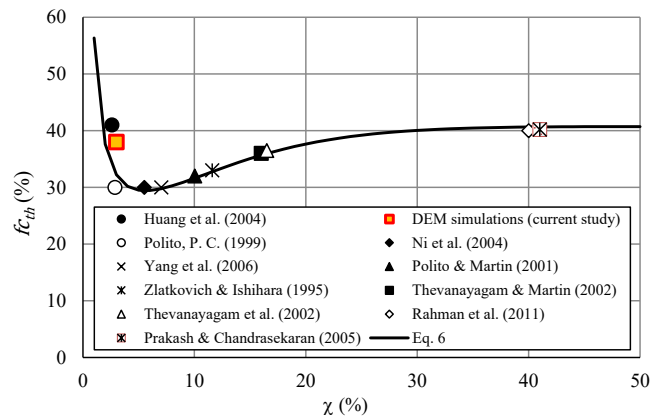
Fig. 8. Variation of (a) traditional void ratio; (b) intergranular void ratio; (c) equivalent granular void ratio with mean effective stress at critical state for assemblies with fine particles less than threshold fines content

حالت بحرانی رسید. در نتیجه، برای رسیدن به یک خط واحد حالت بحرانی، لازم است از تعریف نسبت تخلخل معادل درشت‌دانه (رابطه ۲) استفاده کرد. در این صورت، می‌توان مقدار پارامتر b را طوری



شکل ۶. تغییرات نسبت تخلخل کلی نمونه‌ها در حالت بحرانی با مقادیر مختلف محتوای ریزدانه

Fig. 6. Void ratio at critical state of soil assemblies containing different amount of fines content



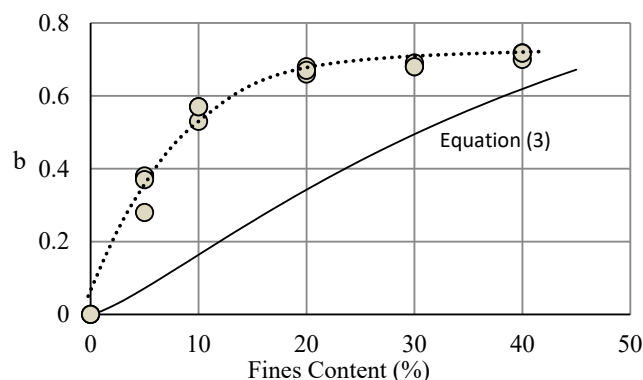
شکل ۷. تغییرات محتوای ریزدانه آستانه با مقادیر مختلف نسبت دانه‌ها

Fig. 7. Threshold variation of fines content with particle diameter ratio (c)

این نمونه‌ها را در قالب مکانیک خاک حالت بحرانی مطالعه نمود. اگر از تعریف نسبت تخلخل محتوای درشت‌دانه (e_c) مطابق رابطه (۱) استفاده شود، همچنان مشاهده می‌شود که رسیدن به یک خط واحد حالت بحرانی برای این نمونه‌ها امکان‌پذیر نیست. یادآوری می‌شود که استفاده از نسبت تخلخل محتوای درشت‌دانه مطابق رابطه (۱) مربوط به حالتی است که درصد دانه‌های ریزدانه آنقدر کم است که فقط نقش پرکنندگی میان دانه‌های درشت را بازی می‌کنند. در نتیجه، انتظار می‌رود که با این معیار هم، نتوان به یک خط واحد

