

مدل سازی دوبعدی رفتار خاک دانه‌ای در آزمایش سه‌محوری زهکشی شده با روش المان‌های مجزا

شهرزاد روشن خواه^۱، روزبه شفیعی پور^۲ و عباس سروش^{۳*}

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک- دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست
دانشگاه صنعتی امیرکبیر

^۲ دکتری مهندسی ژئوتکنیک- دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

^۳ دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست- دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(تاریخ دریافت ۸۵/۱۲/۱۲، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۹/۳/۳۰، تاریخ تصویب ۸۹/۴/۲۷)

هدف از مطالعه حاضر، بررسی رفتار مکانیکی {تنش- کرنش و تغییر حجم} خاک‌های دانه‌ای با توجه به فرآیندهای فیزیکی داخلی آن‌ها در مقیاس ذره است. برای این منظور از مدل‌سازی دو بعدی آزمایش سه‌محوری فشاری زهکشی شده با روش المان‌های مجزا استفاده شده است. برنامه DEM-2D برای مدل‌سازی این آزمایش‌ها بر اساس فرمولاسیون روش المان‌های مجزا انتخاب شد. آزمایش‌های عددی در حالت دومحوری بر روی نمونه‌هایی با نسبت تخلخل‌ها و فشارهای همه‌جانبه‌ی مختلف در شرایط زهکشی شده انجام شده و نتایج حاصل از این تحلیل‌ها با نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی گذشته مقایسه شده است.

: آزمایش سه‌محوری فشاری، شرایط زهکشی شده، روش المان‌های مجزا، مدل‌سازی دوبعدی،

خاک دانه‌ای

تخلخل‌ها و تحت فشارهای مختلف انجام و نتایج آن‌ها ارزیابی شده است.

در این مطالعه از روش المان‌های مجزا برای بررسی رفتار بنیادی خاک‌های دانه‌ای استفاده شده است. در روش المان‌های مجزا خاک دانه‌ای به صورت مجموعه‌ای از ذرات جدای از هم که فقط در نقاط تماس با یکدیگر اندرکنش دارند لحاظ می‌شود. تنش در خاک دانه‌ای از طریق نیروهای بین ذره‌ای در نقاط تماس منتقل می‌شود. در این مجموعه ذرات، یکسری فنر و میراگر برای شبیه‌سازی نیروهای بین ذره‌ای در نظر گرفته می‌شود. در شروع هر گام زمانی، تماس‌های بین ذره- ذره و مرز- ذره با توجه به موقعیت مرزها و ذرات نمونه شناسایی می‌شود. سپس نیروهای تماسی نرمال و برشی با استفاده از رابطه نیرو- تغییر مکان در نقاط تماس محاسبه شده و برآیند نیرو و لنگر وارد بر هر ذره تعیین می‌شود. سرعت، جابجایی و موقعیت جدید هر ذره در انتهای هر گام زمانی طبق قانون دوم نیوتن و معادلات حرکت به دست

رفتار تنش-کرنش خاک‌های دانه‌ای حاصل اندرکنش ذرات خاک در نقاط تماس با یکدیگر می‌باشد. بنابراین یک مطالعه‌ی جامع در مورد رفتار این خاک‌ها مستلزم توجه به فرآیندهای فیزیکی-مکانیکی اندرکنش ذرات در حین بارگذاری می‌باشد. بدین منظور برخی تکنیک‌های آزمایشگاهی مانند استفاده از مواد فتوالاستیک توسعه یافتند (De Josselin De Jong and Verruijt, 1969) که با مشکلات و محدودیت‌های فراوانی همراه بودند.

Strack و Cundall در سال ۱۹۷۸ روش عددی المان‌های مجزا را برای بررسی رفتار مجموعه ذرات با مدل‌سازی فرآیندهای فیزیکی بین ذرات معرفی نمودند. توانایی این روش در مدل‌سازی رفتار مصالح دانه‌ای به اثبات رسیده است. در این مطالعه، از روش المان‌های مجزا برای مدل‌سازی رفتار مصالح دانه‌ای در آزمایش سه‌محوری فشاری متداول در شرایط زهکشی شده استفاده شده است. در ادامه پس از تشریح روش تحقیق بر اساس المان‌های مجزا با استفاده از برنامه DEM-2D (به زبان فرترن)، تحلیل‌های عددی بر روی چند نمونه با دانه بندی یکنواخت و در شرایط زهکشی شده، در نسبت

می‌آید (Cundall and Strack 1979a, b). با توجه به الگوریتم و معادلات حاکم، مساله مورد بررسی یک سیستم دینامیکی است. با انتخاب یک گام زمانی مناسب و اعمال یک نرخ بارگذاری بسیار کوچک، سیستم همواره در حال تعادل استاتیکی خواهد بود. همچنین استفاده از میراگرها با اتلاف انرژی جنبشی ذرات، حصول شرایط تعادل استاتیکی مجموعه را تسریع می‌نماید (Sitharam, 2003a). در نهایت شرایط تنش در هر لحظه داخل مجموعه ذرات با استفاده از نیروهای بین ذره‌ای و بر مبنای رابطه‌ی (۱) قابل محاسبه خواهد بود:

