ارزیابی عددی و آزمایشگاهی اثر دانهبندی و شکل ذرات بر رفتار مکانیکی خاکهای دانهای

نازنین محبوبی مطلق'، احمدرضا محبوبی اردکانی*۲، علی نورزاد

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیطزیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران ^۲ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیطزیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران ^۳ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیطزیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

دریافت: ۹۸/۸/۱۸، پذیرش: ۱۴۰۰/۲/۱، نشر آنلاین: ۱۴۰۰/۲/۱

چکیدہ

با توجه به کاربرد فراوان نتایج حاصل از آزمایش سهمحوری در درک رفتار مکانیکی انواع خاکها، نیاز به مدلسازی عددی این آزمایش برای سهولت در پیش بینی رفتار خاکها و صرفه جویی در زمان و هزینه انجام آزمونهای آزمایشگاهی احساس می شود. رفتار خاکهای دانهای متأثر از شکل (هندسه) ذرات است. در این تحقیق، به منظور ارزیابی اثر دانه بندی و شکل ذرات روی ویژگیهای میکروسکوپیک و ماکروسکوپیک خاکهای دانهای، شبیه سازی های سه بعدی به روش اجزای منفصل روی نمونه های ماسه ای حاوی ذرات با اشکال نزدیک به واقعیت تحت آزمایش سه محوری انجام شد. ذرات با هندسه نامنظم به کمک رویکرد خوشه در نرمافزار 20³⁰ شبیه سازی شدند. تعدادی آزمایش سه محوری زهکشی شده روی نمونه های ماسه ای حاوی ذرات گردگوشه نامنظم به کمک رویکرد خوشه در نرمافزار 20³⁰ شبیه سازی شدند. تعدادی آزمایش سه محوری زهکشی شده روی نمونه های ماسه ای حاوی ذرات گردگوشه و تیز گوشه برای کالیبراسیون شبیه سازی های عددی انجام گرفت. مشاهده شد که نتایج مدل سازی ها تطابق خوبی با نتایج تجربی دارند و روش اجزای منفصل، ابزاری قدر تمند و جدید جهت شبیه سازی رفتار خاکه ای دانه ای حاوی ذرات با اشکال مختلف بدون تحمیل مدل های رفتاری پیچیده است. نتایج مطالعات عددی نشان می دهد که در مقیاس ماکروسکوپیک، مقاومت برشی، مقاومت پسماند و مدول مماسی اولیه با افزایش زاویه داری و کشیدگی دانه ها موزایش می یابد. مقاومت حداکثر و پسماند در نمونه های بد دانه بندی شده بیش از نمونه های خوب دانه بندی شده به دست آمده است. در مقیاس افزایش میکروسکوپیک نیز نتیجه می شود که ساختار توده مصالح تحت تأثیر شکل ذرات است؛ به طوری که متوسط تعداد تماس ها در نمونه ها با افزایش زاویه داری و کشیدگی در هندسه ذرات، افزایش می یابد.

كليدواژهها: آزمايش سهمحوری، شبيهسازی بهروش اجزای منفصل، دانهبندی، شكل ذرات.

۱– مقدمه

از آنجایی که انجام آزمایش های آزمایشگاهی روی خاکهای مختلف اغلب نیازمند صرف هزینه و زمان زیادی می باشد، مدل-های عددی می توانند به عنوان راهکاری مناسب برای شبیه سازی رفتار خاکهای دانهای به حساب آیند. نرمافزارهایی که بر پایه مکانیک محیط های پیوسته استوار شدهاند، قادر به شبیه سازی دقیق رفتار خاکهای دانهای نخواهند بود. از این رو، در چنین شرایطی، از نرمافزارهایی که براساس اصول حاکم بر محیط های گسسته پایه ریزی شدهاند، استفاده می شود. خاکهای دانه ای (شن و یا ماسه) از یک سری المان های مجزا از یکدیگر تشکیل

شدهاند که در هنگام بارگذاریهای خارجی، پاسخهای متفاوت و پیچیدهای را از خود بروز می دهند. یکی از کارآمدترین روش ها در بررسی رفتار این گونه خاکها، روش اجزای منفصل (DEM)^۱ می-باشد. این روش بهعنوان یک روش جدید، رفتار خاکهای دانهای را بهصورت واقع گرایانه و بدون تحمیل مدلهای رفتاری پیچیده، شبیه سازی می نماید (Wang و همکاران، ۲۰۰۷؛ Shamsi و شبیه سازی می نماید (Wang و همکاران، ۲۰۰۹؛ Tian و همکاران، ۲۰۱۸، از معمول ترین نرمافزارهایی که براساس این روش توسعه یافته اند، می توان به نرمافزار PFC^{3D} اشاره کرد.

1.Discrete Element Method (DEM)

^{*} نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۷۳۹۳۲۴۱۰-۰۲۱

آدرس ايميل: n_mahbubimotlagh@sbu.ac.ir (ن. محبوبي مطلق)، a_mahboubi@sbu.ac.ir (ا. محبوبي اردكاني)، a_noorzad@sbu.ac.ir (ع. نورزاد).

واضح است که رفتار خاکهای دانهای متأثر از شرایط انجام آزمایشهای آزمایشگاهی، توزیع اندازه ذرات، ابعاد ذرات و ... میباشد. محققان زیادی برای شفافسازی رفتار مکانیکی خاک-های دانهای تحت بارگذاری سهمحوری تلاش کردهاند (اسلامی فیض آبادی، ۱۳۹۳؛ Tian و همکاران، ۲۰۱۸؛ gong و همکاران، ممکاران، ۲۰۱۹ و سام ۲۰۱۷؛ Lee و همکاران، ۲۰۱۲؛ Jiang و شناساییها از یکسری آزمونهای آزمایشگاهی بر اساس اندازه-شناساییها از یکسری آزمونهای آزمایشگاهی بر اساس اندازه-در مقیاس میکروسکوپیک تشکیل شدهاند که اجازه مشاهده آنچه در مقیاس میکروسکوپیک یا ذره اتفاق میافتد را نمیدهند. برای درک درستی از رفتار محیط دانهای، بررسی آنچه در داخل آن رخ میدهد، ضروری است.

تحقیقات گذشته نشان میدهد که شکل ذرات اثر قابل توجهی بر رفتار مکانیکی خاکهای دانه ای دارد (Tian و همکاران، ۲۰۱۸). بنابراین، برای مدلسازی مناسب رفتار توده ذرات، بهتر است تا حد امکان، شکل ذرات مدل شده به واقعیت نزدیک باشد. امروزه با افزایش توان محاسباتی رایانهها میتوان ذراتی با اشکال غیردایروی (دوبعدی) یا غیر کروی (سهبعدی) در MEM در نظر گرفت. در سالیان اخیر، شبیه سازی واقع گرایانه شکل ذرات به روش اجزای منفصل رواج بسیار زیادی یافته است.

Nouguier و همکاران (۲۰۰۳) با مدل سازی عددی نمونههای حاوی ذرات چندضلعی با نسبتهای کشیدگی (AR)^۲ متفاوت به این نتیجه رسیدند که زاویه اصطکاک با افزایش نسبت کشیدگی ذرات در چگالی اولیه یکسان، کاهش مییابد.

Xie و همکاران (۲۰۱۷) به مطالعه اثر شکل ذرات در نسبت-های کشیدگی ۱، ۲۸۳۳ و ۲۷۱۴ بر رفتار خاکهای دانهای تحت آزمایش سهمحوری به کمک روش اجزای منفصل پرداختند. آنها گزارش کردند که مقاومت برشی (زاویه اصطکاک) با افزایش نسبت مکنیدگی کاهش مییابد. به منظور ارزیابی اثر شکل ذرات بر خواص مکانیکی خاکهای دانهای، Tian و همکاران (۲۰۱۸) شبیه سازی-های دو بعدی روی نمونه های حاوی دانه ها با سه شکل متفاوت شامل ذرات دایروی، مثلثی و کشیده انجام دادند. آنها بیان کردند که شکل دانه ها اثر قابل توجهی روی ویژگیهای مکانیکی خاکها تحت آزمایش برش مستقیم دارد. همچنین نشان دادند که نمونه ها با ذرات دایروی و سوزنی شکل (کشیده) به تر تیب کم ترین و بیش-ترین مقدار مقاومت برشی حداکثر و پسماند را دارا می باشند. به-

در مطالعه Jiang و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی اثر توزیع اندازه ذرات روی رفتار خاکهای دانهای شامل مجموعهای از ذرات کروی و غیرکروی با استفاده از DEM پرداخته شد. از نتایج بهدست

3. Clump

آمده دریافت شد که دانهبندی و نسبت کشیدگی ذرات روی پاسخ تنش- کرنش، اتساع و رفتار برشی نمونهها اثر دارند. در یک دانه-بندی معین، مقاومت برشی با افزایش نسبت کشیدگی ذرات، کاهش مییابد. در نمونههایی با توزیع اندازه ذرات بهصورت یکنواخت (بد دانهبندی شده)، مقاومت برشی بیشتری بسیج می-شود و اتساع بیشتری نسبت به نمونه با دانهبندی وسیع (خوب دانهبندی شده) رخ میدهد.