هوانگ و همکاران [۴۱] و رحمان و همکاران [۴۴] مطابق شکل ۱۰-الف، شکل دانه‌ها هر دو بخش درشت دانه (ماسه) و ریزدانه (لای) تیزگوشه بوده است. یانگ و همکاران [۳۵] در آزمون‌های خود از ماسه‌ی نیمه تیزگوشه (به عنوان محتوای درشت دانه) و ماسه‌ی نیمه تیزگوشه تا تیزگوشه (به عنوان فاز ریزدانه) استفاده کردند. توانایاگام و همکاران [۱] از ماسه ای درشت با شکل دانه‌های نیمه گردگوشه و ماسه ریزتر با شکل دانه‌های تیزگوشه بهره گرفتند. در تحقیق‌های وحیدی نیا و همکاران [۴۷] شکل دانه‌های درشت از نیمه تیزگوشه تا گردگوشه متغیر بوده و شکل دانه‌های ریز نیمه تیزگوشه بوده است. با مقایسه نمودارها، می توان گفت که شکل هندسی دانه‌ها نقش مهمی در روند تغییرات b دارد. طبق مشاهدات، رابطه تجربی رحمان و لو [۳۶] برای خاک با محتوای دانه‌های تیزگوشه (هر دو محتوای درشت دانه و ریزدانه) تطابق خیلی خوبی دارد. ولی اگر شکل هندسی محتوای درشت دانه که نقش اساسی در باربری اسکلت دانه‌ها را دارد، بسمت گردگوشگی حرکت کند، روند افزایش پارامتر b افزایش یافته و در نتیجه، مقدار پارامتر b افزایش می یابد. این رفتار را می توان بدین صورت توضیح داد که با افزایش گردگوشگی دانه‌های درشت، قفل و بست کمتری میان دانه‌ها (نسبت به حالت تیزگوشگی) بوجود می آید و در نتیجه، سهم مشارکت دانه‌های ریز در کل توده افزایش می یابد. خاطر نشان می شود در تحقیق دیگری که قبلاً توسط لشکری [۴۸] انجام شده است، رابطه تجربی ارائه شده توسط رحمان و لو [۳۶] (رابطه ۳) بطور کامل تری مورد بررسی و نقد قرار گرفته است. او نشان داد که مقدار b وابسته با شکل دانه های هر دو فاز درشت دانه و ریزدانه است.

با افزایش درصد محتوای ریزدانه (بیشتر از حد آستانه)، رفتار توده خاک بر اساس فاز ریزدانه تعیین می شود. در این حالت، از نسبت تخلخل بخش ریزدانه استفاده می شود. شکل ۱۱ مقدار تعاریف مختلف نسبت تخلخل بر حسب فشار همه جانبه میانگین در حالت بحرانی را برای نمونه های با درصد محتوای ریزدانه ۵۰٪، ۷۰٪ و ۱۰۰٪ را نشان می دهد. در شکل ۱۱-الف نسبت تخلخل کلی نمونه ها نمایش داده شده اند. همان طور که انتظار می رود، برای هر دسته از نمونه ها، خط حالت بحرانی شکل گرفته است. ولی این دسته خطوط برهم منطبق نیستند. بجای نسبت تخلخل کلی، از «نسبت تخلخل بخش ریزدانه» (رابطه ۴) استفاده می شود، طبق شکل ۱۱-ب