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{V} \sum_c f_i^c I_j^c \quad (1)$$

که σ_{ij} مؤلفه‌های تانسور تنش میانگین، V حجم مجموعه ذرات، f_i^c مولفه i -ام نیروی تماسی در نقطه تماس c ، و I_j^c مولفه j -ام بردار اصل نقطه تماس به مرکز ذره می‌باشد. کرنش مجموعه ذرات نیز بر مبنای جابه‌جایی مرزهای آن محاسبه می‌شود.

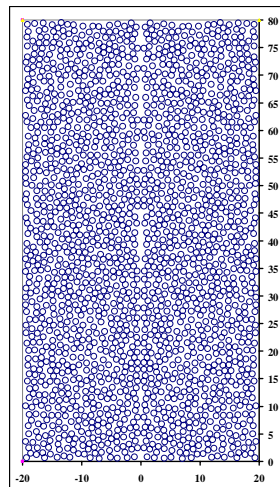
برای بررسی اثر نسبت تخلخل و فشار همه‌جانبه در رفتار خاک دانه‌ای، چند نمونه در شرایط مختلف تحت آزمایش‌های عددی قرار می‌گیرند. ابتدا برای بررسی اثر نسبت تخلخل، دو نمونه به قدری تحت تراکم اولیه^۱ قرار می‌گیرند که فشار همه‌جانبه‌ی به دست آمده در انتهای این مرحله در هر دو نمونه یکسان باشد. در این صورت دو مقدار مختلف برای نسبت تخلخل نمونه‌ها به دست می‌آید. همچنین، چند نمونه‌ی دیگر طوری ساخته می‌شوند که نمونه‌های آماده‌شده در انتهای مرحله‌ی تراکم با نسبت تخلخل یکسان باشند، در حالی که فشارهای همه‌جانبه‌ی مختلف به دست آید. یک دسته از این نمونه‌ها با نسبت تخلخل کم (متراکم) و دسته‌ی دیگر با نسبت تخلخل زیاد (شل) آماده می‌شوند.

برای آماده‌سازی نمونه‌های فوق‌الذکر، مرزها به صورت کرنش-کنترل تا زمان رسیدن به فشار یا تخلخل مورد نظر بر نمونه فشار وارد می‌کنند. در واقع در پایان مرحله-ی تراکم اولیه تا رساندن نمونه به مشخصات مورد نظر، نمونه به تعادل استاتیکی نیز می‌رسد. برای دستیابی به نمونه‌هایی با نسبت تخلخل‌های مختلف و فشار همه-جانبه‌ی یکسان و همچنین نمونه‌هایی با فشارهای همه-جانبه‌ی مختلف و نسبت تخلخل یکسان، از ضرایب اصطکاک متفاوت برای تماس ذره-ذره استفاده می‌شود.

ضریب اصطکاک رابطه‌ی مستقیمی با نیروی تماسی دارد. به این ترتیب استفاده از ضریب اصطکاک بزرگ‌تر باعث ایجاد فشار همه‌جانبه‌ی بزرگ‌تری در تخلخل مشخص می‌شود.

پس از آماده‌سازی، همه‌ی نمونه‌ها در همان فشار همه‌جانبه‌ی به دست آمده در انتهای مرحله‌ی تراکم، به صورت کرنش-کنترل تحت برش قرار می‌گیرند. نمودارهای نسبت تنش‌های اصلی و کرنش حجمی در مقابل کرنش محوری، نشان‌دهنده‌ی اثر ترکیبی میزان نسبت تخلخل و فشار همه‌جانبه در رفتار نمونه خواهد بود.

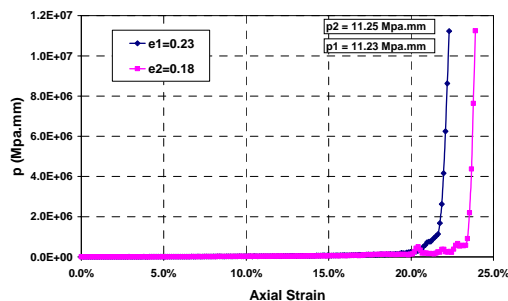
نمونه‌های مورد آزمایش با ۲۰۰۰ ذره‌ی دایروی و با قطر ۱ میلی‌متر آماده می‌شوند. در ابتدا ذرات به صورت تصادفی در یک سطح مستطیل شکل از پیش تعریف شده با نسبت اضلاع ۲ به ۱ (ارتفاع به قطر نمونه‌ی استوانه‌ای، مطابق آزمایش سه محوری متداول) و با شرط عدم وجود همپوشانی اولیه بین آن‌ها چیده می‌شوند. وضعیت قرارگیری ۲۰۰۰ ذره‌ی دیسکی در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱: نمایش چیدمان تصادفی اولیه ذرات در فضای مورد نظر.

