

شبیه‌سازی عددی رفتار زهکشی‌نشده خاک دانه‌ای با ذرات چندگوشه به کمک روش اجزای مجزا

مسعود خبازیان^۱، سید احسان سیدی حسینی‌نیا^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

*seyedi@um.ac.ir

تاریخ دریافت ۹۷/۰۲/۲۹

تاریخ پذیرش ۹۷/۰۸/۱۲

چکیده

در این پژوهش، از روش اجزای مجزا برای شبیه‌سازی دو بعدی رفتار زهکشی‌نشده در مصالح دانه‌ای چندگوشه استفاده شده است. به این منظور، از دو روش حجم ثابت و استوانه استفاده شده و نتایج حاصل از هر دو روش با یکدیگر مقایسه شد. در روش استوانه فرض می‌شود که لوله‌ای میان حفرات مجاور وجود دارد و امکان تبادل آب بین مراکز حفرات فراهم می‌شود که قطر استوانه نماینده‌ای از نفوذپذیری خاک است. در روش حجم ثابت فرض می‌شود که حجم نمونه طی بارگذاری ثابت می‌ماند. شبیه‌سازی به کمک هر دو روش برای نمونه‌هایی در تنش همه‌جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال انجام شده است. نتایج نشان داد که پاسخ‌های حاصل از روش استوانه هماهنگی خوبی با روش حجم ثابت دارد و با افزایش سختی آب، نتایج هر دو روش بهم نزدیک‌تر می‌شوند. رفتار زهکشی‌نشده برحسب مقاومت برشی و فشار آب حفره‌ای متوسط در نمونه ماسه‌ای در تنش‌های همه‌جانبه مختلف به کمک روش استوانه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی هماهنگی خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد، بطوریکه در نمونه تحت تنش همه‌جانبه بیشتر، مقاومت برشی و فشار آب حفره‌ای متوسط مثبت بیشتری بوجود می‌آید. در انتها گستردگی توزیع فشار آب حفره‌ای متوسط در نمونه در کرنش‌های ۱۰ و ۳۰ درصد به کمک روش استوانه نشان داده شد و تاثیر تغییرات قطر استوانه در گستردگی توزیع فشار آب مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که فشار آب در مرکز نمونه دارای کمترین مقدار است. همچنین با افزایش قطر استوانه، فشار آب در کل حفرات نمونه، بهم نزدیک می‌شود.

واژگان کلیدی: ذرات چندگوشه، روش استوانه، روش اجزای مجزا (DEM)، شبیه‌سازی عددی

۱- مقدمه

بسیاری از خاک‌های ماسه‌ای اشباع به سبب اعمال بارگذاری، تغییر شکل‌های زیادی نشان داده و به گسیختگی می‌رسند که می‌تواند منجر به ایجاد خسارات زیادی به سازه‌های بنا شده روی آن‌ها شود. سرعت بارگذاری می‌تواند آنقدر زیاد باشد که آب درون خاک، در مدت زمان کوتاه اعمال بار نتواند از

آن خارج شود. بنابراین خاک به صورت زهکشی‌نشده رفتار می‌کند. در سال‌های اخیر، مطالعات زیادی روی تاثیر شکل ذرات بر رفتار ماسه انجام شده است. برهانی و فخاریان [۱] با انجام آزمایش‌های زهکشی‌نشده نشان دادند که در ماسه چندگوشه، تمایل به اتساع بیشتر از ماسه گردگوشه است و فشار آب حفره‌ای کمتری در نمونه زهکشی‌نشده ایجاد

می‌شود. شکل ذرات ماسه مانند ماسه‌های کوهی که حاصل فرسایش و شکست سنگ‌ها هستند، در طبیعت معمولاً چندگوشه است؛ در حالی که در بسیاری از پژوهش‌های عددی، ذرات گردگوشه فرض می‌شود.

روش اجزای مجزا (DEM) یک روش عددی است که برای مطالعه محیط‌های دانه‌ای و گسسته مورد استفاده قرار می‌گیرد. میرقاسمی و همکاران [2] از این روش برای شبیه‌سازی رفتار زهکشی‌شده ذرات چندگوشه به صورت دوبعدی با استفاده از قانون تماسی خطی بهره بردند. سیدی حسینی‌نیا و میرقاسمی [3, 4] به کمک این روش، شکست ذرات چندگوشه و سیدی حسینی‌نیا [5-8] اثر ناهمسانی بر رفتار ماسه چند گوشه را به صورت کوچک‌مقیاس بررسی کردند.

تاکنون شبیه‌سازی رفتار خاک در شرایط زهکشی‌نشده در مطالعات عددی اجزای مجزا به کمک روش‌های حجم ثابت، هیدرومکانیکی و یا روش استوانه انجام شده است. در روش حجم ثابت، فرض می‌شود که حجم نمونه حین بارگذاری است. این فرض بخاطر تراکم‌پذیری بسیار ناچیز آب نسبت به تراکم‌پذیری اسکلت خاک است. در بعضی از پژوهش‌ها از این روش برای شبیه‌سازی رفتار استاتیکی و سیکی نمونه ماسه به صورت دوبعدی با ذرات دایروی [9-11] و سه‌بعدی با ذرات کروی [12-14] بهره‌گرفته شد. مقایسه نتایج نشان داده است که رفتار مکانیکی ماسه اشباع زهکشی‌نشده با نتایج آزمایشگاهی هماهنگی خوبی دارد.

از روش تحلیل هیدرومکانیکی برای تحلیل توام جریان آب و جابه‌جایی ذرات نسبت به هم استفاده می‌شود. شفیعی‌پور و سروش [15] و همچنین خلیلی و محبوبی [16] با مدل‌سازی دوبعدی نمونه ساخته شده از ذرات دایروی، رفتار زهکشی‌نشده ماسه را به روش هیدرومکانیکی شبیه‌سازی کردند و نتایج را با روش حجم ثابت مقایسه کردند. آن‌ها نشان دادند که نتایج روش‌های هیدرومکانیکی و حجم ثابت اختلاف کمی دارند. روش هیدرومکانیکی نسبت به روش حجم ثابت، پرهزینه و زمان‌بر است. روش سوم، روش استوانه است که می‌توان از آن نیز برای مدل‌سازی رفتار

زهکشی‌نشده استفاده کرد. در این روش فرض می‌شود که حفرات میان ذرات، توسط استوانه‌هایی بهم مرتبط هستند که امکان تبادل آب بین حفرات مجاور را فراهم می‌نماید. مزیت اصلی این روش نسبت به روش‌های حجم ثابت و هیدرومکانیکی آن است که امکان بررسی هر حفره در نمونه به صورت مستقل از سایر حفرات وجود دارد. سیتارام [17] از این روش برای شبیه‌سازی شکست هیدرولیکی در مصالح دانه‌ای دایروی شکل استفاده کرد. بونیللا [18] با استفاده از این روش، رفتار زهکشی‌نشده ماسه اشباع را در آزمایش فشاری دو محوری با فرض ذرات بیضوی شبیه‌سازی کرد و نتایج را با روش حجم ثابت مقایسه نمود. مقایسه روش‌ها از هماهنگی خوب نتایج با یکدیگر حکایت داشت.