Gong و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی رفتار خاکهای دانهای (حاوی ذرات با اشکال کروی و غیرکروی) تحت آزمایش سه محوری به روش اجزای منفصل پرداختند. نسبت تنش انحرافی به تنش متوسط در نمونه شامل ذرات غیرکروی، ۱/۸ و برای ذرات کروی، ۱/۲۵ بهدست آمده است. زاویه اصطکاک حداکثر و پسماند برای نمونه با ذرات غیرکروی بهترتیب ۴۵ و ۳۵ درجه و برای ذرات کروی شکل (۳۱) و (۱۷) درجه حاصل شد. بهدلیل قفل و بست بیشتر بین دانههای غیرکروی، زاویه اصطکاک حداکثر و پسماند افزایش یافته است.

با توجه به نیاز به پیشرفت در حوزه شبیهسازیهای عددی، هدف اصلی از این پژوهش، ارزیابی اثر شکل واقع گرایانه ذرات (به-صورت تقریبی) بر رفتار مکانیکی خاکهای دانهای بهمنظور توسعه مدلهای عددی و افزایش دقت و صراحت در نتایج حاصل از شبیه-سازیهای اجزای منفصل میباشد. در این پژوهش، با استفاده از مجموعه کرههایی که با یکدیگر هم پوشانی دارند و به یکدیگر به-صورت صلب متصل شدهاند و یک جسم یکپارچه را تشکیل دادهاند (روش خوشهای)^۳، ذرات با اشکال نامنظم مدل سازی شدهاند (شکل (۱)).



پیچیده بهروش خوشهای با ۱۰۰ کره (Matsushima و Saomoto،

(1...1

2. Aspect Ratio

در راستای اثبات صحت شبیه سازی های صورت پذیرفته، آزمایش های سه محوری تحکیم یافته زهکشی شده در آزمایشگاه روی نمونه های ماسه ای حاوی ذرات با اشکال کروی و غیر کروی انجام شده است. درنهایت، نتایج حاصل از مدل سازی ها با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده است.

1-1- تئوری روش اجزای منفصل

روش DEM توسط Cundall (۱۹۷۱) برای حل مسائل مربوط به مکانیک سنگ در مهندسی معدن توسعه پیدا کرد و بهتدریج در سایر حوزهها مانند صنعت داروسازی، کشاورزی، مهندسی ژئوتکنیک و انرژی نیز وارد شد (Cundall و Strack، ۱۹۷۹).

روش اجزای منفصل مبتنی بر اندر کنش مکانیکی ذرات مجزا بر روی یکدیگر است که در آن، ذرات منفرد بهصورت اجسام صلب مدلسازی میشوند. هر ذره میتواند در تماس با ذرات مجاور و یا مرزهای محیط باشد. تماس بین دو ذره بر اساس مدلهای تماسی تعريف مي شود. ساده ترين مدل تماسي، مدل الاستيك خطي است. این مدل از مؤلفههای فنر و میراگر در هر دو جهت قائم و مماسی در محل تماس تشکیل می شود. لنگر تماسی در این مدل منتقل نمی شود و فقط انتقال نیرو صورت می گیرد. نیروی نرمال تماسی بین دو ذره در یک لحظه معین، بهصورت حاصل ضرب سختی نرمال تماسی در فاصله هم پوشانی محاسبه می شود (ارتباط خطی بین نیرو و همپوشانی). نمو نیروی برشی تماسی بهصورت خطی (با سختی برشی تماس) به جابه جایی نسبی برشی، مرتبط می-شود. نیروی برشی در هر گام محاسباتی از حاصل جمع نیروی برشی بهدست آمده در گام قبلی و نمو نیروی برشی در گام فعلی بهدست میآید. بزرگی نیروی برشی محاسبه شده به یک مقدار حاصل از ضرب ضریب اصطکاک در نیروی نرمال محدود می شود (شکل (۲)).

در روش عددی اجزای منفصل، محیط با اعمال نیروی خارجی، دچار بینظمی میشود و در اثر آن، اجزای محیط بهنحوی حرکت میکنند که دوباره به حالت تعادل برسند. در محیط دانه-ای، حتی اگر این نیرو به تعداد کمی از ذرات وارد شود، با تماس های متوالی در کل محیط پخش میشود و تمامی ذرات در جهت ایجاد تعادل حرکت میکنند. بنابراین، تغییراتی از این قبیل در یک محیط دانهای به سه مرحله تقسیم میشوند:

- اعمال نيرو
- انتشار بىنظمى
- برقراری تعادل



شکل ۲- مدلسازی تماس دو ذره با فنر و میراگر (Manne و Satyam، ۲۰۱۵)

سه مرحله ذکرشده، در حقیقت، اساس مدلسازی بهروش اجزای منفصل است. در این روش، اندر کنش ذرات بهصورت روندی دینامیکی تا برقراری توازن نیروهای داخلی ادامه مییابد. رفتار دینامیکی با استفاده از گامهای زمانی با فرض سرعتها و شتاب-های ثابت در هر گام زمانی، شبیهسازی میشود. هر ذره بهصورت مستقل از ذرات دیگر جابهجا میشود و فقط در نقاط تماس و فصل مشترک با سایر ذرات اثر متقابل دارد. چرخه محاسبات در این روش، الگوریتم گام زمانی است که نیازمند به کارگیری تکراری قانون حرکت برای هر ذره، قانون نیرو- تغییر مکان برای هر تماس و به هنگامسازی دائمی موقعیت ذرات و دیوارهاست (شکل (۳)). ها به هنگام میشود. سپس به منظور تعیین نیروهای تماسی بر اساس حرکت نسبی بین دو ذره در تماس و مدل تماسی، قانون نیرو- تغییرمکان به کار برده میشود. در مرحله بعد، جهت تعیین سرعت و موقعیت ذرات از قانون حرکت استفاده میشود.



شکل ۳- حلقه محاسبه برای DEM

گام زمانی در هر چرخه محاسباتی به کمک گام زمانی بحرانی (Δt_{crit}) جهت حفظ پایداری عددی محاسبه می شود. گام زمانی بحرانی به صورت رابطه (۱) توسط Hart و همکاران (۱۹۸۸) ارائه شده است.

$$\Delta t_{crit} = k \sqrt{\frac{m_{min}}{2 k_{max}}} \tag{1}$$

mmin کم ترین جرم المان و Kmax بیش ترین سختی نرمال یا برشی فنر و k ضریبی است که برای شرایطی که المان ممکن است با بیش از یک المان دیگر در تماس باشد، تعریف شده است. Hart و همکاران (۱۹۸۸) مقدار یک را برای k پیشنهاد دادهاند.

۲- مواد و روشها

روش انجام این پژوهش شامل دو بخش آزمایشهای آزمایشگاهی و شبیه سازی های عددی به روش اجزای منفصل جهت ارزیابی اثر شکل و دانه بندی ذرات بر رفتار مکانیکی خاک ماسه ای می باشد که در ادامه به آن ها پر داخته شده است.

۲–۱– آزمایشهای آزمایشگاهی

ابتدا مصالح مصرفی در نمونههای آزمایشهای سهمحوری معرفی شده و سپس به نحوه انجام آزمایشها پرداخته میشود.

۲-۱-۱- مصالح مصرفی

ماسههای مورد استفاده در این پژوهش شامل ماسه فیروز کوه (گردگوشه) و ماسه جاجرود (تیزگوشه) میباشد. منحنی دانه-بندی این ماسهها در شکل (۴) آمده است (توزیع اندازه ذرات در این دو نوع ماسه، یکسان فرض شده است). علاوه بر این، به بررسی اثر خوب یا بد دانهبندی بودن ذرات ماسه فیروزکوه بر رفتار مکانیکی آن نیز پرداخته شده است که توزیع اندازه ذرات ماسه خوب و بد دانهبندی شده نیز در شکل (۴) نمایش داده شده است). (ماسه خوب و بد دانهبندی شده از ماسه فیروزکوه تهیه شده است).