برای تعریف و بررسی نیروهای بین ذره‌ای، نیروهای تماسی عمل‌کننده بر هر ذره به مولفه‌های نرمال و مماس بر نقطه‌ی تماس تجزیه می‌شود. قانون سختی

نمونه با فشار همه‌جانبه یکسان و تخلخل متفاوت تهیه و تحت برش زهکشی شده قرار گرفتند. روش آماده‌سازی نمونه‌ها بدین ترتیب بوده است که ابتدا نمونه اول با ضریب اصطکاک بین ذره‌ای $\mu = 0.5$ تحت تراکم قرار گرفته و در تخلخل $e_1 = 0.23$ به فشار همه‌جانبه $p_1 = 11.25 \text{ MPa.mm}$ رسید. سپس در نمونه دوم با قرار دادن ضریب اصطکاک بین ذره‌ای برابر $\mu = 0.2$ و اعمال تراکم، فشار همه‌جانبه $p_2 = 11.23 \text{ MPa.mm}$ در تخلخل $e_2 = 0.18$ حاصل شد. در شکل ۲ مشاهده می‌شود که هر دو نمونه تقریباً به یک تنش متوسط رسیده‌اند.



شکل ۲: نمودار تنش متوسط در مرحله‌ی آماده‌سازی نمونه‌هایی با فشار همه‌جانبه‌ی نهایی یکسان.

هر دو نمونه‌ی شل و متراکم با ثابت نگه داشتن فشار همه‌جانبه‌ی یکسان ($p \cong 11.24 \text{ MPa.mm}$) در اضلاع جانبی نمونه و افزایش کرنش به صورت کرنش-کنترل، با اعمال کرنش $\varepsilon_a = 25\%$ بر دو ضلع دیگر آن، تحت برش قرار گرفتند. نرخ کرنش اعمال‌شده بر این نمونه‌ها $1/s \times 10^{-5} (2.2 - 2.4)$ بوده است. در این مرحله، ضریب اصطکاک برای هر دو نمونه $\mu = 0.5$ در نظر گرفته شد.

همان‌گونه که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، وقتی نمونه‌ی شل تحت برش قرار می‌گیرد، تنش تفاضلی به تدریج افزایش می‌یابد تا به یک مقدار نهایی $(S_y - S_x)_{ult}$ برسد. اما وقتی نمونه‌ی متراکم تحت برش قرار می‌گیرد، تنش تفاضلی افزایش می‌یابد تا به یک مقدار بیشینه برسد، سپس کاهش می‌یابد تا به مقداری تقریباً نزدیک به مقدار نهایی مربوط به نمونه‌ی شل برسد. شکل (۴) نشان‌دهنده‌ی رفتار اتساعی^۲ برای نمونه-ی متراکم است، چرا که در ابتدا نمونه کمی کاهش حجم دارد ولی با افزایش کرنش، نمونه افزایش حجم می‌یابد. اما نمونه‌ی شل رفتار انقباضی تری^۳ از خود نشان می‌دهد، چرا که با افزایش کرنش کاهش حجم بیش‌تری دارد، تا

تماسی نرمال بر اساس رابطه‌ی غیر خطی هرترز انتخاب شده است، چرا که از همپوشانی زیاد المان‌ها و کاهش حجم غیرواقعی نمونه جلوگیری می‌کند (Bonilla, 2004). رابطه‌ی Mindlin & Deresiewicz (1953) به عنوان قانون سختی نیروی تماسی برشی انتخاب شد. این رابطه تابع مدول برشی و ضریب پواسون ذرات است.

برای اعمال تنش و کرنش بر توده‌ی ذرات، از مرزهای صلب استفاده شده است. بارگذاری کرنش-کنترل بر روی توده‌ی ذرات با تعریف یک سرعت خاص در جهت اعمال فشار بر مرزها انجام می‌شود. برای این‌که مجموعه‌ی ذرات به تعادل استاتیکی برسد باید به نوعی انرژی جنبشی سیستم مستهلک شود. اصطکاک در محل تماس بین ذرات خود نوعی مکانیزم میرایی محسوب می‌شود. علاوه بر آن، در این مطالعه از نوعی میرایی به نام "میرایی محلی غیرویسکوز" استفاده شده است. میرایی محلی غیرویسکوز توسط رابطه‌ی (۲) بیان می‌شود (Sitharam, 2003b):

$$F_i^D = -\alpha |F_i^{unbalance}| \text{Sign}(V_i) \quad (2)$$

که در آن:

F_i^D : نیروی میرایی وارد بر ذره‌ی i ؛

α : ضریب میرایی محلی غیرویسکوز؛

$F_i^{unbalance}$: نیروی نامتعادل روی ذره‌ی i ؛

V_i : سرعت ذره‌ی i .