در این پژوهش، رفتار زهکشی‌نشده ماسه به روش استوانه شبیه‌سازی شده و نتایج با روش حجم ثابت مقایسه شده است. همچنین به جای ذرات دایروی و بیضوی، شکل ذرات به صورت چندگوشه لحاظ شده است. رفتار زهکشی‌نشده ماسه تحت بارگذاری با تنش‌های همه‌جانبه مختلف بررسی و نتایج ارائه شده است.

۲- معرفی روش استوانه

روش استوانه برای شبیه‌سازی رفتار زهکشی‌نشده خاک‌های دانه‌ای استفاده می‌شود که ویژگی‌های آب درون حفرات، شامل گرانروی و لزجت را هم در نظر می‌گیرد. در این روش با در نظر گرفتن امکان تبادل آب بین حفرات مجاور از طریق استوانه‌های فرضی، شرایط زهکشی‌نشده برای کل نمونه شبیه‌سازی می‌شود. جابه‌جایی ذرات ممکن است منجر به تولید فشار آب حفره‌ای اضافی شود. تفاوت فشار آب می‌تواند سبب ایجاد جریان شود که استوانه‌های بین حفرات مجاور امکان انتقال آب بین حفرات را فراهم می‌کنند. قطر استوانه‌ها در نمونه برابر است و طول آن‌ها برابر با فاصله مرکز به مرکز حفرات مجاور فرض می‌شود. دبی جریان آب مبادله شده توسط استوانه‌ها (q) از نظریه هیگن-پوزوال [19] مطابق رابطه (۱) تبعیت می‌کند:

شکل ۱. حفرات شکل گرفته بین ذرات مجاور و استوانه‌های بین آنها

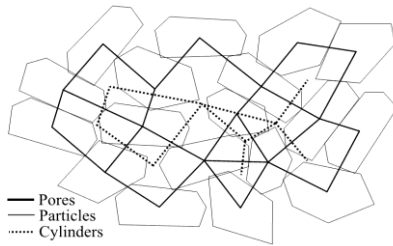


Fig. 1. Pores formed among adjacent particles and cylinders between them

شکل ۲. مساحت محصور در هر ذره و مساحت خالص حفره

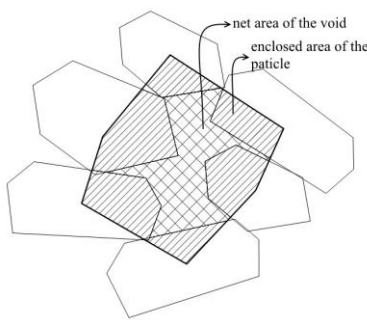


Fig. 2. Enclosed area of each particle and net area of the void

چگونگی اعمال فشار آب در حفره به ذرات مجاور در شکل (۳) نشان داده شده است. شکل (۳-الف) اعمال فشار آب عمود بر ذره را نشان می‌دهد که به صورت گسترده عمود بر سطح ذره اعمال می‌شود. براساس شکل (۳-ب) برآیند نیروی آب در حفره مجاور ذره از ضرب فشار آب حفره در سطح تماس ذره با آن حفره حاصل می‌شود و عمود بر سطح ذره اعمال می‌شود. برآیند نیروها در دو جهت x و y و لنگر محاسبه شده که در مرکز ذره اعمال می‌شود (شکل ۳-پ). پس از اعمال کرنش یا تنش به مرز نمونه، ذرات در تماس شناسایی شده و بر مبنای آن حفرات بین ذرات از اتصال مرکز ذرات در تماس به یکدیگر تشکیل می‌شوند (شکل ۱). سپس حجم حفرات محاسبه شده و پس از آن با استفاده از رابطه (۲)، تغییر فشار آب در هر حفره نسبت به گام قبل و همچنین

$$q = \frac{\pi d^4}{128\mu} \frac{(u_1 - u_2)}{L} \quad (1)$$

که d قطر استوانه، L طول استوانه و μ گرانیوی آب است. u_1 فشار آب در حفره شماره ۱ و u_2 فشار آب در حفره مجاور آن است. این رابطه از رابطه ناویر-استوکس استخراج شده است که جریان درون استوانه، آرام در نظر گرفته شده و از اثر گرانش و تغییرات حجمی آب صرف نظر می‌شود [19].

شکل (۱) حفرات حاصل از اتصال مرکز ذرات و همچنین استوانه بین حفرات مجاور در یک نمونه را نشان می‌دهد. برای شناسایی حفرات، مرکز ذرات در تماس، بهم متصل می‌شود که حلقه‌هایی از ذرات در تماس را شکل می‌دهد. هر حلقه بعنوان یک حفره شناخته می‌شود. مرکز هندسی هر چندضلعی شکل گرفته به مرکز هندسی چندضلعی‌های مجاور متصل می‌شود تا شبکه استوانه‌ها بین حفرات تشکیل شود. برای تعیین مساحت دقیق هر حفره، مساحت همپوشان بین ذرات و حلقه از مساحت حلقه کم می‌شود که در شکل (۲) نشان داده شده است. تغییر حجم هر حفره (ΔV_i) در شرایط اشباع منجر به تغییر فشار آب در هر حفره (Δu_i) می‌شود که با رابطه (۲) بیان می‌شود.

$$\Delta u_i = B_f \frac{\Delta V_i}{V_i} \quad (2)$$

V_i حجم اولیه حفره i و B_f مدول بالک سیال است. تغییرات حجمی حفره (ΔV_i) از مجموع تغییر حجم حفره ناشی از نیروی بین ذره‌ای و تغییر حجم ناشی از ورود و خروج آب به هر حفره مطابق رابطه (۳) بدست می‌آید.

$$\Delta V_i = \Delta V_i^\beta + \sum_{j=1}^n \Delta q_j \Delta t \quad (3)$$

ΔV_i^β تغییر حجم حفره i ناشی از جابجایی ذرات مجاور آن است که با تغییر حجم حفره ناشی از ورود و خروج آب از حفره j به حفره i جمع می‌شود. n تعداد حفرات در مجاورت حفره مورد نظر (i) است که با آن حفره، آب مبادله می‌شود.

شکل ۳. نمایش چگونگی اعمال نیروی ناشی از فشار آب در حفره به مرکز ذره (الف) اعمال فشار آب عمود بر سطح ذره به صورت گسترده (ب) برآیند نیروی آب در هر حفره مجاور ذره، عمود بر سطح آن و (پ) برآیند نیرو و لنگر در مرکز ذره

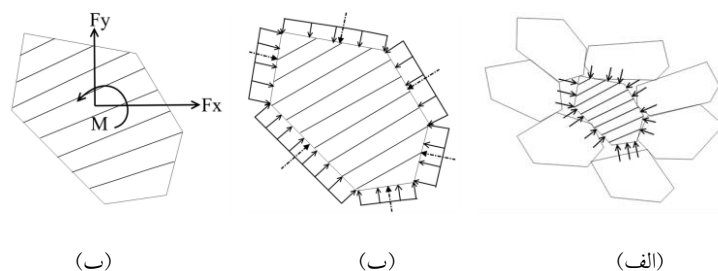


Fig. 3. Presentation of force to the center of the particle due to water pressure in the pore (a) Applying pressure perpendicularly to the particle surface extensively (b) The resultant water force in each pore adjacent to the particle, in perpendicular to the particle surface and (c) The resultant force and the moment in the center of particle

پس از آزادسازی نیروی میان ذرات، نمونه تحت فشار همه‌جانبه در راستای قائم و افقی تحکیم می‌یابد. در مرحله اعمال تنش انحرافی به روش استوانه، ابتدا فشار اولیه برابر در تمام حفرات به عنوان فشار آب حفره‌ای اولیه در نظر گرفته می‌شود. با اعمال جابه‌جایی به مرکز نمونه در امتداد قائم و در عین حال، ثابت نگه داشتن تنش در امتداد افق بعنوان تنش محصورکننده بارگذاری دومحوری آغاز می‌شود. در پژوهش حاضر، امکان تبادل آب به خارج از مرکز نمونه وجود ندارد و امکان شکست ذرات در نظر گرفته نشده است.

