

بررسی اثر شرایط مرزی در نتایج شبیه‌سازی آزمایش‌های دومحوره با روش اجزاء منفصل

سید محمدحسین حسینی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

سید محمد ینش* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۵ (ص. ۶۷-۷۸)
دوری ۲ - ۳۲، شماره ۲/۲، ص. ۶۷-۷۸

در این نوشتار با بهره‌گیری از روش اجزاء منفصل به شبیه‌سازی آزمایش دومحوره بر روی خاک دانه‌ی پوداخته شده است. یکی از موارد مبهم در زمینه‌ی شبیه‌سازی این آزمایش، چگونگی تأثیر شرایط مرزی در رفتار نمونه در مقیاس‌های میکرو و ماکرو است. در این راستا، ۴ نوع از شرایط مرزی مختلف شامل: شرایط مرزی صلب، شرایط مرزی انعطاف‌پذیر با رشته‌ی خارجی و نیروی نرمال بر مرز، شرایط مرزی انعطاف‌پذیر با رشته‌ی خارجی و نیروی افقی، و شرایط مرزی انعطاف‌پذیر بدون رشته‌ی خارجی در نظر گرفته شده است. مقایسه‌ی نتایج حاصل از تحلیل‌های صورت‌گرفته برای هر یک از حالت‌های مذکور نشان می‌دهد که استفاده از مرز صلب به‌عنوان مرزهای جانبی امکان دست‌یابی به شرایط حالت بحرانی را فراهم می‌سازد، اما قابلیت تعقیب روند تشکیل نوار برشی را ندارد. در مقابل، مرزهای انعطاف‌پذیر به علت آزادی عملی، که برای ذرات تحت بار فراهم می‌کنند، قابلیت آشکارسازی نوار برشی را دارند.

واژگان کلیدی: شرایط مرزی، آزمایش دومحوره، اجزاء منفصل.

۱. مقدمه

یکی از آزمایش‌هایی که از طریق آن رفتار محیط‌های دانه‌ی در فضای دو بُعدی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، آزمایش دومحوره است؛ که در آن نمونه‌ی آزمایش تحت تأثیر تنش‌های اصلی در فضای دو بُعدی قرار می‌گیرد. یکی از مشکلات مربوط به شبیه‌سازی این آزمایش توسط روش اجزاء منفصل، چگونگی مدل‌سازی واقع‌گرایانه‌ی مرزهای اطراف نمونه است. در زمینه‌ی شبیه‌سازی شرایط مرزی مختلف در مدل‌های اجزاء منفصل، اولین پژوهش در سال ۱۹۸۹ با شبیه‌سازی آزمایش برش ساده توسط مرزهای پرودیک انجام و با معرفی دانه‌های مرزی به جای مرز صلب، به بررسی پدیده‌ی گسترش نوار برشی در آزمایش شبیه‌سازی شده پرداخته شده است.^[۱] همچنین در پژوهش دیگری (۱۹۹۱) با بهره‌گیری از روش کاندال، مرز جانبی انعطاف‌پذیر به همراه کنترل تنش در آزمایش دومحوره از طریق متصل‌کردن ذرات خارجی و اعمال نیرو به هر یک از پاره‌خط‌های تولیدی بین ذرات شبیه‌سازی شده است.^[۲] پژوهشگر دیگری (۱۹۹۵) نیز با استفاده از لایه‌ی از ذرات هم‌اندازه و بدون اصطکاک شبیه به مرز انعطاف‌پذیر به آزمایش سه‌محوری پرداخته و نشان داده است که نمونه‌های با مرز انعطاف‌پذیر، مقاومت کمتری نسبت به نمونه‌های با مرز صلب دارند و رفتار تغییر حجمی خاک را به نحو مناسبی پیش‌بینی نمی‌کنند.^[۳] در پژوهش‌های صورت‌گرفته، در هر پژوهش فقط بر شبیه‌سازی یک مرز جانبی خاص تکیه شده و مقایسه‌ی بین مرزهای مختلف صورت نگرفته است. از این رو، در این نوشتار، با در نظر گرفتن یک نمونه از محیط دانه‌ی با دانه‌بندی مشخص، نحوه‌ی تأثیر شرایط مرزی مختلف در نتایج آزمایش دومحوره مورد بررسی قرار گرفته است.

شبیه‌سازی عددی یکی از راهکارهای مناسب برای پرهیز از مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی و صحرایی است. امروزه روش‌های اجزاء محدود و تفاضل محدود از متداول‌ترین ابزارها برای انجام شبیه‌سازی‌های عددی هستند. در این روش‌ها، معادلات حاکم بر محیط پیوسته با در نظر گرفتن معادلات رفتاری مصالح، شرایط مرزی و شرایط سازگاری به صورت تقریبی حل می‌شود. یکی از ضعف‌های عمده در روش‌های مبتنی بر مکانیک محیط‌های پیوسته، عدم توانایی آنها برای شبیه‌سازی محیط‌های گسسته نظیر مصالح دانه‌ی است. زیرا رفتار حاکم بر محیط‌های گسسته، پیچیدگی‌های خاصی دارد؛ که نیازمند معرفی معادلات رفتاری پیشرفته با پارامترهای زیاد است، که غالباً شبیه‌سازی آنها را بسیار پیچیده می‌سازد. همچنین با وجود استفاده از معادلات رفتاری پیشرفته، همچنان امکان بررسی میکروساختارها در روش‌های مبتنی بر مکانیک محیط‌های پیوسته وجود ندارد. با توجه به مطالب ذکر شده، احساس نیاز به روش‌های عددی پیشرفته‌تری که بتواند محیط‌های گسسته را به صورت واقع‌بینانه شبیه‌سازی کنند، بین پژوهشگران به وجود آمده است. در این زمینه اولین بار در پژوهشی در سال ۱۹۷۱ با معرفی روش اجزاء منفصل، به بررسی اثر متقابل بلوک‌های سنگی پرداخته شده است.^[۴] سپس پژوهشگران مختلفی به استفاده از روش ذکر شده در شاخه‌های مختلف مکانیک جامدات پرداخته‌اند.^[۵-۶] در این زمینه بسیاری از پژوهش‌ها بر روی شبیه‌سازی آزمایش‌های مرسوم توسط روش اجزاء منفصل و مطالعه‌ی رفتار پایه‌ی محیط‌های دانه‌ی توسط این آزمایش‌ها متمرکز شده است.^[۷-۱۰]