پارامترهای مورد استفاده در تحلیل‌ها طبق جدول ۱ تعریف شده‌اند.

جدول ۱: پارامترهای ورودی برنامه.

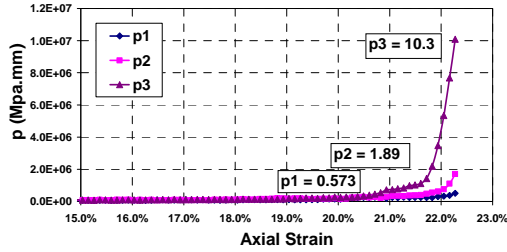
E (MPa × mm)	8.0×10^4
ν	0.25
ρ (g/mm ³)	2.7×10^5
dt (s)	0.0001
μ	Variable (0.2, 0.3, 0.4, 0.5)
α	0.75

پارامترهای فوق به ترتیب مدول الاستیسیته، نسبت پواسون، جرم مخصوص ذرات، گام زمانی، ضریب اصطکاک در محل تماس ذره-ذره و ضریب میرایی غیرویسکوز استفاده شده در برنامه می‌باشند.

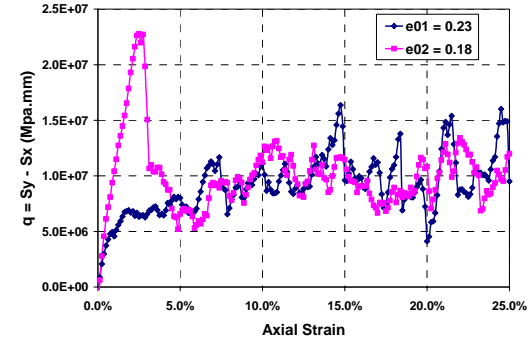
p ثابت و e متغیر

برای بررسی اثر تخلخل بر رفتار خاک دانه‌ای، دو

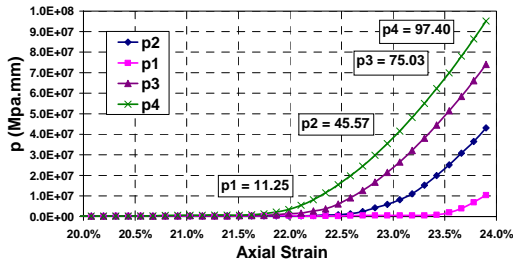
بعد از گذر از کرنش ۱۵٪، رفتار اتساعی نشان داده و افزایش حجم می‌یابد (Roshankhah, 2006).



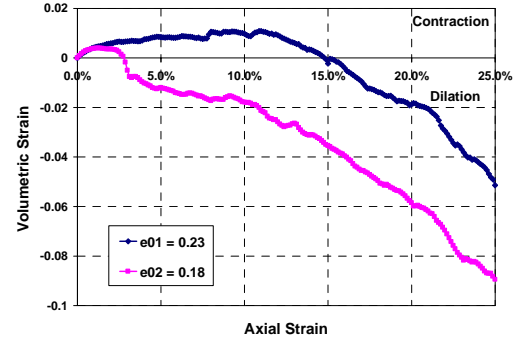
شکل ۵: نمودار تنش متوسط در مرحله‌ی آماده‌سازی نمونه‌هایی با $e_{01} = 0.2307$ و فشارهای همه‌جانبه‌ی مختلف.



شکل ۳: تنش برشی برحسب کرنش محوری برای دو نمونه با $e_{01} = 0.23$ و $e_{02} = 0.18$ و فشار همه‌جانبه‌ی یکسان.



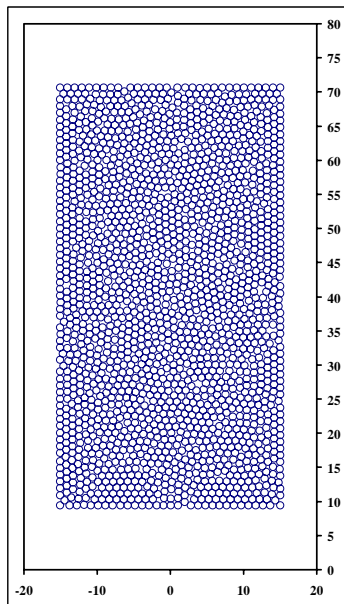
شکل ۶: نمودار تنش متوسط در مرحله‌ی آماده‌سازی نمونه‌هایی با $e_{02} = 0.18$ و فشارهای همه‌جانبه‌ی مختلف.