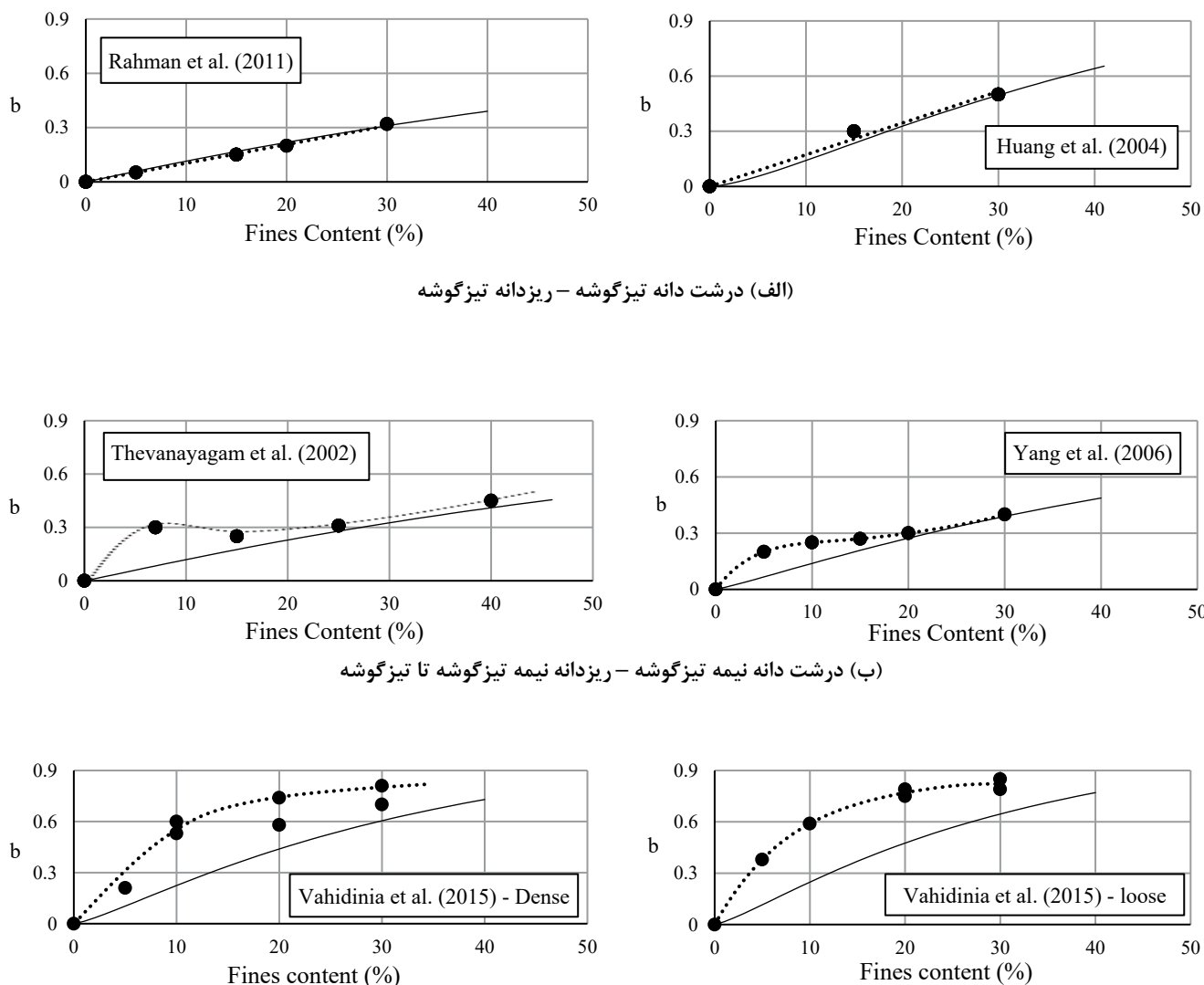


شکل ۹. تغییرات مقدار پارامتر b با درصد محتوای ریزدانه برای تحقیق حاضر و مقایسه آن با رابطه تجربی رحمان و لو [۳۶] (رابطه ۳)
 Fig. 9. Comparison of b parameter between the values derived from equation (3) and DEM simulation

تعیین نمود که همگی نمونه ها بر روی یک خط واحد حالت بحرانی، مطابق شکل ۸-پ، قرار گیرند.

سهم مشارکت محتوای ریزدانه (b) برای تمام نمونه های با فاز غالب درشت دانه با کمک محاسبه معکوس از رابطه (۲) بدست می آید، بطوری که بتوان برای تمام این نمونه ها، به یک خط حالت بحرانی واحد رسید. مقادیر b محاسبه شده برای نمونه های این تحقیق در شکل ۹ ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود، مقدار b در درصدهای ریزدانه تا ۲۰ درصد، به سرعت رشد کرده و به مقدار ۰/۷ می رسد و سپس تقریباً تا درصد ریزدانه ۴۰٪ (حد آستانه) ثابت می ماند. در همین شکل، مقدار پارامتر b که بر اساس رابطه تجربی رحمان و لو [۳۶] (رابطه ۳) محاسبه می شود، نیز ارائه شده است. مشاهده می شود که رابطه (۳) تقریباً بصورت خطی با درصد ریزدانه افزایش می یابد و در عین حال، مقادیر کمتری را نتیجه می دهد. برای بررسی بیشتر اختلاف مشاهده شده، مقدار پارامتر b برای نتایج آزمایشگاهی مختلف در ادامه ارائه می شود.