۳-۲- درستی‌آزمایی با پژوهش بونیا

برای تایید نتایج روش استوانه در نمونه با ذرات چندگوشه، از نتایج شبیه‌سازی بونیا [18] در تنش همه‌جانبه ۵۰ کیلوپاسکال و در سه قطر استوانه (d) ۳۰، ۱۵ و ۵۰ میکرومتر استفاده شد. بونیا [18] از ذرات بیضوی با نسبت بعد بزرگ به بعد کوچک ذره برابر با سه برای شبیه‌سازی استفاده نمود. در پژوهش حاضر سعی شد تا هندسه ذرات، به صورت هشت‌گوشه، محاط در ذرات بیضوی، مطابق شکل (۴) در نظر گرفته شود. دلیل عدم انتخاب تعداد اضلاع بیشتر، طولانی نشدن زمان تحلیل‌ها و زیاد نشدن حجم محاسبات است.

منحنی دانه‌بندی هر دو تحلیل در شکل (۵) نمایش داده شده است. کمینه و بیشینه قطر ذرات در هر دو تحلیل به ترتیب ۰/۶ و یک میلی‌متر است. مقایسه مشخصات هر دو شبیه‌سازی در جدول (۱) آمده است. بونیا [18] از قانون

فشار آب در هر حفره تعیین می‌شود. سپس با استفاده از رابطه (۱)، دبی آب ورودی و یا خروجی از هر حفره مشخص شده و بر مبنای رابطه (۳)، تغییر حجم هر حفره و همچنین حجم حفره در هر گام محاسباتی تعیین می‌شود. سپس مطابق شکل (۳)، نیروی آب به هر ذره اعمال شده و بر مبنای قانون حرکت، ابتدا شتاب و پس از آن مقدار جابه‌جایی و چرخش ذرات نسبت به گام قبل مشخص می‌شود. مدل‌سازی‌ها به کمک برنامه توسعه داده شده قبلی (برنامه POLY) توسط نویسندگان انجام شده است. این کد قبلاً توسط افراد مختلفی نظیر میرقاسمی و همکاران [2] و سیدی حسینی‌نیا و میرقاسمی [3, 4] به جهات مختلف تهیه و توسعه یافته است که قابلیت شبیه‌سازی رفتار زهکشی‌نشده به هر دو روش حجم ثابت و استوانه توسط نویسندگان انجام شده است.

۳-۳- درستی‌آزمایی

در این پژوهش، برای درستی‌آزمایی روش استوانه در نمونه با ذرات چندگوشه، از نتایج بونیا با نمونه شامل ذرات بیضوی استفاده شد [18]. همچنین نتایج برای ذرات چندگوشه با روش حجم ثابت نیز مقایسه شده است.

۳-۱- گام‌های شبیه‌سازی

گام‌های شبیه‌سازی شامل ساخت نمونه، اعمال تنش همه‌جانبه و اعمال تنش انحرافی است. در مرحله ساخت نمونه، ذرات چندگوشه به صورت تصادفی در نمونه دایروی قرار می‌گیرند. سپس نمونه در هر دو جهت متراکم می‌شود.

شکل ۵. منحنی دانه‌بندی در مطالعه بونیللا (18) و مطالعه حاضر

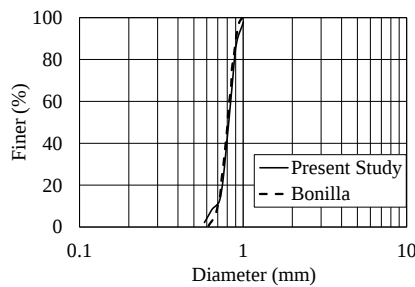


Fig. 5. Particle size distribution curve in Bonilla's study (18) and this study

جدول ۱. مشخصات شبیه‌سازی‌ها در مطالعه بونیللا (18) و مطالعه حاضر

	Bonilla's study [19]	This study
No. of particles	1000	1000
Particle shape	Ellipse	Octagon
Contact law	Hertz nonlinear	Linear
Sand density (kg/m ³)	2500	2500
Inter-particle friction coefficient (-)	0.5	0.5

Table 1. The specifications of the simulations in Bonilla's study (18) and this study

شکل (۷) گستردگی توزیع فشار آب حفره‌ای در کرنش ۰/۲ درصد در نمونه با ذرات چندگوشه و بیضوی (18) با قطرهای استوانه (d) ۱۵،۳۰ و ۵۰ میکرومتر را نشان می‌دهد. در هر دو دسته، مرکز نمونه دارای فشار آب حفره‌ای بیشینه است و با نزدیک شدن به مرزهای نمونه، فشار آب در حفرات کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش قطر استوانه، اختلاف فشار آب در حفرات نمونه کاهش می‌یابد. مطابق رابطه (۱)، با افزایش قطر استوانه‌ها، دبی آب تبادل یافته بین حفرات مجاور بیشتر می‌شود. بنابراین در هر گام زمانی، فشار آب در حفرات مجاور بهم نزدیک‌تر می‌شود.

۳-۳- درستی آزمایشی با روش حجم ثابت

برای مقایسه نتایج حاصل از روش استوانه با روش حجم ثابت، یک نمونه شامل ۱۰۰۰ ذره چندگوشه شامل نه نوع ذره با هندسه اختیاری تولید شد که هندسه و مرکز ذرات در شکل (۸) نشان داده شده است. ذرات مورد استفاده در شبیه‌سازی با

تماسی غیرخطی هرتز استفاده نمود. یعنی نیروی نرمال بین دو ذره در تماس، با جذر میزان نفوذ آن دو ذره به توان سه متناسب است. ولی در این پژوهش، از قانون تماسی خطی مشابه میرقاسمی و همکاران [2] بهره گرفته شده است. نتایج برخی از پژوهش‌ها [2، 20، 21] نشان داد که رفتار مقاومتی خاک با استفاده از قانون تماسی خطی و غیرخطی هرتز به یکدیگر نزدیک است. نسبت تخلخل نمونه، در پایان مرحله اعمال تنش همه‌جانبه در پژوهش حاضر برابر با ۰/۲۱۸ و در پژوهش بونیللا [18] برابر با ۰/۲۲۹ است. سایر پارامترهای شبیه‌سازی شامل نرخ کرنش، ثابت میرایی انتقالی و چرخشی در هر دو پژوهش، یکسان در نظر گرفته شده است.