شکل ۴: کرنش حجمی - کرنش محوری برای دو نمونه با $e_{01} = 0.23$ و $e_{02} = 0.18$ و فشار همه‌جانبه‌ی یکسان.

جدول ۲: فشارهای همه‌جانبه در حالت نسبت تخلخل‌های یکسان و فشارهای همه‌جانبه‌ی مختلف.

Series	e	μ	P (MPa.mm)
1	0.2307	0.3	0.573
		0.4	0.89
		0.5	10.30
2	0.18	0.2	11.25
		0.3	45.57
		0.4	75.03
		0.5	97.40

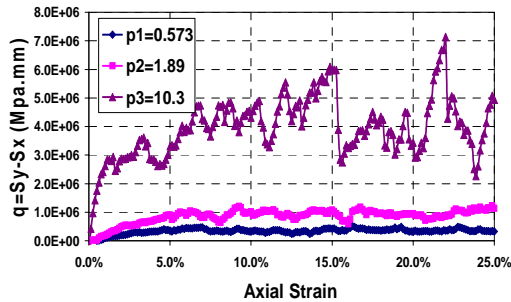


شکل ۷: نمایش چیدمان ذرات پس از مرحله‌ی آماده‌سازی نمونه تا نسبت تخلخل $e_{01} = 0.2307$ با در نظر گرفتن $\mu = 0.5$.

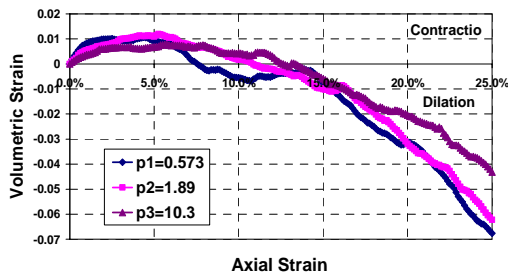
e و p

برای بررسی اثر فشار همه‌جانبه، نمونه‌هایی با نسبت تخلخل‌های $e_{01} = 0.2307$ و $e_{02} = 0.18$ ، به ترتیب با سه و چهار فشار همه‌جانبه‌ی مختلف تحت برش در حالت زهکشی‌شده قرار گرفتند.

برای ایجاد فشارهای همه‌جانبه‌ی متفاوت در انتهای مرحله‌ی تراکم با وجود نسبت تخلخل یکسان، از ضرایب اصطکاک متفاوت استفاده شد. شکل‌های (۵) و (۶) تغییرات تنش متوسط این دو گروه نمونه برحسب کرنش در مرحله‌ی آماده‌سازی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. مقادیر فشارهای همه‌جانبه‌ی به دست آمده در جدول ۲ آرایه شده‌اند. همچنین در شکل (۷) نمایشی از قرارگیری ذرات در پایان مرحله‌ی اعمال فشار همه‌جانبه برای رسیدن به تعادل و نسبت تخلخل $e_1 = 0.2307$ و با فرض $\mu = 0.5$ نشان داده شده است.

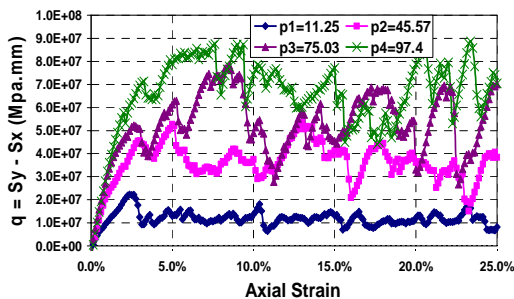


شکل ۹: تنش برشی برحسب کرنش محوری برای نمونه‌هایی با $e_{01} = 0.2307$ و فشارهای همه‌جانبه‌ی مختلف.



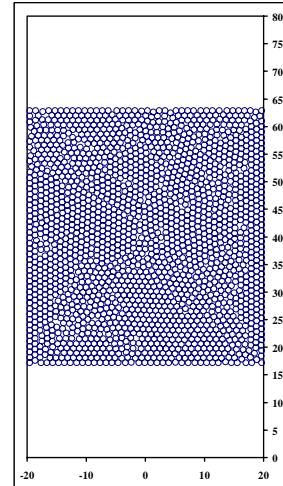
شکل ۱۰: نمودار کرنش حجمی - کرنش محوری برای نمونه‌هایی با $e_{01} = 0.2307$ و فشارهای همه‌جانبه‌ی مختلف.