مقدار پارامتر b برای چندین دسته از آزمون های آزمایشگاهی مطابق شکل ۱۰ محاسبه شده و برای هر دسته از آزمون ها، پارامتر b حاصل از رابطه (۳) نیز ارائه شده است. همان طور که در شکل ۱۰ مشاهده می شود، اختلاف میان آزمون های آزمایشگاهی موردنظر، شکل هندسی دانه‌های بکارگرفته شده در آزمایش ها است. در خصوص تقسیم بندی شکل دانه‌ها از نظر گردگوشگی یا تیزگوشگی، از معیار پاورز [۴۶] استفاده شده است. بر این اساس، در آزمون‌های



(الف) درشت دانه تیز گوشه - ریزدانه تیز گوشه

(ب) درشت دانه نیمه تیز گوشه - ریزدانه نیمه تیز گوشه تا تیز گوشه

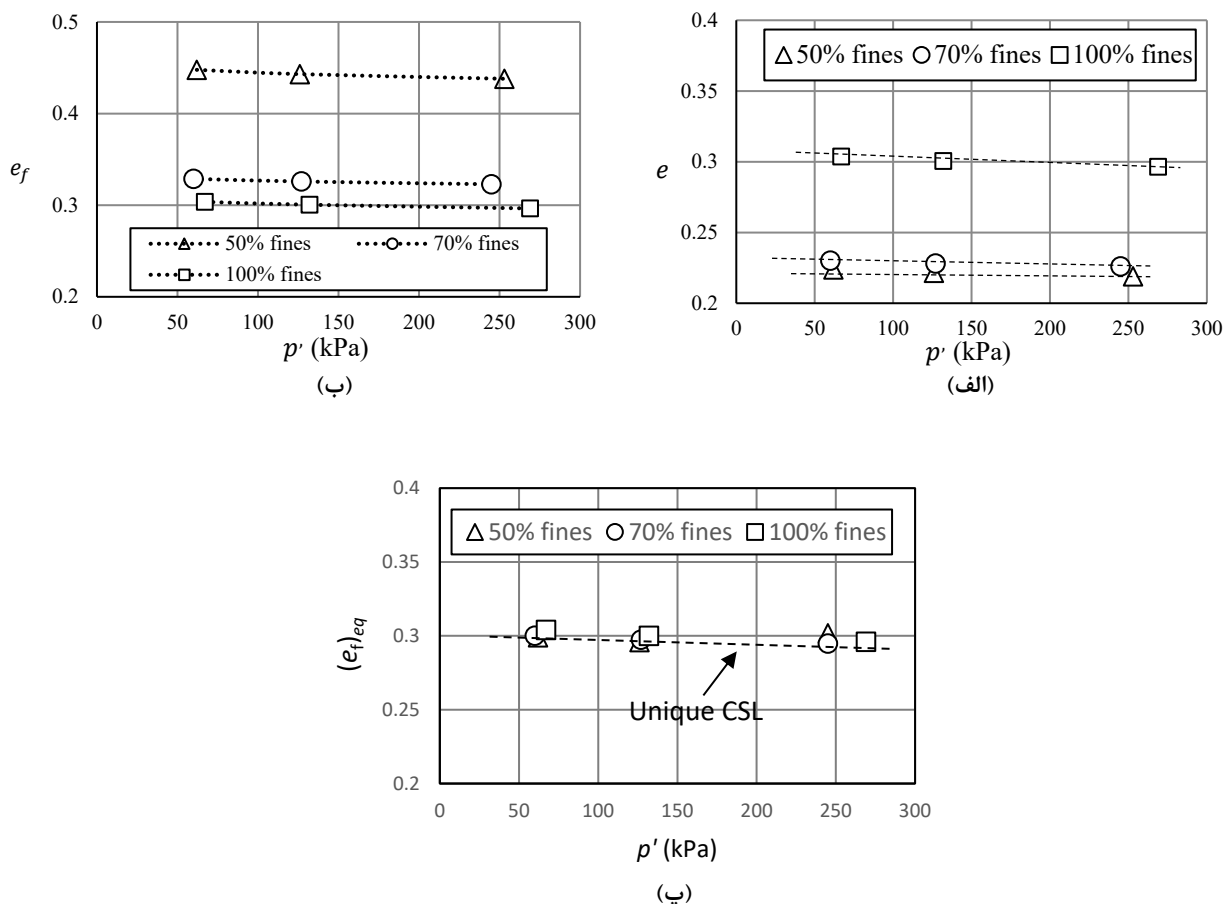
شکل ۱۰. تغییرات مقدار پارامتر b با درصد محتوای ریزدانه برای تحقیقات مختلف و مقایسه آن با رابطه تجربی رحمان و لو [۳۶] (رابطه ۳)
Fig. 10. Comparison of b parameter between the values derived from equation (3) and experimental studies