شکل (۵) تصویر ماسههای مورد استفاده در این پژوهش را نشان میدهد.

شکل ۵- الف) ماسه جاجرود، ب) فیروزکوه

۲-۱-۲- آزمایشهای سهمحوری

در این تحقیق، چهار آزمایش سهمحوری استاتیکی فشاری در شرایط تحکیم یافته زهکشی شده (CD) بر روی نمونههای استوانه-ای شکل (قطر ۵ و ارتفاع ۱۰ سانتیمتر) حاوی ماسههای اشارهشده (ماسه جاجرود (تیزگوشه)، ماسه فیروزکوه (گردگوشه)، ماسه خوب دانهبندی شده و ماسه بد دانهبندی شده فیروزکوه) در تراکم نسبی ۷۵ درصد و فشار همهجانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال انجام شده است.

نحوه تهیه نمونه به این صورت بود که ابتدا با توجه به حجم قالب سهمحوری، تراکم موردنظر و چگالی مخصوص ذرات جامد (۲/۶۵)، مقدار موردنیاز از ماسه مدنظر توزین و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی گراد در گرمخانه قرار گرفت. پس از سپری شدن زمان مذکور، مصالح از گرمخانه خارج شد و به مدت یک ساعت در آزمایشگاه قرار گرفت تا با محیط همدما شود.

جهت تهیه نمونه برای آزمایش سهمحوری، ابتدا سنگ متخلخل در محل قرارگیری نمونه در دستگاه قرار گرفت. سپس غشای مورد استفاده با دقت و بهآرامی به کمک واشر به سنگ متخلخل متصل شد. قالب دو قسمتی (که برای تهیه نمونههای سهمحوری تعبیه شده بود) در اطراف غشای پوششی قرار گرفت. با اعمال یک مکش اولیه داخل قالب، غشای لاستیکی به بدنه قالب چسبید. این مکش تا پایان عمل تهیه نمونه ادامه یافت.

سپس مصالح خشکشده به پنج قسمت مساوی تقسیم شد. هر قسمت بهعنوان یک لایه در داخل قالب ریخته و با کوبه مخصوص متراکم شد. فرآیند متراکمسازی با دقت بسیار زیادی انجام شد تا غشای لاتکسی دچار سوراخشدگی و پارگی نگردد. ارتفاع لایههای متراکم شده با استفاده از کولیس که دقتی برابر با ارتفاع لایههای متراکم شده با استفاده از کولیس که دقتی برابر با واناب باز شد، سنگ متخلخل فوقانی بهآرامی بهصورت کاملاً تراز روی نمونه قرار گرفت و با واشر به غشا متصل شد. ارتفاع و قطر

نمونه اندازه گیری شد. پس از آن، سلول در اطراف نمونه قرار گرفته و با آب پر شد. فرآیند اشباع سازی نمونه تا جایی که مقدار B اسکمپتون[†] به بیش از ۹۵ درصد رسید، ادامه پیدا کرد (فرصت کافی به نمونه برای پر شدن حجم حفرات بین ذرات با آب داده شد). پس از آن، فشار همه جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال به نمونه اعمال شد (تحکیم همسان). شیرهای زهکش باز شده و بار محوری با سرعت ثابت ۱ میلی متر بر دقیقه به نمونه اعمال گردید. بار محوری تا بعد از گسیختگی نمونه وارد شد. نمودارهای تنش انحرافی-کرنش محوری حاصل از آزمایش های انجام شده در بخش نتایج آورده شده است.

۲-۲- شبیهسازیهای عددی

پس از انجام آزمایشهای سهمحوری در آزمایشگاه، به شبیه-سازی آنها با نرمافزار PFC^{3D} که بر اساس روش اجزای منفصل است، پرداخته شد. روش اجزای منفصل، رفتار میکروسکوپیک و ماکروسکوپیک خاکهای دانهای را در کنار یکدیگر موردبررسی قرار میدهد. در این میان، هرچه خصوصیات مصالح در شبیه-سازیها به شرایط واقعی نزدیکتر باشد، رفتار آنها با نتایج تجربی همخوانی بیشتری خواهد داشت.

نحوه مدلسازی نمونههای ماسهای خوب و بد دانهبندی شده فیروزکوه تحت آزمایش سهمحوری به این صورت بود که نمونهها بهصورت مجموعهای از ذرات کروی با دانهبندی مشخصشده در شکل (۴) در قالب استوانهای شکل به قطر ۱/۵ و ارتفاع ۳ سانتی-متر بهصورت کاملاً خشک در نسبت تخلخل ۱/۴۵ تولید شدند. مدل تماس بین ذرات بهصورت خطی در نظر گرفته شد.

در تحقیقات اخیر، برای افزایش دقت در شبیه سازی آزمایش-ها و تطابق بیشتر با شرایط محیط آزمایشگاه از مرزهای انعطاف-پذیر به جای مرز جانبی صلب استفاده می شود. استفاده از مرزهای غشایی انعطاف پذیر به مدل اجازه می دهد که خواص تغییر شکل ناشی از توسعه نواحی برشی را با دقت مناسبی تصویر سازی کند. مرزهای استفاده شده در این پژوهش به صورت دیواره های تغییر شکل پذیر که یک محیط استوانه ای را فراهم کرده اند، در نظر گرفته شده است که این مدل سازی بسیار نزدیک به شرایط آزمایش سه محوری در آزمایشگاه است. صفحات بالایی و پایینی نمونه به صورت صفحات صلب بدون اصطکاک در نظر گرفته شدند.

آزمایش سهمحوری شامل دو مرحله تحکیم و برش است. تحکیم همسان با اعمال تنش ۲۰۰ کیلوپاسکال به صفحه بالایی نمونه و دیوارههای غشایی در قالب نموی انجام پذیرفت. فشار همهجانبه در حین تست دائماً کنترل شد (این کار با بهره گیری از الگوریتم پایش تنش^۵ انجام شد). از آنجایی که آزمایش به صورت

کرنش کنترل انجام شد، در مرحله برش، صفحه بالایی با سرعت ثابت به سمت پایین حرکت کرد؛ در واقع، ضمن ثابت نگه داشتن تنش شعاعی بهعنوان تنش محصورکننده، نمونه تحت تنش انحرافی با نرخ کرنش مشخص در راستای قائم قرار گرفت. لازم به ذکر است که سرعت حرکت صفحه بارگذاری بهاندازه کافی پایین نتخاب شد (^۶ ۲۰ × ۳ متر بر ثانیه) تا تعادل استاتیکی حاصل شود. تصویری از نمونههای ماسهای شبیه سازی شده در PFC^{3D} در شکل (۶) مشخص شده است.

شکل ۶- الف) نمونه ماسهای در قالب استوانهای، ب) قالب استوانهای انعطافپذیر، ج) نمونه تولیدشده از ذرات ماسه در قالب استوانهای با دیوارههای انعطافپذیر

۲-۳- کالیبراسیون مدل

روش اجزای منفصل، امکان بررسی پارامترهای میکروسکوپیک و شبیهسازی رفتار ماکروسکوپیک مجموعه ذرات خاک را دارد (Manne و Satyam، ۲۰۱۵). در نرمافزار PFC^{3D} برای شبیهسازی نمونه به خواص میکروسکوپیک آن احتیاج است که از جمله این خواص میتوان به مدول الاستیک ذرات، نسبت سختی نرمال به برشی تماسی و اصطکاک بین ذرات اشاره کرد. این نرمافزار، پارامترهای میکروسکوپیک، خواص هندسی ذرات، ویژگیهای تماسی و شرایط مرزی را بهعنوان دادههای ورودی دریافت میکند و با انجام چرخههای محاسباتی، خواص ماکروسکوپیک مانند مقاومت برشی نمونه را بهعنوان خروجی ارائه میدهد.