شکل (۶) نمودار تغییرات نسبت فشار آب حفره‌ای به تنش موثر اولیه (p'_0) با کرنش انحرافی، در قطر استوانه (d) ۱۵،۳۰ و ۵۰ میکرومتر حاصل از هر دو دسته را نشان می‌دهد. تنش موثر اولیه (p'_0) برابر با ۵۰ کیلوپاسکال است. مقدار نسبت فشار آب حفره‌ای به تنش موثر اولیه در هر دو تحلیل بهم نزدیک است و هر دو روند مشابهی دارند. تفاوت بین مقادیر فشار آب حفره‌ای در دو تحلیل می‌تواند ناشی از تفاوت شکل ذرات باشد. مطابق شکل (۶-الف) در قطر استوانه ۱۵ میکرومتر، مقدار نسبت فشار آب حفره‌ای در کرنش کمتری به صفر رسیده و پس از آن، منفی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در دو قطر استوانه (d) ۱۵ و ۳۰ میکرومتر (شکل ۶-الف) و (۶-ب)) بهم نزدیک‌تر است. همانطور که قبلاً هم اشاره شد، مزیت روش استوانه نسبت به روش حجم ثابت، امکان در نظر گرفتن توزیع فشار آب حفره‌ای در توده خاک است.

شکل ۴. ذره بیضوی در مطالعه بونیللا (18) و هشت‌گوشه در مطالعه حاضر

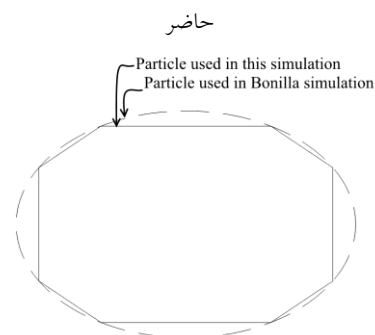


Fig. 4. The elliptic particle in Bonilla's study (18) and the octagonal particle in this study

شکل ۶. مقایسه نسبت فشار آب حفره‌ای به تنش موثر اولیه در شبیه‌سازی با ذرات چندگوشه و بیضوی (۱۸) در قطر استوانه (الف) ۱۵ میکرومتر (ب) ۳۰ میکرومتر و (پ) ۵۰ میکرومتر

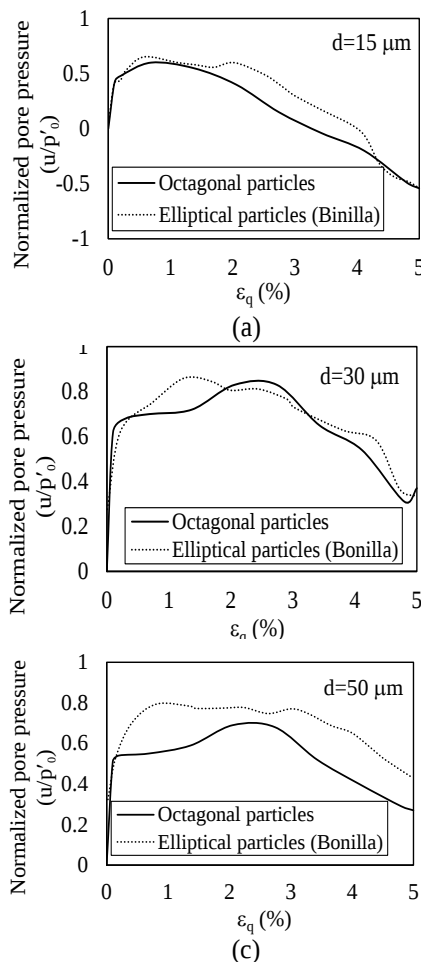


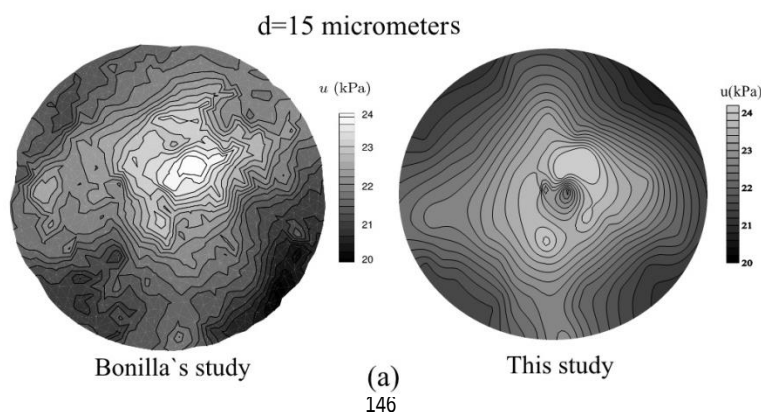
Fig. 6. Comparison of pore pressure to initial effective stress ratio in the simulations with polygonal and elliptical particles (18) with pipe diameter of (a) 15 μm , (b) 30 μm and (c) 50 μm

مقیاس یک، ۰/۸ و ۰/۶ نسبت به ابعاد نشان داده شده در شکل (۸) انتخاب شدند. ضریب یکنواختی نمونه برابر با ۱/۳۵ و ضریب خمیدگی آن ۱/۲ است. کمینه و بیشینه قطر ذرات به ترتیب ۴/۵ و ۷/۸ میلی‌متر است که نزدیک به قطر ذرات در نمونه‌های آزمایشگاهی انتخاب شده است. نسبت قطر نمونه به بزرگترین قطر ذرات ۹/۷ است که مقدار کمینه شش برابر (مشابه آزمون سه‌محوری، طبق استاندارد ASTM (22)) و ۱۰ برابر (مشابه آزمون برش مستقیم، طبق استاندارد ASTM (23)) را برآورده می‌کند.

شکل (۹) نمونه ساخته شده از ۱۰۰۰ ذره چندگوشه را نشان می‌دهد. پس از ساخت، نمونه تحت تنش همه‌جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال تحکیم یافت. پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها در جدول (۲) ارائه شده است. براساس برخی پژوهش‌ها [5-8]، مقدار سختی نرمال و مماسی برابر با ۲۰۰ مگانیوتن بر متر انتخاب شد. مقدار میرایی‌ها تأثیری در نتایج کلی شبیه‌سازی ندارد (24, 25). در روش حجم ثابت، نرخ کرنش در هر دو جهت افقی و قائم با هم برابر و خلاف جهت هم اعمال می‌شوند. این نمونه به روش استوانه هم بارگذاری شد. با در نظر گرفتن فشار آب اولیه برابر با ۱۰ کیلوپاسکال در تمام حفرات نمونه، نمونه در امتداد قائم با نرخ کرنش مشخص فشرده شد. نفوذپذیری نمونه ماسه‌ای از رابطه ارائه شده توسط چاپوس [26] به صورت رابطه (۴) محاسبه شد.

$$k = 2.4622(D_{10}^2 \frac{e^3}{1+e})^{0.7825} \quad (4)$$

شکل ۷. مقایسه گسترده‌ی توزیع فشار آب در حفرات نمونه در کرنش ۰/۲ درصد در پژوهش حاضر و پژوهش بونیا [18]