۰/۳۷ در حد آستانه (f_{cth}) تا درصد $f_c = ۷۰\%$ به سرعت افزایش یافته و به ۰/۹۵ می رسد و سپس به مقدار واحد در حالت $f_c = ۱۰۰\%$ می رسد. توانایاگام [۲۶] مقدار متوسط ضریب m را برای چندین کار آزمایشگاهی برابر با ۰/۴۵، ۰/۵۵، ۰/۶۰ و ۰/۶۵ بدست آورده و در محاسبات، مقدار ثابت در نظر گرفته است. طبق نتایج بدست آمده در این تحقیق، مقدار متوسط $m = ۰.۵۸$ برای بازه $f_c = ۴۰\% \sim ۷۰\%$ بدست آمده است.

۵- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر با استفاده از روش اجزای مجزا، مجموعه‌های

مشاهده می شود که همچنان نمی توان یک خط بحرانی واحد تعریف کرد. بجای آن، از تعریف «نسبت تخلخل معادل بخش ریزدانه» طبق رابطه (۵) استفاده می شود تا بتوان یک خط واحد حالت بحرانی را برای مخلوط های با درصد ریزدانه متفاوت تشکیل داد (مطابق شکل ۱۱-پ). در رابطه (۵)، با داشتن نسبت تخلخل حالت بحرانی برابر با حالت ۱۰۰٪ ریزدانه و $R_g = ۴.۸۸$ ، مقدار ضریب m بدست می آید. در شکل ۱۲، مقدار ضریب m برای هر دسته از نمونه ها نسبت به درصد ریزدانه نشان داده شده است. با فرض غالب بودن فاز ریزدانه برای نمونه در حالت آستانه ($f_{cth} = ۴۰\%$)، مقدار m برای این نمونه نیز بدست آمده است. همان طور که مشاهده می شود، مقدار m از



شکل ۱۱. تغییرات (الف) نسبت تخلخل کلی، (ب) نسبت تخلخل محتوای ریزدانه، (پ) نسبت تخلخل معادل محتوای ریزدانه بر حسب تنش میانگین برای حالت بحرانی نمونه‌های با درصد ریزدانه بیشتر از حد آستانه (فاز ریزدانه غالب است).

Fig. 11. Variation of (a) traditional void ratio; (b) intergranular void ratio; (c) equivalent granular void ratio with mean effective stress at critical state for assemblies with fines particles more than threshold fines content

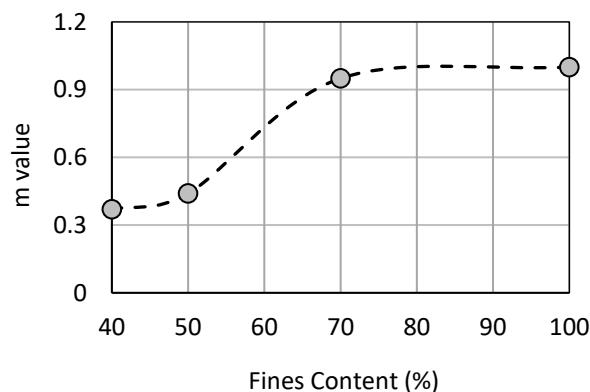
را تشکیل داده اند. هدف از این مقاله، بررسی شرایط تشکیل خط حالت بحرانی واحد برای تمام نمونه‌ها با استفاده از تعاریف جدیدتر نسبت تخلخل به روش اجزای مجزا بوده است.