هیچ روش سادهای برای تعیین مقادیر پارامترهای میکرو-مقیاس بینذرهای وجود ندارد (Asadi و همکاران، ۲۰۱۸). چندین شبیه سازی با فرآیند سعی و خطا برای کالیبراسیون نمونه های ماسه ای انجام شد. شکل (۷) پاسخ تنش انحرافی- کرنش محوری حاصل از آزمایش های تجربی و مدل های عددی برای ماسه های خوب و بد دانه بندی شده گردگوشه فیروز کوه (نمودارهای دانه-بندی ارائه شده در شکل (۴)) را نشان می دهد که سازگاری مناسبی بین نتایج به دست آمده از دو روش مشاهده می شود.

با توجه به شکل (۷) دریافت میشود که نمونهها پس از گسیختگی (تنش انحرافی حداکثر)، کرنش نرمشوندگی را تجربه میکنند و مدل عددی بهخوبی توانسته است این کاهش مقاومت با کرنش محوری و همچنین مقادیر مقاومت پسماند را نمایش دهد. اختلاف تنش انحرافی حداکثر در نمونههای تجربی و عددی بهترتیب در شرایط بد دانهبندی شده و خوب دانهبندی شده، ۸ و ۱۶ کیلوپاسکال بهدست آمده است؛ درحالی که تنش حداکثر برای کلیه نمونهها در کرنش محوری یکسان (۶٪) رخ داده است. مدول مماسی اولیه برای نمونه بد و خوب دانهبندی شده، ۲۵ و ۱۷ مماسی اولیه برای نمونه بد و خوب دانهبندی شده، ۵۵ و ۱۷ یماسی اولیه برای نمونه ایده نمیشود. مقاومت حداکثر و سماند در نمونه بد دانهبندی شده بهترتیب حدود ۳۳ و ۵۸ کیلوپاسکال بیش از نمونه خوب دانهبندی شده است.

آزمایش های تجربی و شبیه سازی های عددی برای ماسه های خوب و بد دانه بندی شده فیروز کوه

همان طور که قبلاً اشاره شد، به کمک مرزهای غشایی انعطاف-پذیر می توان خواص تغییر شکل ناشی از توسعه نواحی برشی را با دقت مناسبی تصویر سازی کرد. با مقایسه شکل های (۶) و (۸) مشاهده می شود که نمونه ماسه ای مدل شده پس از انجام آزمایش سه محوری دچار تغییر شکل (اتساع) شده و نوار برشی در میانه ارتفاع آن به صورت مورب تشکیل شده است. در شکل (۹) تصاویر نمونه ها در انتهای آزمایش (پس از مرحله گسیختگی) حاصل از آزمایش های تجربی و شبیه سازی های عددی آورده شده است که مطابقت مطلوبی با هم دارند.

شکل ۸- الف) نمونه ماسهای در قالب استوانهای در انتهای آزمایش، ب) قالب استوانهای انعطافپذیر که نوار برشی شکلگرفته با رنگ قرمز مشخص شده، ج) نمونه تولیدشده از ذرات ماسه در قالب استوانهای با دیوارههای انعطافپذیر در انتهای آزمایش

^(الف) شکل ۹- الف) نمونه ماسهای در انتهای آزمایش در آزمایشگاه، ب) شبیهسازی عددی

مقادیر پارامترهایی که پس از کالیبراسیون نتایج عددی با آزمایشگاهی بهدست آمدهاند، در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- پارامترهای شبیهسازی	
مقدار	پارامتر
١	نسبت سختی نرمال به برشی در تماس
١	سختی دیوارههای جانبی (MN/m)
۴۰	مدول الاستيك ذرات (GPa)
78	چگالی ذرات (kg/m³)
٠/۴۵	نسبت تخلخل
۰ /٣	ضريب اصطكاك بين ذرات
در حین تحکیم ۲	ضریب اصطکاک بین ذرات و دیوارهها
در حین برش ۲/۵	
• /Y	ضریب میرایی محلی

با توجه به این که رفتار ماکروسکوپیک ماسه به شکل ذرات حساس است، شکل دانهها در مدل سازی باید تا حد امکان نزدیک

به شکل واقعی ذرات در نظر گرفته شود تا دقت نتایج شبیه سازی-های عددی افزایش یابد. شبیه سازی ها بر روی نمونه ماسه جاجرود و ماسه فیروز کوه با شکل های ارائه شده در شکل (۱۰) که به تر تیب نماینده ذرات تیز گوشه و گرد گوشه می با شند، انجام پذیرفت.

شکل ۱۰- نمونه ذرات: الف) ماسه جاجرود، ب) ماسه فیروزکوه در مدلسازی عددی

منحنیهای تنش انحرافی- کرنش محوری نمونههای ماسه جاجرود و فیروزکوه بهدست آمده از هر دو روش عددی و تجربی در شکل (۱۱) نمایش داده شده است.

سکل ۱۱- پاسخ نیس انخرافی- درنس مخوری مستخرج از آزمایشهای تجربی و شبیهسازیهای عددی برای ماسههای جاجرود و فیروزکوه

مشاهده می شود که مدل ارائه شده به خوبی رفتار نرم شوندگی ماسه گردگوشه را تصویر می کند ولی در منعکس ساختن رفتار ماسه تیزگوشه کمی ضعیف عمل می نماید (اختلاف در مقدار تنش انحرافی حداکثر حاصل از روش های تجربی و عددی در نمونه فیروز کوه و جاجرود به ترتیب ۱۰ و ۱۴ کیلوپاسکال به دست آمده است. کرنش متناظر با تنش حداکثر برای نمونه های تجربی و عددی فیروز کوه یکسان است ولی تنش حداکثر در نمونه تجربی جاجرود در کرنش بالاتری رخ داده است). این ضعف می تواند ناشی از عدم تصویر سازی مناسب ذرات تیز گوشه در مدل باشد که در ادامه به آن بیشتر پرداخته خواهد شد. در شرایط یکسان، مقاومت

برشی حداکثر و مدول مماسی اولیه در ماسه جاجرود حدود ۵۰ کیلوپاسکال و ۶ مگاپاسکال بیش از فیروزکوه بهدست آمده است.

۳- نتایج و بحث

بیشتر دانهها در خاکها، هندسه پیچیدهای دارند و شکل دانه-ها بهعنوان یک پارامتر کلیدی بر رفتار مجموعه ذرات اثر می گذارد. در تحقیق حاضر سعی شده است که با شبیهسازی آزمایش سه-محوری در محیط PFC^{3D} به بررسی اثر دانهبندی و شکل ذرات بر رفتار خاکهای دانهای پرداخته شود. در بسیاری از شبیهسازی-ها، تمامی ذرات بهصورت کروی فرض شدهاند. با این حال، بر اساس منطق خوشه، می توان ذرات با اشکال نامنظم را در مدل تعريف نمود. يک خوشه از چند المان کروی تشکيل شده است که در کنار یکدیگر قرار گرفته و ذرهای یکپارچه و صلب را تشکیل دادهاند. این بدان معناست که مراکز المان های تشکیل دهنده یک خوشه همیشه نسبت به یکدیگر ثابت هستند. تماسهای داخلی بین المانهای یک خوشه در چرخههای محاسباتی در نظر گرفته نمی شوند و در نتیجه، زمان محاسبات نسبت به زمانی که این تماسها فعال باشند، كمتر است. المانهاي درون يك خوشه مي-توانند به هراندازه با یکدیگر هم یوشانی داشته باشند و هیچ نیرویی ناشی از این هم پوشانی ها در آن ها ایجاد نمی شود. اما زمانی که یک خوشه در حال شکل گیری می باشد، اگر در بین المان های تشکیل دهنده آن نیرویی وجود داشته باشد و یا این که المانی با نیروی تماسی موجود در آن بخواهد به یک خوشه اضافه گردد، این نیروها بهصورت تغییرناپذیر و ثابت باقی خواهند ماند. بنابراین، یک خوشه بهعنوان یک جسم صلب عمل مینماید.

بدیهی است که خاک واقعی بهندرت از ذرات کروی یا یکنواخت تشکیل شده است. شبیهسازی ذرات غیر کروی خاک به کمک المانهای خوشهای شکل میتواند رفتار واقعی خاک را بهتر نمایش دهد. در ادامه به چندین آرایش مختلف قرار گیری المان-های کروی در یک خوشه پرداخته میشود.

۳-۱- ذرات با نسبتهای کشیدگی متفاوت

در نرمافزار PFC^{3D} میتوان ذرات با کشیدگیهای متفاوت (با استفاده از روش خوشه) را مدلسازی نمود. نسبت کشیدگی (AR) مطابق شکل (۱۲) بهصورت نسبت $\frac{a_2}{a_1}$ بین کوتاهترین و بلندترین محور تعریف میشود.