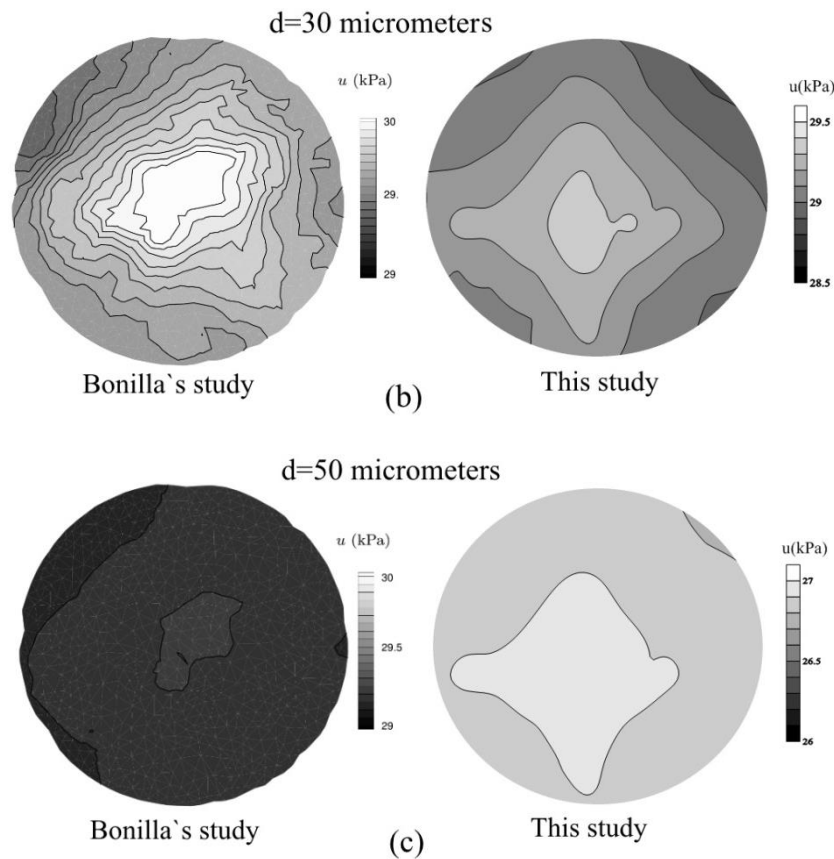


Fig. 7. Comparison of the pore pressure distribution contour in the samples at 0.2 % axial strain in this study and Bonilla's study (18)

شکل ۸. هندسه ذرات مورد استفاده در شبیه سازی

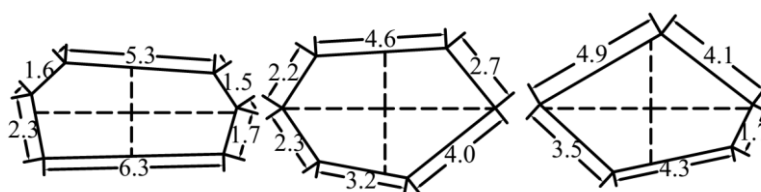


Fig. 8. Particles geometry used in the simulation

جدول ۲. مشخصات ماسه شبیه سازی شده

Normal and Tangential stiffness (N/m)	2×10^8
Viscous translational and rotational dumping coefficient	550
Density (kg/m^3)	2500
Time step increment (s)	6×10^{-7}
Inter-particle friction coefficient (-)	0.5

Table 2. Characteristics of the simulated sand

شکل ۹. نمونه تولید شده حاوی ذرات چند گوشه

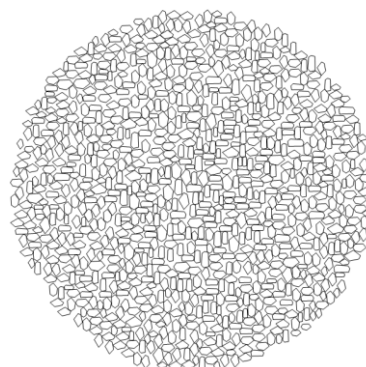


Fig. 9. Generated sample by polygonal particles

در رابطه (ϵ) ، k نفوذپذیری نمونه بر حسب سانتی متر بر ثانیه،
 e نسبت تخلخل نمونه و D_{10} قطری از ذرات بر حسب میلی متر است که ۱۰ درصد ذرات از آن کوچکترند. مقدار

نفوذپذیری در نسبت تخلخل 0.25 برابر با 0.88 سانتی‌متر بر ثانیه بدست آمد. روتنبرگ و ماتیس [27] براساس توزیع تصادفی کانال‌های جریان در یک نمونه ماسه‌ای، رابطه‌ای بین نفوذپذیری خاک و قطر استوانه بین حفرات مجاور را ارائه دادند که جهت تخمین قطر استوانه (d) از آن استفاده شد:

$$k = \frac{\pi d^4}{256\mu} z \bar{L} m_v \quad (5)$$

که k نفوذپذیری خاک، d قطر استوانه، μ لزجت آب و z عدد ثابتی کوچکتر از یک است که بر اساس یافته‌های روتنبرگ و ماتیس [27] در این پژوهش 0.9 در نظر گرفته شد. $\bar{L}$ میانگین طول استوانه‌های موجود در نمونه که برابر با $3/25$ میلی‌متر و m_v مجموع طول تمام استوانه‌های موجود در نمونه تقسیم بر مساحت نمونه است که برابر با شصت بر متر است. براساس رابطه‌های (۴) و (۵) اندازه قطر استوانه (d) 450μ میکرومتر بدست آمد. برای بررسی تاثیر سختی آب در نتایج روش استوانه، دو شبیه‌سازی انجام شد که سختی آب $B_w=2,10 \text{ GPa}$ ، گرانیوی آب $\mu=0.001 \text{ Pa.s}$ و قطر استوانه $d=450 \mu$ در نظر گرفته شد.

نمودار تنش انحرافی و فشار آب حفره‌ای میانگین در مقابل کرنش محوری، حاصل از هر دو روش استوانه و حجم ثابت در شکل (۱۰) نشان داده شده است. تنش انحرافی برابر با تفاضل تنش در امتداد افقی از تنش در امتداد قائم است و فشار آب حفره‌ای فرضی در روش حجم ثابت، از تفاضل مقدار تنش موثر متوسط در مسیرهای تنش زهکشی‌شده و زهکشی‌نشده بدست آمد. فشار آب حفره‌ای متوسط در روش استوانه، به کمک میانگین وزنی، با توجه به مساحت حفرات حاصل شد. مطابق شکل (۱۰)، نتایج حاصل از روش استوانه هماهنگی خوبی با نتایج روش حجم ثابت دارد و هر دو تحلیل روند یکسانی نشان می‌دهند. با افزایش سختی آب، پاسخ‌های دو روش بهم نزدیک‌تر می‌شود. زیرا تغییر حجم نمونه کمتر شده و شرایط آن به حجم ثابت نزدیک‌تر می‌شود. در پژوهش دیگری به طور مشابه، شفیعی‌پور و سروش [15] با تغییر سختی آب، پاسخ‌های حاصل از دو روش هیدرومکانیکی و حجم ثابت را مقایسه کردند و به این نتیجه

رسیدند که هرچه سختی آب بیشتر باشد، فشار آب حفره‌ای حاصل از دو روش بهم نزدیک‌تر است. برخلاف روش حجم ثابت، در روش استوانه، آب تبادل یافته به حفرات می‌تواند سبب جابه‌جایی ذرات شود که این نکته نیز می‌تواند سبب تفاوت رفتار تنش-کرنش در دو روش شود. پرش‌های اندک در شکل (۱۰) به دلیل حساسیت تحلیل اجزای مجزا به مقدار پارمترهای شبیه‌سازی مانند نرخ کرنش بارگذاری و همچنین ثابت میرایی کلی، انتقالی و چرخشی است. همچنین در این روش، تعداد ذرات نسبت به آزمایش‌های آزمایشگاهی محدودتر است. بنابراین جابه‌جایی یا چرخش مجموعه‌ای از ذرات در نمونه، طی بارگذاری می‌تواند سبب ایجاد پرش در پاسخ‌ها شود.