در ابتدا، درصد ریزدانه آستانه که شاخصی برای نشان دادن رفتار غالب توسط فاز ریزدانه و درشت دانه است، با کمک دو روش مختلف بدست آمد که نتیجه بدست آمده برهم منطبق بودند. سپس، از تعاریف نسبت تخلخل معادل درشت دانه و ریزدانه به ترتیب برای نمونه‌های با رفتار غالب فاز درشت دانه و ریزدانه استفاده شد و خط حالت بحرانی واحد برای هر دسته بدست آمد.

در حالتی که فاز درشت دانه غالب است، درصد مشارکت محتوای ریزدانه به کمک پارامتر b تعیین شد. مشابه با نتایج آزمایشگاهی، مشاهده می‌شود که با افزایش درصد وزنی محتوای ریزدانه، سهم مشارکت این بخش در باربری نیرویی نیز افزایش می‌یابد. همچنین،

خاکی مختلف شامل محتوای مختلف درشت‌دانه و ریزدانه تهیه شده و تحت بارگذاری انحرافی دو محوری قرار گرفتند. شبیه‌سازی عددی در فضای دو بعدی انجام شده و شکل هندسی دانه‌ها بصورت دایروی در نظر گرفته شد. بارگذاری تا رسیدن رفتار نمونه‌ها به حالت بحرانی ادامه یافتند. بارگذاری در شرایط زه کشی شده انجام شد. لذا، حالت حد بحرانی با رسیدن به شرایط تنش انحرافی ثابت و تغییر حجم ثابت تشخیص داده شد. برای تشکیل خط حالت بحرانی برای هر ترکیب خاکی، هر نمونه تحت فشارهای جانبی ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال قرار گرفتند. ترکیب بکارگرفته شده شامل درصد حجمی (و یا وزنی) محتوای ریزدانه برابر صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد بوده است. برای هر ترکیب، خط حالت بحرانی در فضای نسبت تخلخل کلی و فشار همه جانبه میانگین تشکیل شد. مشاهده گردید که هر یک از ترکیبات، خط حالت بحرانی منحصر به فرد خود

- silts, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 128(10) (2002) 849-859.
- [2] H.B. Seed, I.M. Idriss, I. Arango, Evaluation of liquefaction potential using field performance data, Journal of Geotechnical Engineering, 109(3) (1983) 458-482.
- [3] M. Yoshimine, K. Ishihara, W. Vargas, Effects of principal stress direction and intermediate principal stress on drained shear behavior of sand, Soils and Foundations, 38(3) (1998) 197-188.
- [4] P.K. Robertson, C.E. Wride, Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test, Canadian Geotechnical Journal, 35(3) (1998) 442-459.
- [5] R.B. Seed, L.F.J. Harder, SPT-based analysis of cyclic pore pressure generation and undrained residual strength, in: Seed Symposium berkeley, 1990, pp. 351-376.
- [6] R.D. Andrus, K.H. Stokoe, Liquefaction resistance of soils from shearwave velocity, GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING, 126(11) (2000) 1015-1025.
- [7] J.A. Yamamuro, P.V. Lade, Experiments and modeling of silty sands susceptible to static liquefaction, Mechanics of Cohesive-frictional Materials, 4(6) (1999) 545-564.
- [8] M.D. Evans, S. Zhou, Liquefaction behavior of sand-gravel composites, journal of Geotechnical Engineering, 121(3) (1995) 278-298.
- [9] W.-J. Chang, T. Phantachang, Effects of gravel content on shear resistance of gravelly soils, Engineering Geology, 207 (2016) 78-90.
- [10] S. Altun, A.B. Goktepe, C. Akgunar, Cyclic Shear Strength of Silts and Sands under Cyclic Loading, Earthquake Engineering and Soil Dynamics, 158(33) (2005) 1-11.
- [11] V.C. Xenaki, G.A. Athanasopoulos, Liquefaction resistance of sand-silt mixtures: an experimental investigation of the effect of fines, soil Dynamics and Earthquake Engineering, 23(3) (2003) 1-12.
- [12] S. Thevanayagam, Effect of Fines and Confining Stress on Undrained Shear Strength of Silty Sands, Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 124(6) (1998) 479-491.
- [13] A.I. Papadopoulou, T.M. Tika, The effect of fines



شکل ۱۲: تغییرات پارامتر m نسبت به محتوای ریزدانه برای نمونه هایی که فاز ریزدانه غالب است.