کشیدگی بیشتر ذرات منجر به AR کوچک تر می شود. ضریب AR برای انواع ماسه ها در جدول (۲) داده شده است (Jiang و همکاران، ۲۰۱۸).

شکل ۱۲- تعریف نسبت کشیدگی

جدول ۲- ضریب AR برای انواع ماسهها

(Jiang و همکاران، ۲۰۱۸)

AR	ماسه
۰/٨۶	Fujian
۰ /۶۸	Leighton Buzzard
• /۶٣	Toyoura
• /۶	Ticino

برای ارزیابی اثر نسبت کشیدگی ذرات بر رفتار خاکهای دانه-ای، خوشههای بیضی شکل با نسبتهای متفاوت ایجاد شد که این اشکال به همراه مقادیر AR در شکل (۱۳) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که کلیه خوشههای تولید شده به صورت صلب بوده و تماسهای داخلی آنها در حین شبیه سازی شکسته نمی-شوند. نتایج حاصل از شبیه سازی های انجام شده (به کمک مدل کشید گی متفاوت (شکل (۱۳)) در شکل (۱۴) آورده شده است. مشاهده می شود که با افزایش در نسبت کشید گی ذرات، مقاومت مشاهده می شود نمونه ها کاهش یافته است.

شکل ۱۳- خوشههای بیضیشکل با نسبتهای کشیدگی متفاوت

شکل ۱۴- پاسخ تنش انحرافی- کرنش محوری مستخرج از شبیهسازیهای عددی برای نمونههای ماسهای با ذرات با نسبتهای کشیدگی متفاوت

کرنش متناظر با تنش انحرافی حداکثر در نمونه با نسبت کشیدگی ۰/۵۷ کمتر از سایر نمونههاست. کلیه نمونهها رفتار نرم-شوندگی را تجربه می کنند ولی میزان کاهش مقاومت با کرنش در نمونه با نسبت کشیدگی کمتر، بیشتر است؛ بهطوری که افت مقاومت در نمونه حاوی ذرات با نسبت کشیدگی ۰/۵۷، ۲/۱۲ برابر نمونه با ذرات کروی می باشد. در آزمایش سهمحوری می توان به-کمک رابطه (۲) زاویه اصطکاک (φ) را به دست آورد.

$$\sin\varphi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \tag{(Y)}$$

که در آن $\sigma_1 e e_7$ و $\sigma_1 e e_7$ بهترتیب تنش محوری و تنش جانبی است. برای نمونهها حاوی ذرات با اشکال نمایش داده شده در شکل (۱۳)، زاویه اصطکاک حداکثر و مدول مماسی اولیه محاسبه و در شکل (۱۵) رسم شده است. با افزایش نسبت کشیدگی، ذرات بهسمت کروی شدن متمایل میشوند و زاویه اصطکاک بسیج شده در یک فشار همهجانبه معین، کاهش مییابد؛ زیرا قفل و بست بین ذرات کروی کمتر بوده و در نتیجه، مقاومت برشی خاک دانهای کاهش پیدا میکند.

شکل ۱۵- زاویه اصطکاک حداکثر و مدول مماسی اولیه برای نمونهها با ذرات با نسبتهای کشیدگی متفاوت

مدول الاستیک اولیه نمونه ها با کاهش نسبت کشیدگی افزوده می شود. به عبارت دیگر، نمونه ها با ذرات کروی شکل سختی کم-تری نسبت به نمونه ها با ذرات کشیده دارند. Xie و همکاران (۲۰۱۷) نیز اظهار داشتند که افزایش نسبت کشیدگی منجر به کاهش مقاومت برشی حداکثر نمونه ها می شود. نتایج مدل سازی-کاهش مقاومت برشی حداکثر نمونه ها یی با ذرات با نسبت های و Gong و Long (۲۰۱۷) روی نمونه ها یی با ذرات با نسبت های کشیدگی متفاوت (۱، ۲۰۹۵) روی نمونه ها یی با ذرات با نسبت های مشخص کرد که با کاهش نسبت کشیدگی، زاویه اصطکاک حداکثر و نسبت تنش انحرافی حداکثر به تنش متوسط ابتدا افزایش می-یابد تا به مقدار حداکثر خود در AR برابر ۶۷/۰ برسد و پس از آن، کاهش می یابد. مقاومت برشی پسماند با کاهش نسبت کشیدگی، افزایش می یابد.

۲-۳- نمونههای خوب یا بد دانهبندی شده

بهمنظور ارزیابی اثر دانهبندی بر رفتار خاکهای دانهای از نمونههایی با ذرات کروی هماندازه (ذرات یکنواخت) بهعنوان نمونههای بد دانهبندی شده (شکل (۱۶-الف)) و نمونههایی شامل ذرات کروی با اندازههایی در محدوده ۰/۱۵ تا ۲ میلیمتر (دانه-بندی گسترده) به عنوان نمونه خوب دانه بندی شده (شکل (۱۶-پ)) استفاده شد. علاوه بر این، خوشههایی با نسبت کشیدگی یکسان (برابر با ۰/۵۷) ولی کرههای تشکیلدهنده با شعاعهای يكسان (شكل (١٦-ب)) و متفاوت (شكل (١٦-ت)) نيز موردبررسی قرار گرفت. شکل ذرات کلیه نمونههای مطرحشده در این زیر بخش در شکل (۱۶) خلاصه شده است. منحنیهای تنش انحرافی- کرنش محوری برای چهار حالت مفروض (شکل (۱۶)) به کمک مدل کالیبره شده بهدست آمد که در شکل (۱۷) نشان داده شده است. زاویه اصطکاک حداکثر و مدول مماسی اولیه این نمونهها نیز در شکل (۱۸) ترسیم شده است. کلیه نمونههای حاوی ذرات با اشکال نشان داده شده در شکل (۱۶) دارای کرنش نرم-شوندگی هستند. تنش انحرافی حداکثر در نمونههای بد دانهبندی شده در کرنش محوری کمتری رخ میدهد.

شکل ۱۶- نمونههای خوب و بد دانهبندی شده

شکل ۱۷– پاسخ تنش انحرافی– کرنش محوری مستخرج از شبیهسازیهای عددی برای نمونههای ماسهای با ذرات نشان داده شده در شکل (۱۶)

مطالعات تجربی و عددی نمونهها با دانهبندی یکنواخت و گسترده نشان میدهد که مقاومت برشی نمونههای بد دانهبندی شده بیشتر است. بررسیهای Jiang و همکاران (۲۰۱۸) نیز بر این نکته تأکید دارد که در نمونه با ذرات کروی (AR برابر با یک)، تحت فشار همهجانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال و شرایط مدلسازی تقریباً یکسان، مقاومت برشی حداکثر نمونه بد دانهبندی شده ۱۴ کیلوپاسکال از نمونه خوب دانهبندی شده بیشتر است و همچنین نمونه با ذرات کشیده (خوشه تهیهشده با نسبت کشیدگی ۱۹۹۲) و بد دانهبندی شده ۳۰ کیلوپاسکال از نمونه با همان نسبت نمونه با ذرات کشیده روی ۳۰ میلوپاسکال از نمونه با همان نسبت کیلوپاسکال از مونه خوب دانهبندی شده بیشتر است. در تحقیق حاضر و بد دانهبندی شده (توزیع یکنواخت) بهترتیب ۵۸ و ۹۱ کیلوپاسکال بیش از خوب دانهبندی شده است. انتظار میرفت که خاک خوب دانهبندی شده بهعلت طیف وسیعی که از اندازه ذرات دارد، بتواند مقاومت بیشتری کسب کند.

شکل ۱۸- زاویه اصطکاک حداکثر و مدول مماسی اولیه برای نمونههای ماسهای با ذرات نشان داده شده در شکل (۱۶)

مدول مماسی و زاویه اصطکاک در نمونه کروی بد دانهبندی شده بهترتیب ۱۳ مگاپاسکال و ۲/۵ درجه بیشتر از خوب دانهبندی شده است و این مقادیر در نمونههای غیرکروی برابر با ۵ مگاپاسکال و ۳ درجه بهدست آمده است.

۳–۳– ذرات در آرایشهای متفاوت

با توجه به منطق خوشه مطرح شده، نمونههایی حاوی خوشه-ها با آرایشهای متفاوتی از المانهای کروی شکل تهیه و تحت آزمایش سه محوری قرار داده شد. این خوشهها در شکل (۱۹) آورده شده است.