منحنی‌های شکل (۱۱) نشان‌دهنده‌ی اثر فشار همه‌جانبه بر رفتار تنش-کرنش نمونه‌های متراکم ($e_{02} = 0.18$) می‌باشد؛ چرا که منحنی‌ها دارای یک مقاومت برشی ماکزیمم تقریباً مشخص بوده، سپس افت کرده و به یک مقدار ثابت رسیده‌اند. پاسخ تغییر حجمی این نمونه‌ها در شکل (۱۲) نشان داده شده است. افزایش فشار همه‌جانبه باعث افزایش مقدار حداکثر انقباض حجمی و کاهش مقدار انبساط حجمی نمونه در انتهای برش می‌شود؛ به عبارتی دیگر نمونه‌های متراکم تحت فشار همه‌جانبه‌ی بیش‌تر رفتار انقباضی‌تری از خود به نمایش می‌گذارند. شکل (۱۳) مسیره‌های تنش کل در صفحه‌ی $q:p$ را برای چهار نمونه‌ی فوق نشان می‌دهد (Roshankhah, 2006).



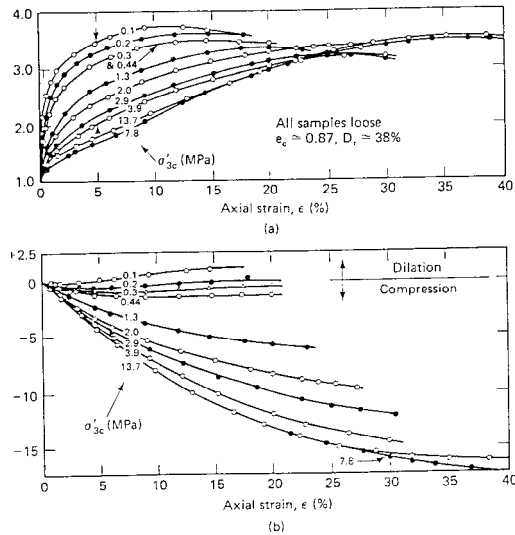
شکل ۱۱: تنش برشی برحسب کرنش محوری برای نمونه‌ای با $e_{02} = 0.18$ و فشارهای همه‌جانبه‌ی مختلف.

پس از آماده‌شدن نمونه‌ها با ثابت نگه‌داشتن فشار همه‌جانبه بر اضلاع جانبی هر نمونه، نیروی برشی به صورت کرنش-کنترل، تا $\epsilon_s = 25\%$ بر دو ضلع دیگر آن‌ها وارد شد. نرخ کرنش اعمال شده، $1/s \times 10^{-5} (2.2-2.4)$ بوده است. در این مرحله، ضریب اصطکاک برای تمام نمونه‌ها $\mu = 0.5$ در نظر گرفته شد. شکل (۸) وضعیت نمونه با $e_{01} = 0.2307$ را در پایان مرحله‌ی اعمال برش نشان می‌دهد.



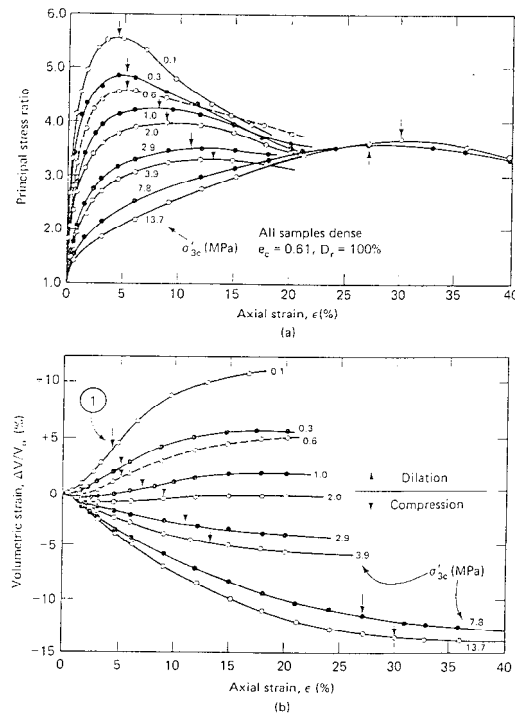
شکل ۸: نمایش چیدمان ذرات در پایان مرحله‌ی اعمال برش نمونه‌ی با $e_{01} = 0.2307$ و فشار 10.30 MPa.mm .

اثر فشار همه‌جانبه بر رفتار تنش-کرنش نمونه‌های شل ($e_{01} = 0.2307$) تحت برش زهکشی شده در شکل (۹) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که رفتار نمونه‌ها تنها وابسته به مقدار نسبت تخلخل آن‌ها نبوده، بلکه به مقدار فشار همه‌جانبه نیز بستگی دارد. به طوری که، مقاومت برشی با افزایش مقدار فشار همه‌جانبه افزایش می‌یابد. اثر فشار همه‌جانبه بر پاسخ تغییر حجمی نمونه‌های شل در شکل (۱۰) نمایش داده شده است. محور قائم در این شکل که نشان‌دهنده‌ی میزان کرنش حجمی است، در قسمت مثبت، نشان‌دهنده‌ی کاهش حجم و در قسمت منفی نشان‌دهنده‌ی افزایش حجم است. در آزمایش برش، نمونه‌های تحت فشار همه‌جانبه‌ی کم‌تر، رفتار اتساعی‌تری نسبت به نمونه‌های تحت فشار همه‌جانبه‌ی بیش‌تر از خود نشان داده‌اند. همچنین مشاهده می‌شود که در فشارهای همه‌جانبه‌ی پایین، حتی نمونه‌های شل نیز می‌توانند رفتار اتساعی از خود بروز دهند.