Fig. 12. Changes in M parameter with fines content for assemblies that fine particles are dominant to those of coarse grains

مشاهده شد که با توجه به شکل هندسی دانه‌های فاز درشت دانه، سهم مشارکت دانه‌های ریز نسبت به حالتی که دانه‌های درشت دانه تیز گوشه باشند، بیشتر است.

در حالتی که فاز ریزدانه غالب باشد، تشکیل خط واحد حالت بحرانی با تعیین ضریبی با نام m امکان پذیر است. برخلاف این که در کارهای گذشته، فقط یک مقدار متوسط برای آن در نظر گرفته شده است، در این مطالعه نشان داده شد که بسته به درصد وزنی ریزدانه، مقدار m وابسته به درصد محتوای ریزدانه است و بسته به آن، لازم است بصورت متغیر، تعیین شود.

در پایان خاطر نشان می شود شبیه سازی های محیط دانه ای این مقاله در فضای دوبعدی انجام شده است. با توجه به مشاهده روندی مشابه میان نتایج این شبیه سازی ها با نتایج حاصل از نتایج آزمایشگاهی، می توان گفت که شبیه سازی دوبعدی می تواند رفتار کیفی مشابه حالت سه بعدی را بیان کند. با این حال، پیشنهاد می شود که برای کارهای آتی، شبیه سازی ها بصورت سه بعدی نیز تکرار گردند تا نقاط قوت و ضعف و تفاوت میان روش های دو و سه بعدی آشکار گردد.

مراجع

- [1] S. Thevanayagam, T. Shenthan, S. Mohan, J. Liang, Undrained fragility of clean sands, silty sands, and sandy

- [26] S. Thevanayagam, Intergrain contact density indices for granular mixes—I, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 6(2) (2007) 123-134.
- [27] R.d.F. Lopez, J. Ekblad, J. Silfwerbrand, Resilient properties of binary granular mixtures: A numerical investigation, *Computers and Geotechnics*, 76 (2016) 222-233.
- [28] J. Gong, J. Liu, Mechanical transitional behavior of binary mixtures via DEM: Effect of differences in contact-type friction coefficients, *Computers and Geotechnics*, 85 (2017) 1-14.
- [29] C.S. Chang, Y. Deng, A particle packing model for sand-silt mixtures with the effect of dual-skeleton, *Granular Matter*, 2017(19:80) (2017).
- [30] A. Lashkari, M. Karimi, DEM Study of Critical State in Binary Granular Soils and a Unified Constitutive Model for Clean and Silty Sands, *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, 2(4) (2016) 27-45.
- [31] D.W. Hight, V.N. Georgiannou, Effects of sampling on the undrained behavior of clayey sands *Géotechnique*, 45(2) (1995) 237-247.
- [32] M.H. Baziar, R. Dobry, Residual strength and large deformation potential of loose silty sands, *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(12) (1995) 896-906.
- [33] E. Ovando-Shelley, B.E. Pérez, Undrained behavior of clayey sand in load controlled triaxial tests, *Géotechnique*, 47(1) (1997) 97-111.
- [34] J. Chu, W.K. Leong, Effect of fines on instability behaviour of loose sand, *Géotechnique*, 52(10) (2002) 751-755.
- [35] S.L. Yang, S. Lacasse, R. Sandven, Determination of the transitional fines contents of mixtures of sand and non-plastic fines, *Geotechnical Testing Journal*, 29(2) (2006) 102-107.
- [36] M.M. Rahman, S.R. Lo, The prediction of equivalent granular steady state line of loose sand with fines, *Geomechanics and Geoengineering*, 3(3) (2008) 179-191.
- [37] P.A. Cundall, O.D. Strack, discrete numerical model for granular assemblies, *Géotechnique*, 29(1) (1979) 47-65.
- [38] A.A. Mirghasemi, L. Rothenburg, E.L. Matyas, Numerical simulations of assemblies of two-dimensional polygonal plasticity on monotonic undrained shear strength and liquefaction resistance of sands, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 88 (2016) 191-206.
- [14] M. Meidani, C.S. Chang, Y. Deng, On active and inactive voids and a compression model for granular soils, *Engineering Geology*, 222 (2017) 156-167.
- [15] C.S. Chang, M. Meidani, Y. Deng, A Compression model for sand-silt mixtures based on the concept of active and inactive voids, *Acta Geotechnica*, 12(6) (2017) 1301-1317.
- [16] J.K. Mitchell, K. Soga, *Fundamentals of soil behavior*, Wiley, New York, 1976.
- [17] T.C. Kenny, Residual strengths of mineral mixtures, in: 9th international conference on soil mechanics, Tokyo, 1977, pp. 155-160.
- [18] R. Kuerbis, D. Nagussey, Y.P. Vaid, Effect of gradation and fines content on the undrained response of sand, in: *Hydraulic Fill Structure*, Geotechnical Special Publication, New York, 1989, pp. 330-345.
- [19] V.N. Georgiannou, D.W. Hight, J.B. Burland, The undrained behaviour of clayey sands in triaxial compression and extension, *Géotechnique*, 40(3) (1990) 431-449.
- [20] V.N. Georgiannou, D.W. Hight, J.B. Burland, Undrained behaviour of natural and model clayey sands, *Soils and Foundations*, 31(3) (1991) 17-29.
- [21] V.N. Georgiannou, D.W. Hight, J.B. Burland, Behaviour of clayey sands under undrained cyclic triaxial loading, *Géotechnique*, 41(3) (1991) 383-393.
- [22] T.D. Pitman, P.K. Robertson, D.C. Sego, Influence of fines on the collapse of loose sands, *Canadian Geotechnical Journal*, 31(5) (1994) 728-739.
- [23] Y.P. Vaid, Liquefaction of silty soils, in: *Ground failures under seismic conditions*, Geotechnical Special Publisher, New York, 1994, pp. 1-16.
- [24] S. Thevanayagam, Effect of Fines and Confining Stress on Undrained Shear Strength of Silty Sands - Closure, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(11) (1999) 1024-1027.
- [25] S. Thevanayagam, G.R. Martin, Liquefaction in silty soils—screening and remediation issues, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22 (2002) 1035-1042.