شکل ۱۹- خوشههایی با آرایشهای متفاوت از ذرات کروی

نتایج حاصل از شبیهسازیهای انجامشده برای اشکال ارائه شده در شکل (۱۹) در شکل (۲۰) نمایش داده شده است. با تأمل در شکل (۲۰) ملاحظه می شود که نمونه های حاوی ذرات خوشهای شکل که دارای ۳ و ۴ المان کروی میباشند (شکلهای (۱۹- د) و (۱۹- ه))، دارای مقاومت کم تری نسبت به آرایش ۲ و ۳ المان در یک امتداد (شکلهای (۱۹- ب) و (۱۹- ج)) هستند. زیرا در شکلهای (۱۹- د) و (۱۹- ه) خوشهها به حالت کروی نزدیک بوده و بهراحتی از کنار یکدیگر میلغزند. بهعلت آن که خوشههای چهار المانه (شکل (۱۹- ه)) از کرویت بیشتری برخوردارند، مقاومت کمتری نسبت به خوشه شکل (۱۹- د) دارند و بسیار نزدیک به دانه شکل (۱۹- الف) هستند. با مقایسه نمودارهای مربوط به نمونهها با ذرات با آرایش شکلهای (۱۹-ب) و (۱۹-ج) دریافت می شود که مقاومت برشی حداکثر در نمونه با آرایش شکل (۱۹– ج) بیشتر است؛ زیرا نسبت کشیدگی در آن بیشتر بوده و قفل و بست بیشتری بین ذرات اتفاق میافتد. برای نمونهها با ذرات ارائهشده در شکل (۱۹)، زاویه اصطکاک حداکثر و مدول مماسی اولیه محاسبه و در شکل (۲۱) رسم شده است. همان طور که انتظار می رفت، مدول مماسی و زاویه اصطکاک در نمونه با آرایش ذرات مطابق شکل (۱۹-ج) بیش از سایر نمونه-هاست و پس از آن، نمونه با آرایش ذرات شکل (۱۹- ب) قرار دارد. مدول مماسی و زاویه اصطکاک برای نمونهها با آرایش ذرات

در شکلهای (۱۹- الف)، (۱۹- د) و (۱۹- ه) به یکدیگر نزدیک هستند.

شکل ۲۱– زاویه اصطکاک حداکثر و مدول مماسی اولیه برای نمونههای ماسهای با ذرات نشان داده شده در شکل (۱۹)

۳-۴- ذرات با اشکال پیچیدہ

شکل (۲۲) چگونگی تولید ذرات خاکی از تعداد معینی کره با شعاعها و هم پوشانیهای مختلف را نشان می دهد. تعداد کرههای استفاده شده در هر خوشه به درجه زاویه داری ذرات بستگی دارد Shamsi) و Shamsi، ۲۰۱۲). مشاهده می شود که شکل تولید شده با المانهای کروی به شکل واقعی ذره بسیار نزدیک است. دو ذره با اشکال پیچیده که درصد بیشتری از ذرات در نمونه ماسه جاجرود را تشکیل می دهند، در شکل (۲۳) آمده است. می-توان این ذرات را نیز با بهره گیری از منطق خوشه به کرههایی با شعاعها و همپوشانی های متفاوت شبیه سازی کرد. خوشه هایی که معرف این ذرات در نمونه عددی می با شند، نیز در شکل (۲۳) نشان داده شده است.

شکل ۲۲- مدلسازی شکل واقعی ذرات با زاویهداریهای متفاوت توسط المانهای خوشهای (Shamsi و Mirghasemi ، ۲۰۱۲)

تولید ذره واقعی از تعداد متفاوتی کره با شعاعهای مختلف

در ادامه، منحنیهای تنش انحرافی - کرنش محوری مربوط به نمونههایی که حاوی ذراتی بهصورت ۱۰۰٪ از شکل (۲۳ - الف)، ۱۰۰٪ از (۲۳ - ب) و ۵۰٪ از شکل (۲۳ - الف) و ۵۰٪ از شکل (۲۳ - ب) هستند، آمده است. برای مقایسه بهتر، منحنیهای مربوط به ماسه فیروزکوه و ماسه جاجرود نیز در شکل (۲۴) ترسیم شده است. ملاحظه میشود که رفتار نمونه جاجرود به نمونه با شده است. ملاحظه میشود که رفتار نمونه جاجرود به نمونه با شکلهای (۲۳ - الف) و (۲۳ - ب) و مخلوطی از ذرات با شکلهای (۲۳ - الف) و (۲۳ - ب) نزدیک است و مقاومت برشی آن کیلوپاسکال) دارد. کرنش متناظر با تنش انحرافی حداکثر در نمونهها با ذرات با اشکال هندسی (۲۳ - الف)، (۲۳ - ب) و مخلوط نمونه و جاجرود کمتر است. افت مقاومت با کرنش نمونه فیروزکوه و جاجرود کمتر است. افت مقاومت با کرنش محوری برای نمونه فیروزکوه کمتر از سایر نمونههاست.

شکل ۲۴- پاسخ تنش انحرافی- کرنش محوری مستخرج از شبیهسازیهای عددی برای ماسهها با ذرات نشان داده شده در شکل (۲۳)

مدول مماسی نمونه جاجرود بهترتیب ۱ و ۴ مگاپاسکال کمتر از نمونه با شکل ذرات (۲۳– ب) و نمونه مخلوط از (۲۳– الف) و (۲۳– ب) بهدست آمده است. زاویه اصطکاک کلیه نمونهها بهغیر نمونه فیروزکوه (حاوی ذرات گردگوشه) تقریباً یکسان هستند. هر چه زاویهداری (گوشهداری) ذره بیشتر باشد، نیاز به کرههای بیشتری برای شبیه سازی دارد که این موضوع باعث افزایش حجم و زمان لازم برای محاسبات می گردد. نمونه حاوی ذرات با شکل (۲۳–الف)که از زاویه داری بیشتری برخوردار است، مقاومت برشی بیشتر کسب کرده است. در حالت کلی باید گفت که نمونهها با ذرات خوشهای شکل نسبت به کروی شکل، مقاومت برشی بیشتری دارند. این موضوع به دلیل این است که با افزایش زاویه-داری ذرات، قفل و بست بین آنها بیشتر شده که منجر به افزایش اصطکاک بین ذره ای می شود و در نتیجه، مقاومت برشی بالاتری بهدست می آید.

شکل ۲۵- زاویه اصطکاک حداکثر و مدول مماسی اولیه برای نمونههای ماسهای با ذرات نشان داده شده در شکل (۲۳)

۳-۵- بررسی رفتار میکروسکوپیک

پارامتر میکروسکوپیکی که اغلب برای بیان ساختار توده ذرات به کار میرود، متوسط تعداد تماسهاست[?] در واقع، تعداد تماس-های هر ذره، اساسیترین پارامتر اسکالر در مقیاس ذره برای ساختار مصالح است (Asadi و همکاران، ۲۰۱۸). متوسط تعداد تماسها بهصورت نسبت دو برابر تعداد کل تماسهای بین ذرات به تعداد کل ذرات تعریف میشود. در شکل (۲۶) متوسط تعداد تماسها برای نمونههای حاوی ذرات با نسبتهای کشیدگی متفاوت تحت تنش همهجانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال در شرایط اولیه و انتهایی (پایدار) شبیهسازیها نشان داده شده است.

شکل ۲۶- متوسط تعداد تماسها برای نمونههای حاوی ذرات با نسبتهای کشیدگی متفاوت

متوسط تعداد تماسها در شرایط ابتدایی و انتهایی آزمایش در نمونهها با افزایش نسبت کشیدگی در هندسه ذرات از ۱۵/۰ تا ۱، بهترتیب ۳۷ و ۱۷ درصد کاهش مییابد. بهعبارتی، هنگامیکه شکل ذرات به کره نزدیک است، تعداد ذراتی که میتوانند با ذره موردنظر در تماس باشند، کمتر خواهد بود. تغییرات متوسط تعداد تماسها با کرنش محوری برای نمونههای خوب و بد دانهبندی شده با ذرات کروی و غیرکروی (خوشهای) در شکل (۲۷) رسم شده است.