۴- مطالعه رفتار خاک زهکشی‌نشده

در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها به کمک روش استوانه برای نمونه‌ای با مشخصات شرح داده شده در بخش ۳-۳ با سختی آب $B_w=2 \text{ GPa}$ ارائه می‌شود.

۴-۱- اثر سطح تنش همه‌جانبه بر رفتار مقاومتی

برای بررسی تاثیر سطح تنش همه‌جانبه بر رفتار مقاومتی ماسه، نمونه تحت تنش‌های همه‌جانبه مختلف تحکیم پیدا کرد و آزمون فشاری دو محوری انجام شد. شکل (۱۱) تغییرات تنش انحرافی و فشار آب حفره‌ای متوسط در مقابل کرنش محوری را برای تنش‌های همه‌جانبه $200, 400, 800$ و 1600 کیلوپاسکال نمایش می‌دهد که براساس آن، با افزایش تنش همه‌جانبه، مقاومت بیشینه و مقدار فشار آب حفره‌ای متوسط مثبت در نمونه زیاد می‌شود.

۴-۲- تاثیر قطر استوانه بر فشار آب حفره‌ای نمونه

همانگونه که قبلاً بیان شد، قطر استوانه فرضی مورد استفاده در این روش، رابطه مستقیم با نفوذپذیری ماسه دارد (رابطه ۵). برای بررسی اثر تغییر قطر استوانه (d) بر مقدار فشار آب حفره‌ای، در شکل (۱۲)، گستردگی توزیع فشار آب در حفرات نمونه، در تنش همه‌جانبه 200 کیلوپاسکال برای نمونه، در تنش همه‌جانبه 200 کیلوپاسکال برای کرنش‌های

شکل ۱۱. نتایج تحلیل زهکشی نشده به روش استوانه در تنش های همه جانبه مختلف برحسب تغییرات تنش انحرافی و فشار آب حفره ای متوسط در مقابل کرنش محوری

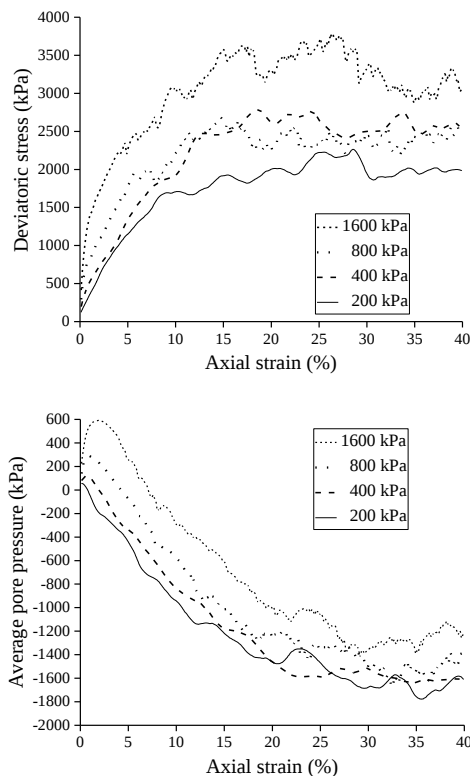


Fig.11. Undrained analysis results from cylinder method at different confining pressures in terms of variations of deviatoric stress and average pore pressure versus axial strain

۴-۳- اثر موقعیت قرارگیری حفره در مقدار فشار آب حفره ای

برای بررسی تغییرات فشار آب حفره ای حین بارگذاری در گستره نمونه، مطابق شکل (۱۳)، چهار موقعیت مختلف در نمونه در نظر گرفته شد. تغییرات فشار آب حفره ای میانگین با کرنش محوری در نمونه با تنش همه جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال در قطرهای استوانه ۴۰، ۲۰۰ و ۴۵۰ میکرومتر در شکل (۱۴) نشان داده شده است. مرکز نمونه (موقعیت ۴) در کرنش های بسیار کم، بیشترین مقدار فشار آب حفره ای را داراست که با زیاد شدن کرنش و تمایل به انبساط نمونه، مقدار فشار آب حفره ای در آن موقعیت کمتر از سایر موقعیت ها می شود. در قطر استوانه ۴۵۰ میکرومتر، اختلاف زیادی بین مقادیر فشار آب حفره ای در چهار موقعیت مشاهده نمی شود که در شکل (۱۲) نیز نتیجه مشابهی مشاهده شد. مطابق شکل (۱۴)، مقدار فشار آب حفره ای در قطر استوانه ۴۰ میکرومتر اختلاف

۱۰ و ۳۰ درصد، در قطر استوانه ۴۰، ۲۰۰ و ۴۵۰ میکرومتر بررسی شد. در هر دو کرنش، مقدار فشار آب حفره ای متوسط نمونه منفی است که در شکل (۱۱) هم نشان داده شده بود.

گسترده گی توزیع فشار آب در قطرهای مختلف استوانه از نظر کیفی مشابه است. به طوریکه تقریباً در تمامی نمونه ها، مرکز نمونه دارای کمترین فشار آب حفره ای است که با نزدیک شدن به مرزهای نمونه، مقدار فشار آب حفره ای بیشتر می شود. با افزایش قطر استوانه ها، اختلاف فشار آب بین حفرات مجاور کمتر می شود. به طوریکه در قطر استوانه ۴۵۰ میکرومتر، اغلب حفرات دارای فشار آب تقریباً یکسانی اند. با کاهش قطر استوانه ها اختلاف فشار آب بین حفرات مجاور بیشتر می شود که دلیل آن، کاهش آب تبادل یافته در هر گام زمانی است (رابطه ۱).

شکل ۱۰. مقایسه نتایج تحلیل با روش های حجم ثابت و استوانه در تنش همه جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال برحسب تغییرات تنش انحرافی و فشار آب حفره ای میانگین در مقابل کرنش محوری

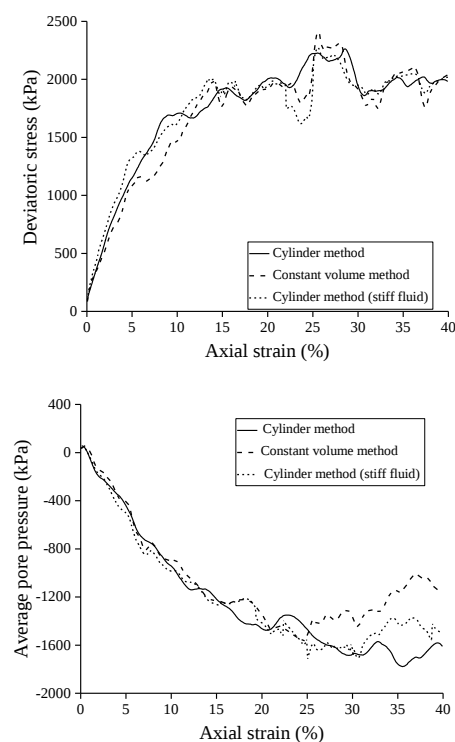


Fig. 10. Comparison of the simulation results from constant volume and cylinder methods at the confining pressure of 200 kPa in terms of variations of deviatoric stress and average pore pressure versus axial strain

ماسه پس از تحکیم تحت تنش همه‌جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال به دو روش حجم ثابت و استوانه بارگذاری شد که نتایج هر دو روش هماهنگی خوبی با یکدیگر نشان دادند. همچنین نتایج درستی‌آزمایی با ذرات چندگوشه هماهنگی خوبی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی با ذرات بیضوی در پژوهش بونیا [18] نشان داد. در شبیه‌سازی با ذرات چندگوشه، تغییرات تنش انحرافی و فشار آب حفره‌ای متوسط با کرنش محوری در نمونه بررسی شد. نمونه در سطح تنش بیشتر، دارای مقاومت برشی و فشار آب حفره‌ای مثبت بیشتری است. بررسی گسترده‌ی توزیع فشار آب در نمونه نشان داد که فشار آب حفره‌ای در مرکز نمونه دارای کمترین مقدار است. همچنین با افزایش قطر استوانه که رابطه مستقیم با نفوذپذیری خاک دارد، فشار آب در کل حفرات نمونه بهم نزدیک می‌شود. هرچه قطر استوانه و نفوذپذیری خاک کمتر باشد، اختلاف فشار آب در حفرات نمونه بیشتر شده که این اختلاف در کرنش‌های بزرگتر، بیشتر خواهد بود.