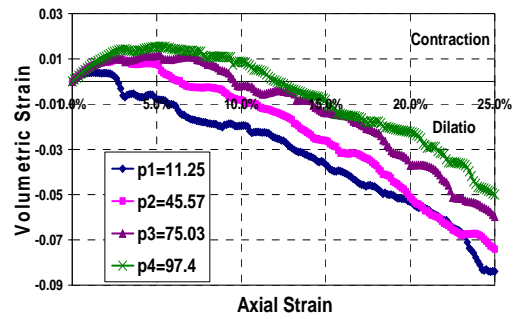


شکل ۱۴: نتایج آزمایش سه‌محوری متداول در شرایط زهکشی‌شده بر روی ماسه‌ی شل رودخانه Sacramento: (a) نسبت تنش‌های اصلی-کرنش محوری؛ (b) کرنش حجمی-کرنش محوری (Lee, 1965).

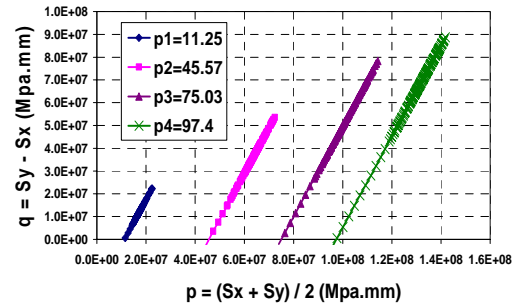
شکل (۱۵) نشان‌دهنده‌ی منحنی‌های نسبت تنش‌های اصلی و کرنش حجمی حاصل از آزمایش‌های سه‌محوری زهکشی‌شده بر روی نمونه‌های متراکمی است. ($e_0 = 0.61$)



شکل ۱۵: نتایج آزمایش سه‌محوری متداول در شرایط زهکشی‌شده بر روی ماسه‌ی متراکم رودخانه Sacramento: (a) نسبت تنش‌های اصلی-کرنش محوری؛ (b) کرنش حجمی-کرنش محوری (Lee, 1965).



شکل ۱۲: نمودار کرنش حجمی-کرنش محوری برای نمونه‌هایی با $e_{02} = 0.18$ و فشارهای همه‌جانبه‌ی مختلف.



شکل ۱۳: نمودار مسیر تنش برای نمونه‌هایی با $e_{02} = 0.18$ و فشارهای همه‌جانبه‌ی مختلف.

در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی رفتار تنش-کرنش و تغییر حجم نمونه‌هایی از ماسه‌ی شل و متراکم رودخانه Sacramento با لحاظ نمودن اثر نسبت تخلخل و فشار همه‌جانبه در آزمایش سه‌محوری فشاری زهکشی‌شده، نشان داده شده است (Lee, 1965). منحنی‌های ارایه شده در شکل (۱۴) مربوط به نتایج انجام آزمایش‌های سه‌محوری بر روی نمونه‌های شل ($e_0 = 0.87$) تحت فشارهای همه‌جانبه‌ی مختلف هستند. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، با کاهش مقدار فشار همه‌جانبه، منحنی‌ها به سمت بروز رفتار اتساعی کشیده می‌شوند به طوری که منحنی‌های نسبت تنش‌های اصلی به تدریج دارای یک نقطه حداکثر گشته و مقاومت برشی نمونه‌ها بعد از آن تا یک مقدار پس‌ماند کاهش می‌یابد. انقباض حجمی نمونه‌ها نیز با کاهش فشار همه‌جانبه کاهش یافته و نمونه تحت فشار جانبی کم در نهایت افزایش حجم می‌دهد. نتایج حاصل از مدلسازی عددی (شکل‌های ۹ و ۱۰) نیز به طور کیفی قابل مقایسه با نتایج آزمایشگاهی ارایه شده در شکل (۱۴) می‌باشد.

که مشاهده شد، روش DEM به طور واقع‌بینانه‌ای رفتار خاک‌های دانه‌ای را مدل می‌کند چرا که رفتار این مصالح مستقیماً مربوط به تماس بین ذرات در مقیاس میکرو می‌باشد و روش المان‌های مجزا نیز بر همین اساس پایه‌گذاری شده است.

مدل‌سازی دوبعدی برای مطالعه و شناخت اثر فشار همه‌جانبه و تخلخل مجموعه ذرات بر رفتار نمونه‌ای از مصالح دانه‌ای مفید و قابل قبول می‌باشد. به طوری که شبیه‌سازی رفتار عمومی خاک در حالت کرنش صفحه‌ای تقریب خوبی از رفتار آن تحت آزمایش سه‌محوری فشاری متداول به دست می‌دهد.