شکل ۲۷- تغییرات متوسط تعداد تماسها با کرنش محوری برای نمونههای کروی و غیرکروی در شرایط خوب و بد دانهبندی شده

مشاهده می شود که متوسط تعداد تماسهای هر ذره در ابتدای برش سریعاً با افزایش کرنش محوری کاهش می یابد و به یک مقدار تقریباً پایدار در انتهای آزمایش می رسد. این کاهش اولیه سریع در مقادیر متوسط تماسها می تواند ناشی از تغییرات ناگهانی در وضعیت مجموعه ذرات باشد. در واقع، متوسط تماسها ناگهانی در وضعیت مجموعه ذرات باشد. در واقع، متوسط تماسها ناگهانی در وضعیت مجموعه ذرات باشد. در می می سدی از یا یا یا است. نتایج بررسیها نشان می دهد که برای شبیه سازی های سه بعدی، جهت حفظ پایداری خاکهای دانه ای لازم است مقدار متوسط تماسها بیش از ۴ باشد (Gong و همکاران، ۲۰۱۲).

نمونه مدلسازی شده با ذرات کروی شکل در ابتدای شبیه-سازی دارای متوسط تعداد تماسها برابر با ۵/۸ میباشد و مقدار این پارامتر برای نمونهها با ذرات با اشکال پیچیده (شکل (۲۳-الف) و (۲۳– ب)) ۹ و ۲/۲ میباشد؛ این در حالی است که Gong و همکاران (۲۰۱۹) معتقد هستند که شکل ذرات اثر قابلتوجهی روی تعداد متوسط تماسها ندارد.

۴- نتیجهگیری

با توجه به این که انجام آزمایشهای آزمایشگاهی بر روی خاکهای دانهای مختلف اغلب نیازمند صرف هزینه و زمان زیادی میباشد، مدلهای عددی میتوانند بهعنوان راهکاری مناسب برای شبیهسازی رفتار خاکها به حساب آیند. یکی از کارآمدترین روش ها در بررسی رفتار این گونه خاکها، روش اجزای منفصل میباشد. از جمله خواصی که روی رفتار مکانیکی خاکهای دانهای اثر دارد، توزیع اندازه و شکل هندسی ذرات است. با استفاده از MEM می-توان ذرات با اشکال متفاوت تولید کرد و به اثر آن روی پاسخ خاکها در شرایط بارگذاریهای مختلف پرداخت.

در این پژوهش، برای ارزیابی اثر دانهبندی و شکل ذرات بر رفتار ماسهها، ابتدا تعدادی آزمایش سهمحوری تحکیم یافته زهکشی شده روی ماسه گردگوشه فیروزکوه، ماسه تیزگوشه جاجرود، ماسه گردگوشه خوب و بد دانهبندی شده فیروزکوه انجام شد. سپس، شبیهسازیهای عددی بهروش اجزای منفصل در شرایط سهبعدی بر روی نمونههای ماسهای حاوی ذرات با اشکال متفاوت تحت آزمایش سهمحوری صورت پذیرفت که به کمک نتایج تجربی بهدست آمده، کالیبره شدند. لازم بهذکر است که ذرات با اشکال پیچیده با بهرهگیری از منطق خوشه به کرههایی با شعاع-اشکال پیچیده با بهرهگیری از منطق خوشه به کرههایی با شعاع-های گوناگون و همپوشانیهای متفاوت سادهسازی شدند. این کره-ها به یکدیگر متصل شده و یک جسم صلب یکپارچه را تشکیل دادهاند.

6. Coordinate number

با توجه به تطابق نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از مدل-سازیهای عددی با استفاده از روش اجزای منفصل، مشاهده می-شود که روش DEM بهطور واقعبینانهای رفتار عمومی خاکهای دانهای را نشان میدهد و میتواند بهعنوان ابزاری جهت درک عمیقتر پاسخ خاکها بهکار رود. باید گفت که نرمافزار PFC^{3D} نیز میتواند بهعنوان یک آزمایشگاه مجازی، آزمایشهای سهمحوری را به نحو مطلوبی مدلسازی نماید و این امکان را فراهم آورد که بدون مصرف مصالح و صرف هزینه تأثیر انواع شرایط مختلف را

> از نتایج بهدست آمده، دریافت می شود که کلیه نمونههای حاوی خاک ماسهای در حالت متراکم پس از گسیختگی (تنش انحرافی حداکثر)، کرنش نرم شوندگی را تجربه می کنند. در شرایط یکسان، مقاومت برشی حداکثر و مدول مماسی ماسه جاجرود که حاوی ذرات تیزگوشه می باشد، بیش از ماسه فیروز کوه (ذرات گردگوشه) بهدست آمده است. زیرا زاویه داری ذرات، قفل و بست بین آن ها را افزایش می دهد که این پدیده موجب افزایش اصطکاک و به تبع آن، افزایش مقاومت برشی مصالح دانه ای می گردد. مقاومت برشی و مدول مماسی نمونه ها با ذرات کروی و غیر کروی در حالت بد دانه بندی شده بیش از خوب دانه بندی شده است.

بر نتایج آزمایشها بررسی نمود.

مشاهده می شود که با افزایش در نسبت کشیدگی ذرات، مقاومت حداکثر و پسماند نمونهها کاهش یافته است. کرنش متناظر با مقاومت حداکثر در نمونه با نسبت کشیدگی کم تر، کم تر از سایر نمونههاست. میزان کاهش مقاومت با کرنش در نمونه با نسبت کشیدگی کم تر، بیشتر است. با افزایش نسبت کشیدگی، ذرات به سمت کروی شدن متمایل می شوند و زاویه اصطکاک بسیچ شده در یک فشار همه جانبه معین کاهش می یابد؛ زیرا قفل و بست بین ذرات کروی کم تر بوده و در نتیجه، مقاومت برشی خاک دانه ای کاهش پیدا می کند. مدول مماسی اولیه نمونه ها با کاهش نسبت کشیدگی هندسه ذرات افزوده می شود.

برای ارزیابی کیفی ساختار میکروسکوپیک خاکهای دانهای از متوسط تعداد تماسهای هر ذره در داخل مجموعه استفاده میشود. در کلیه نمونهها، متوسط تعداد تماسها تا رسیدن به یک وضعیت پایدار کاهش مییابد. شکل ذرات اثر قابل توجهی روی تعداد متوسط تماسها دارد؛ بهطوریکه این تعداد با افزایش نسبت کشیدگی در هندسه ذرات کاهش مییابد و برای مجموعه ذرات با اشکال غیر کروی بیشتر از ذرات کروی شکل است.

۵- مراجع

اسلامی فیض آبادی ا، بررسی اثر دانهبندی بر نتایج آزمایش سه-محوری زهکشی شده بر روی مصالح دانهای توسط روش

المان منفصل، پایاننامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و

محیطزیست، دانشگاه صنعتی شیراز، ۱۳۹۳.

- Asadi M, Mahboubi A, Thoeni K, "Discrete modeling of sand-tire mixture considering grain-scale deformability", Granular Matter, 2018, 20 (2), 18-32.
- Cundall PA, "A computer model for simulating progressive, large scale movements in blocky rock systems", The International Symposium on Rock Fracture, 1971.
- Cundall PA, Strack OD, "A discrete numerical model for granular assemblies", Geotechnique, 1979, 29 (1), 47-65.
- Gong G, Lin P, Qin Y, Wei J, "DEM simulation of liquefaction for granular media under undrained axisymmetric compression and plane strain conditions", Acta Mechanica Solida Sinica, 2012, 25 (6), 562-570.
- Gong J, Liu J, "Effect of aspect ratio on triaxial compression of multi-sphere ellipsoid assemblies simulated using a discrete element method", Particuology, 2017, 32, 49-62.
- Gong J, Liu J, Cui L, "Shear behaviors of granular mixtures of gravel-shaped coarse and spherical fine particles investigated via discrete element method", Powder Technology, 2019, 353, 178-194.
- Hart R, Cundall PA, Lemos J, "Formulation of a threedimensional distinct element model-Part II. Mechanical calculations for motion and interaction of a system composed of many polyhedral blocks", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1988, 25 (3), 117-125, Pergamon.
- "Particle Flow Code in Three Dimensions (PFC3D), Version 6.00", Itasca Consulting group Inc., Minneapolis, USA, 2018.
- Jiang MD, Yang ZX, Barreto D, Xie YH, "The influence of particle-size distribution on critical state behavior of spherical and non-spherical particle assemblies", Granular Matter, 2018, 20 (4), 80-94.
- Lee SJ, Hashash YM, Nezami EG, "Simulation of triaxial compression tests with polyhedral discrete elements", Computers and Geotechnics, 2012, 43, 92-100.
- Manne A, Satyam N, "A review on the discrete element modeling of dynamic laboratory tests for liquefaction assessment", Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 20 (1), 21-46.
- Matsushima T, Saomoto H, "Discrete element modeling for irregularly Y-shaped sand grains", 5th European Conference Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Mestat (ed.), 2002, 239-246.
- Nouguier-Lehon C, Cambou B, Vincens E, "Influence of particle shape and angularity on the behaviour of granular materials: a numerical analysis", International Journal for Numerical and Analytical Methods Geomechanic, 2003, 27 (14), 1207-1226.
- Shamsi MM, Mirghasemi AA, "Numerical simulation of 3D semi-real-shaped granular particle assembly", Powder Technology, 2012, 221, 431-446.
- Tian J, Liu E, Jiang L, Jiang X, Sun Y, Xu R, "Influence of particle shape on the microstructure evolution and the mechanical properties of granular materials",

Comptes Rendus Mécanique, 2018, 346 (6), 460-476.