بیشتری در چهار موقعیت دارد که دلیل آن، براساس رابطه (۱)، تبادل آب کمتر بین حفرات مجاور در هر گام زمانی است. این اختلاف در ابتدای بارگذاری کمتر است، ولی با افزایش تغییر شکل‌ها بیشتر می‌شود. بنابراین هرچه قطر استوانه و نفوذپذیری خاک کمتر باشد، با ادامه تغییر شکل‌ها، فشار آب حفره‌ای بین نقاط مختلف یک نمونه اختلاف بیشتری پیدا می‌کند. فشار آب حفره‌ای در هر چهار موقعیت در قطر استوانه ۲۰۰ میکرومتر نیز اختلاف کمی دارند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش قطر استوانه و نفوذپذیری خاک بیشتر از مقداری مشخص، تاثیر زیادی در دبی آب تبادل یافته بین حفرات مجاور ندارد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش از روش اجزای مجزا برای بررسی رفتار زهکشی‌نشده ماسه اشباع استفاده شد که از قانون تماسی خطی برای تماس بین ذرات چندگوشه استفاده شد. نمونه

شکل ۱۲. گسترده‌ی توزیع فشار آب حفره‌ای نمونه در قطرهای استوانه ۴۰، ۲۰۰ و ۴۵۰ میکرومتر در کرنش (الف) ۱۰ درصد و (ب) ۳۰ درصد

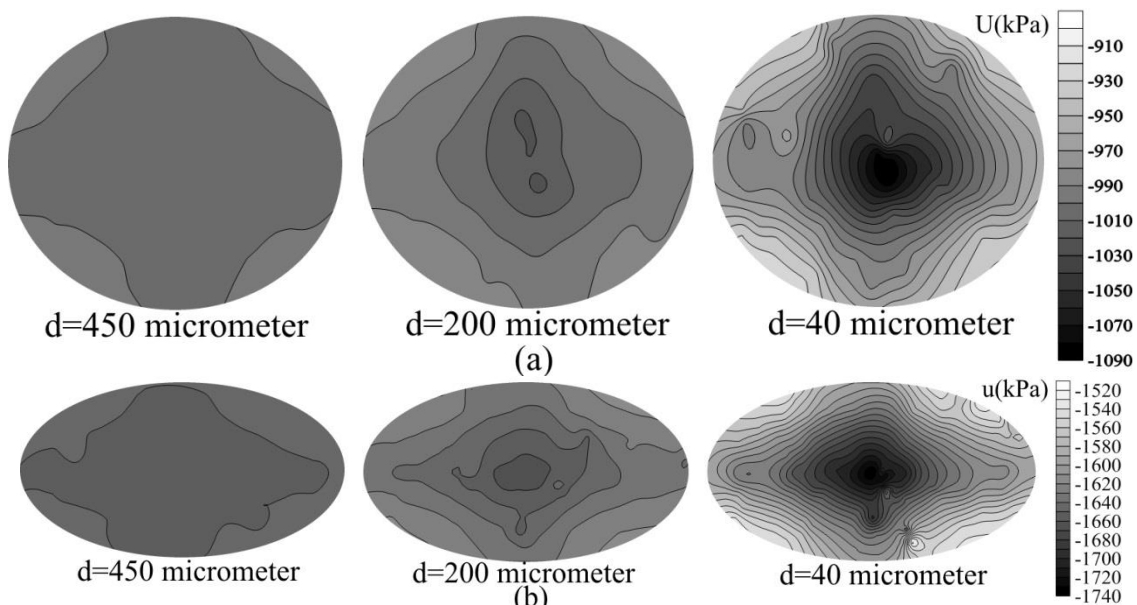


Fig. 12. Pore pressure distribution contour in the sample with the pipe diameters of 40, 200 and 450 micrometers at the strain of (a) 10% and (b) 30%

شکل ۱۳. موقعیت چهار نقطه در نظر گرفته شده جهت بررسی فشار آب حفره‌ای در تنش همه‌جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال

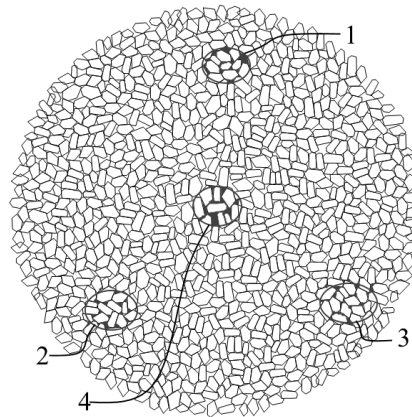


Fig. 13. The situation of the four points considered for studying water pressure variation at the confining pressure of 200 kPa

شکل ۱۴. نمودار فشار آب حفره‌ای متوسط در مقابل کرنش محوری در تنش ۲۰۰ کیلوپاسکال در هر چهار موقعیت برای قطرهای استوانه (الف) ۴۰ میکرومتر (ب) ۲۰۰ میکرومتر و (پ) ۴۵۰ میکرومتر

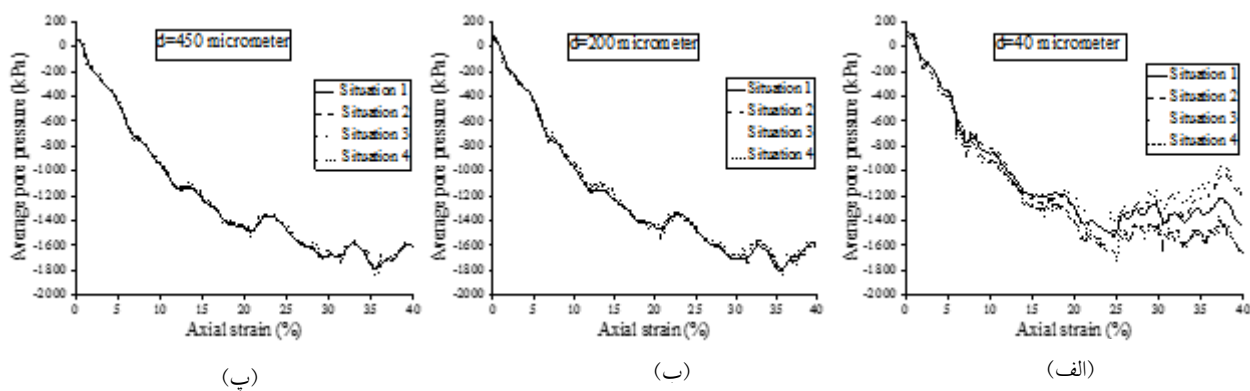


Fig. 14. Variation of average pore pressure versus axial strain at the confining pressure of 200 kPa at four points for the pipe diameters of (a) 40 micrometers (b) 200 micrometers and (c) 450 micrometers