• روش DEM عملاً قادر به مدل نمودن رفتار خاک‌های دانه‌ای، با توجه به تغییر تخلخل و تنش محصورکننده می‌باشد.

• نتایج آزمایش‌ها به صورت منحنی‌های نسبت تنش‌های اصلی-کرنش محوری و کرنش حجمی-کرنش محوری ارائه گردید و نشان داده شد که روند کلی این نتایج به طور کیفی شبیه نتایجی است که از آزمون‌های آزمایشگاهی برای خاک‌های دانه‌ای حاصل شده است.

مشاهده می‌شود که با افزایش فشار همه‌جانبه، نقطه‌ی حداکثر منحنی مقاومت برشی نمونه از بین رفته و در فشارهای بالا نمونه‌ی متراکم همانند یک نمونه‌ی شل رفتار می‌کند. همچنین با افزایش فشار همه‌جانبه، از میزان انبساط حجمی کاسته شده و نمونه به تدریج رفتار انقباضی از خود نشان می‌دهد. نتایج مدل‌سازی عددی ارائه شده در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نیز به تطابق کیفی مناسبی با این نتایج دارند (Holtz and Kovacs, 1981).

با توجه به تطابق کیفی نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با استفاده از روش المان‌های مجزا مشاهده می‌شود که روش آنالیز عددی المان‌های مجزا به طور واقع‌بینانه‌ای رفتار عمومی مصالح دانه‌ای را نشان می‌دهد.

به منظور مطالعه اثر فشار همه‌جانبه و تخلخل اولیه بر رفتار تنش-کرنش و تغییر حجم مصالح دانه‌ای در آزمایش سه‌محوری فشاری زهکشی شده، با استفاده از روش المان‌های مجزا^۴ مجموعه ذرات دوبعدی دیسکی شکل با دانه‌بندی کاملاً یکنواخت تحت فشارهای همه‌جانبه و تخلخل‌های مختلف تهیه و تحت برش دومحوری در شرایط زهکشی شده قرار گرفتند. همان‌طور

- 1 - Bonilla, R. R. O. (2004). *Numerical Simulations of Undrained Granular Media*, Ph.D. thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada.
 - 2 - Cundall, P. A. and Hart, R. D. (1989). "Numerical modeling of discontinua." *Proc. of 1st U.S. Conference on Discrete Element Methods*, Golden, CO, PP. 1-17.
 - 3 - Cundall, P. A. and Strack, O. D. L. (1979a). "The distinct element method as a tool for research." *Report to the NSF Concerning Grant ENG76-20711*, Dept. Civil and Mineral Engineering, Univ. of Minnesota, Minneapolis, Minn.
 - 4 - Cundall, P. A. and Strack, O. D. L. (1979b). "A discrete numerical model for granular assemblies." *J. Geotechnique*, Vol. 29, No. 1, PP. 47-65.
 - 5 - De Josselin de Jong, G. and Verruijt, A. (1969). "Etude photo-elastique D'un empliment de disquetes." *Cah. Grpe fr. Etu. Rheol*, 2, 73-86.
 - 6 - Holtz, R. D. and Kovacs, W. D. (1981). *An Introduction to Geotechnical Engineering*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
 - 7 - Itasca Consulting Group, Inc. (1999). *PFC^{3D} (Particle Flow Code in 3 Dimensions) Manual*, Minneapolis, Minnesota, USA.
-

-
- 8 - Roshankhah, SH. (2006). *Numerical Modelling of Soil Behavior Under Drained Triaxial Loading with Discrete Element Method*, M.Sc. thesis, Amirkabir University of Technology (Polytechnic of Tehran), Tehran, Tehran, Iran.
- 9 - Sitharam, T. G. (2003a). *Micromechanical Modelling of Granular Media: The Power of Discrete Element Modelling*.
- 10 - Sitharam, T. G. (2003b). "Discrete element modelling of cyclic behaviour of granular materials." *Department of Civil Engineering, Indian of Science Bangalore-560 012, Indian, Geotechnical and Geological Engineering*, 21, 297-329.
- 11 - Strack, O.D.L. and Cundall, P.A. (1978). "The distinct element method as a tool for research in granular media." *Report to National Science Foundation, Dept. Civil and Mining Engineering*, University of Minnesota.
- 12 - Zhang, L. and Thornton, C. (2001). "Numerical simulations of biaxial compression." *PARTEC, International Congress for Particle Technology*, School of Engineering & Applied Science, Aston University, Birmingham B4 7ET, UK.

- 1 - Confining
2 - Dilative
3 - Contractive
4 - Discrete Element Method
-