- Wang L, Park JY, Fu Y, "Representation of real particles for DEM simulation using X-ray tomography", Construction and Building Materials, 2007, 21 (2), 338-346.
- Xie YH, Yang ZX, Barreto D, Jiang MD, "The influence of particle geometry and the intermediate stress ratio on the shear behavior of granular materials", Granular Matter, 2017, 19 (2), 35-49.

EXTENDED ABSTRACT

Numerical and Experimental Investigations of the Effect of Gradation and Shape of Particles on the Mechanical Behavior of Granular soils

Nazanin Mahbubi Motlagh, Ahmad-Reza Mahboubi Ardakani*, Ali Noorzad

Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Received: 09 November 2019; Accepted: 21 April 2021

Keywords:

Triaxial test, Discrete element method simulations, Particle size distribution, Particle shape.

1. Introduction

Because testing on different materials often requires a lot of time and money, numerical simulation can be an acceptable method to avoid conducting several tests. One of the most effective methods to investigate the behavior of granular materials is discrete element method. This method, as a new approach, can simulate the behavior of material realistically, without implementing complex constitutive models (Wang et al, 2007; Shamsi and Mirghasemi, 2012; Tian et al, 2018).

We know that the behavior of the particle assembly is influenced by the experimental test conditions, particle size distribution, particle shapes, etc. Previous researches show that particle shape has a significant effect on the mechanical behavior of granular soil (Tian et al, 2018). Therefore, to properly model the behavior of granules, it is better to simulate the particle shape as close to reality as possible.

The main objective of this paper is to evaluate the effect of gradation and realistic particle shape on the mechanical behavior of granular soil in three dimensional discrete element method modeling in order to increase accuracy and precision of the simulation results. In this regard, in this study, irregular particles are modeled using a set of spheres that have different radii, overlap with each other and form a rigid object (clump) as shown in Fig. 1. Then, a series of consolidated drained triaxial compression tests have been performed on the specimens containing particles with various shapes. Finally, the results of the modeling were compared qualitatively with the experimental results.

Fig. 1. An example of 3D modeling of particle with 100 spheres (Matsushima and Saomoto, 2002)

* Corresponding Author

E-mail addresses: n_mahbubimotlagh@sbu.ac.ir (Nazanin Mahbubi Motlagh), ar_mahboubi@sbu.ac.ir (Ahmad-Reza Mahboubi Ardakani), A.geonek@gmail.com (Ali Noorzad).

2. Methodology

The research method consists of two parts, laboratory tests and numerical simulations using discrete element method.

2.1. Experimental study

The sands used in this study are Firuzkooh sand (rounded) and Jajrud sand (angular) which the grain size distribution curves shown in Fig. 2. In addition, the effect of well and poor graded Firuzkooh sands on their mechanical behavior is also investigated (the well and poor graded sands curves are shown in Fig. 2).

Fig. 2. Grain size distribution for sands

A series of strain-controlled consolidated drained triaxial (CD) tests were performed on the mentioned sandy samples in 75% relative density at 200kPa confining pressure.

2.2. DEM modeling

After that, the consolidated drained triaxial tests were simulated by DEM. In this model, the assembly of particles was generated according to particle size distribution curves shown in Fig. 2 in cylindrical container with flexible boundary, 1.5 cm in diameter and 3 cm in height (e=0.45). The contact model between particles was chosen linear model.

The use of flexible lateral membrane boundaries allows the model to accurately visualize the deformation properties resulting from the development of shear zones. The flexible boundaries used in this study are very close to the experimental conditions in laboratory. The top and bottom rigid platens were considered frictionless.

Fig. 3. a) Initially generated assembly without any overlap, b) flexible cylindrical boundary, c) specimen in triaxial test

The triaxial test consists of two stages: consolidation and shearing. Consolidation was done by applying the stress to the top platen of the specimen and the membrane walls. The confining pressure was constantly checked to maintain the target value during the test. The shearing stage was strain-controlled and carried out by moving downward the top platen at a constant velocity of 3×10^{-6} m/s. Fig. (3-a), (3-b) (3-c) show the initially generated assembly without any overlap, flexible cylindrical boundary and specimen in triaxial test.

3. Results and discussion

It is obvious that the real soil is rarely composed of spherical or uniform particles. Most aggregates have complex geometries and particle shape as a key parameter affects the behavior of assembly.

In many previous simulations, all particles are assumed to be spherical. Simulating soil particles with nonspherical shaped particles can better represent the true behavior of the soil. Based on clump logic, arbitrary shapes can be created as components of the model. In fact, a clump is made up of several spherical elements with different radii that are joined together to form rigid particle in the discrete element method. These simplified forms can be modeled in PFC software. The higher angularity in particle needs the more spheres to simulate, which increases the volume and time required for computation. Samples with clump-shaped particles have higher shear strengths than spherical ones. This is because as the angularity of the particles increase, the locking between them increases, leading to increase friction between the particles, resulting the higher shear strength is obtained.

It is observed that with increasing elongation ratio (aspect ratio), the particles tend to be spherical and the mobilized friction angle decreases at a given confining pressure. Because the interlocking between spherical particles is less than others and as a result its shear strength decreases.

The peak shear strength, residual strength and initial elastic modulus of poor graded sand samples are more than well graded ones.

The microscopic parameter often used to express the assemble structure is the average number of contacts (coordinate number). In fact, the number of contacts per particle is the most important parameter at the particle scale in the assembly .The average number of contacts is defined as the ratio of the twice of total number of contacts between particles to the total number of particles. It is seen that the CN initially decreases with axial strain and slowly reaches a stable value in the steady state. This micro-parameter in rounded sand particle sample is lower than angular sample.

4. Conclusions

The shape and gradation of particles are the effective parameters in mechanical behavior of granular soil. In this research, a series of consolidated drained triaxial tests were performed on the rounded, angular, poor and well graded sand samples to evaluate the effect of shape and gradation particle on soil behavior. Then, these samples were simulated by DEM. Clump logic was used to model non-spherical particles. Regarding the qualitative compatibility of the experimental results with the results of DEM modeling, it is observed that the discrete element method realistically captures the general behavior of assemble. The simulation results showed that samples with non-spherical particles have higher shear strength than spherical ones. Because the angularity of the particles increases the inter-locking between them, this phenomenon increases friction and consequently increases the shear strength of samples.

The peak shear strength (friction angle) and initial elastic modulus of the specimens containing the elongated particles are higher. The peak shear strength, residual strength and initial elastic modulus in poor graded sand samples are more than well graded ones. The value of CN for the sample with non-spherical shapes is greater than the spherical shapes.

5. References

Matsushima T, Saomoto H, "Discrete element modeling for irregularly shaped sand grains", Proc. NUMGE 2002: Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Mestat (ed.), 2002, 239-246.

Shamsi MM, Mirghasemi AA, "Numerical simulation of 3D semi-real-shaped granular particle assembly", Powder Technology, 2012, 221, 431-446.

- Tian J, Liu E, Jiang, L, Jiang X, Sun Y, Xu R, "Influence of particle shape on the microstructure evolution and the mechanical properties of granular materials", Comptes Rendus Mécanique, 2018, 346 (6), 460-476.
- Wang L, Park JY, Fu Y, "Representation of real particles for DEM simulation using X-ray tomography", Construction and Building Materials, 2007, 21 (2), 338-346.