5. Seyedi hoseininia E. 2012. Investigating the micromechanical evolutions within inherently anisotropic granular materials using discrete element method. *Granular Matter* 14: 483-503
6. Seyedi hoseininia E. 2012. Discrete element modeling of inherently anisotropic granular assemblies with polygonal particles. *Particuology* 10: 542-52
7. Seyedi hoseininia E. 2013. Stress-force-fabric relationship for planar granular materials. *Geotechnique* 10: 830-41
8. Seyedi hoseininia E. 2015. A micromechanical study on the stress rotation in granular materials due to fabric evolution. *Powder Technology* 283: 462-74
9. Dorby R, NG T-T. 1992. "Discrete Modelling of Stress-Strain Behavior of Granular Media at Small and Large Strains". *Engineering Computations* 9: 129-43
10. Dubujet P, Dedecker F. 1998. "Micro-mechanical analysis and modelling of granular

References

مراجع

1. Borhani A, Fakharian K. 2016. Effect of Particle Shape on Dilative Behavior and Stress Path Characteristics of Chamkhaleh Sand in Undrained Triaxial Tests. *International journal of civil engineering* 14: 197-208
2. Mirghasemi AA, Rothenburg L, Matyas EL. 1997. Numerical simulation of assemblies of two-dimensional polygon-shaped particles and effects of confining pressure on shear strength. *Solid Sand Foundation* 37: 43-52
3. Seyedi hoseininia E, Mirghasemi AA. 2007. Effect of particle breakage on the behavior of simulated angular particle assemblies. *China Particuology* 5: 328-36
4. Seyedi hoseininia E, Mirghasemi AA. 2006. Numerical simulation of breakage of two-dimensional polygon-shaped particles using discrete element method. *Powder Technology* 166: 100-12

20. Chantawarangul K. 1993. *Numerical Simulations of Three-Dimensional Granular Assemblies*. University of Waterloo, Waterloo
21. Cundall PA. 1987. *Computer simulations of dense sphere assemblies*. Presented at Proceedings of the U.S./Japan Seminar on the Micromechanics of Granular Materials, North-Holland, Amsterdam
22. D4767 A. 2011. "Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils". American Society for Testing and Materials
23. D6528-07 A. 2007. "Standard Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Cohesive Soils". American Society for Testing and Materials
24. Cundall PA, Strack ODL. 1979. "A discrete numerical model for granular assemblies". *Geotechnique* 29: 47-65
25. Liu Y-J, Li G, Yin Z-Y, Dano C, Hicher P, Xia X, Wang J. 2014. "Influence of grading on the undrained behavior of granular materials". *C. R. Mecanique* 342: 85-95
26. Chapuis RP. 2004. Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio. *Canadian geotechnical journal* 41: 787-95
27. Rothenburg L, Matyas EL. 1987. Statistical aspects of flow in a random network of channels. *Stochastic Hydrology and Hydraulics* 1: 217-40
- materials loaded at constant volume". *Granular Matter* 1: 129-36
11. Gong G. 2008. *DEM Simulations of Drained and Undrained Behavior*. The University of Birmingham
12. Sitharam TG, Dinesh SV. 2003. Numerical simulation of liquefaction behaviour of granular materials using Discrete Element Method. *Earth Planet Science* 112: 479-84
13. Zhao J, Guo N. 2011. Signature of Anisotropy in Liquefiable Sand Under Undrained Shear. *Advances in Bifurcation and Degradation in Geomaterials*
14. Soroush A, Ferdowsi B. 2011. Three dimensional discrete element modeling of granular media under cyclic constant volume loading: A micromechanical perspective. *Powder Technology* 212: 1-16
15. Shafipour R, Soroush A. 2008. Fluid coupled-DEM modelling of undrained behavior of granular media. *Computers and Geotechnics* 35: 673-85
16. Khalili Y, Mahbobi A. 2014. Discrete simulation and micromechanical analysis of two-dimensional saturated granular media. *Particuology* 15: 138-50
17. Sitharam TG. 1991. *Numerical simulation of hydraulic fracturing in granular media*. PhD thesis. University of Waterloo
18. Bonilla ORR. 2004. *Numerical Simulations of Undrained Granular Media*. University of Waterloo
19. Pfitzner J. 1976. Poiseuille and his law. *Anaesthesia* 31: 273-5

Numerical simulation of undrained behavior of granular material with polygonal particles by discrete element method (DEM)

Masoud Khabazian¹, Ehsan Seyedi hoseinia^{2*}

1- Ph.D. candidate in Geotechnical Eng., Faculty of Eng. Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Associate Prof., Civil Eng., Faculty of Eng. Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

*eseyedi@um.ac.ir

Abstract

In the present study, discrete element method is used to simulate undrained two-dimensional behavior of polygonal particles in which, the cylinder method is used. By this method, pore pressure of the voids in a sample can be studied independently. In the cylinder method, it is assumed that there are channels among adjacent pores and the possibility of water exchange among the centers of the pores is provided. The pipes connect the adjacent pores center. Therefore, the pipe length is equal to the center distance of two adjacent pores. The diameter of all pipes is identical which represents the permeability of the soil. First, by using this method, the variations of average pore pressure versus deviatoric strain and pore pressure distribution contour in a sample with polygonal particles were compared with another study with elliptical particles that showed good conformity. The constant volume method was also used to simulate the undrained behavior of the sample and the results of both methods were compared. In the constant volume method, it is assumed that the sample volume stays constant during loading. The simulation was done for samples by two methods. These samples were subjected to confining pressure of 200 kPa and after consolidation, were loaded under deviatoric stress. The results showed that the output obtained by the cylinder method are in good agreement with the constant volume method and by increasing the stiffness of the water, the results of both methods containing the variations of the deviatoric stress and the pore pressure are closer to each other. In following, the undrained behavior was investigated by using cylinder method in terms of shear strength and pore water pressure in a sandy sample at the confining pressures of 200, 400, 800 and 1600 kPa. The Simulation results are in good agreement with laboratory results in such a way that more confining pressure, the shear strength and pore pressure are more positive, but by increasing confining pressure, the amount of pore pressure decreases in the specimen. The pore pressure distribution contour at the strains of 10% and 30% was presented by means of cylinder method and the effect of cylinder diameter changes on the pore pressure distribution contour was investigated. Investigating the pore pressure distribution contour at the strains of 10% and 30% showed that pore pressure in the sample center has the lowest value. The pore pressure in the sample pores closes by increasing the cylinder diameter, while the smaller the diameter of the cylinder, the greater the water pressure difference among the pores. At last, the effect of pore position on the pore pressure was studied. For this purpose, four positions were considered through the sample and the variations of the average pore pressure versus axial strain at three pipe diameters of 40, 200 and 450 micrometers were investigated. The results showed that the pressure of the whole sample pores get closer by increasing the pipe diameter. As the pipe diameter decreased, the pressure difference between the sample pores gets higher and this difference will be greater in the larger strains.

Keywords: Polygonal particles, Cylinder method, Discrete element method (DEM), Numerical simulation