- shear, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(2) (2005) 213-222.
- [44] M.M. Rahman, S.R. Lo, M.A.L. Baki, Equivalent granular state parameter and undrained behaviour of sand-fines mixtures, *Acta Geotechnica*, 6 (2011) 183-194.
- [45] S. Zlatović, K. Ishihara, On the influence of nonplastic fines on residual strength, in: *Frst International Conference On Earthquake Geotechnical Engineering*, 1995, pp. 239-244.
- [46] M.C. Powers, A new roundness scale for sedimentary particles, *Sediment Petrol*, 23(2) (1953) 117-119.
- [47] F. Vahidi-Nia, A. Lashkari, S.M. Binesh, An insight into the mechanical behavior of binary granular soils, *Particuology*, 21 (2015) 82-29.
- [48] A. Lashkari, 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*, 61-62 (2014) 212-238.
- shaped particles and effects of confining pressure on shear strength, *Soils and Foundations*, 37(3) (1997) 43-52.
- [39] E. Seyedi Hosseininia, A micromechanical study on the stress rotation in granular materials due to fabric evolution, *Powder Technology*, 283(6) (2015) 462-474.
- [40] P. C.P., *The Effects Of Non-Plastic and Plastic Fines On The Liquefaction Of Sandy Soils*, PhD Thesis, Virginia Tech University, 1999.
- [41] Y.-T. Huang, A.-B. Huang, Y.-C. Kuo, M.-D. Tsai, A laboratory study on the undrained strength of a silty sand from Central Western Taiwan, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24 (2004) 733-743.
- [42] C.P. Polito, J. Martin II, R., Effects of nonplastic fines on the liquefaction resistance of sands, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(5) (2001) 408-415.
- [43] K.S. Prakasha, V.S. Chandrasekaran, Behavior of marine sand-clay mixtures under static and cyclic triaxial

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Zoghi, E. Seyedi Hosseininia, *An Investigation of Fines and Coarse Contents in Granular Mixtures by Using Discrete Element Method*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(1) (2020) 37-52.

DOI: [10.22060/ceej.2018.14598.5694](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14598.5694)