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۳/۲۸، اصلاحیه ۱۳۹۳/۷/۱۲، پذیرش ۱۳۹۳/۷/۳۰.

۲. مدل‌سازی آزمایش دومحوره

در این نوشتار از نرم‌افزار اجزاء منفصل PFC۲D^[۱۴] برای شبیه‌سازی آزمایش دومحوره استفاده شده است. در این بخش ابتدا مرور مختصری بر روش اجزا منفصل و قوانین حاکم بر آن صورت گرفته، سپس به نحوه‌ی ساخت نمونه‌ی مورد آزمایش پرداخته شده، و در نهایت، نحوه‌ی شبیه‌سازی مرزها و چگونگی اعمال بار خارجی مورد بررسی قرار گرفته است.

۱.۲. روش اجزاء منفصل

در روش اجزاء منفصل، رفتار دینامیکی یک سیستم ذره‌ی را می‌توان با استفاده از کاربرد قانون نیرو - جابه‌جایی و تعقیب موقعیت، سرعت، و شتاب هر ذره در زمان‌های مختلف به صورت عددی تحلیل کرد. در این زمینه بیشتر الگوریتم‌های حل، با فرض سرعت و شتاب ثابت در هر گام زمانی، مسئله‌ی دینامیکی حرکت ذرات را با استفاده از روش تفاضل محدود صریح حل می‌کنند. برای محاسبه‌ی نیروهای بین ذرات، یک مدل اندرکنش بین ذره‌ی در نظر گرفته می‌شود، که در آن نیروها به دو مؤلفه‌ی نرمال و مماس بر هر ذره تقسیم‌بندی می‌شوند و کل نیروی وارد بر هر ذره از طریق جمع‌زنی مؤلفه‌های مذکور به دست می‌آید. در این شرایط، مسئله‌ی مورد بررسی به یک مسئله‌ی انتگرال‌گیری از معادلات حرکت نیوتن برای درجات آزادی انتقالی و چرخشی تبدیل می‌شود. به این ترتیب که پس از محاسبه‌ی شتاب هر ذره، از طریق انتگرال‌گیری از شتاب در هر گام زمانی، می‌توان سرعت و موقعیت جدید هر ذره را تعیین کرد. علاوه بر این، برای حفظ پایداری عددی روش و نیز هم‌گرایی سریع‌تر به وضعیت تعادلی، در محل تماس ذرات، نیروهای میراکنده‌ی در نظر گرفته می‌شود. با توجه به مطالب ارائه‌شده لازم است که یک مدل رفتاری برای تماس‌های بین ذره‌ی در نظر گرفته شود. برای این منظور، مطابق شکل ۱، تماس بین دو ذره‌ی دایره‌ی شکل در فضای دوبعدی به صورت یک سیستم شامل: یک فنر ارتجاعی، یک لغزنده‌ی اصطکاکی، و یک میراگر در نظر گرفته شده است.

زمانی که دو ذره‌ی دایره‌ی در تماس با یکدیگر قرار می‌گیرند، تغییر فرم آنها را می‌توان از طریق مساحتی که ذرات در اثر فشرده‌شدن به یکدیگر با هم هم‌پوشانی پیدا می‌کنند، تخمین زد. با توجه به مدل فنر - میراگر، نیروی نرمال تماس را می‌توان

با استفاده از نیروی فنر و میراگر به صورت رابطه‌ی ۱ تعیین کرد:

$$\vec{F}_N = -K_N \vec{\delta}_N - D_N \vec{V}_N \quad (۱)$$

که در آن، F_N بردار نیروی نرمال و K_N ثابت فنر هستند. δ_N برداری در راستای خط اتصال مراکز دو ذره با هم‌پوشانی است، که بیان‌گر فاصله‌ی هم‌پوشانی است و از رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید:

$$\delta_N = \max(0, R_i + R_j - |\vec{r}_i - \vec{r}_j|) \quad (۲)$$

که در آن، R و r به ترتیب بیان‌گر شعاع ذرات و بردار موقعیت مرکز ذرات؛ اندیس‌های i و j نشان‌دهنده‌ی ذرات i و j ؛ D_N و V_N به ترتیب ضریب میرایی تماس و بردار سرعت نسبی بین نقاط انتهایی منطقه هم‌پوشانی نقاط C_i و C_j در شکل ۱ هستند. نیروی مماسی تماس از رابطه‌ی ۳ به دست می‌آید:

$$\vec{F}_T = -K_T \vec{\delta}_T - D_T \vec{V}_T \quad (۳)$$

که در آن، K_T ، D_T ، δ_T و V_T به ترتیب سختی، جابه‌جایی، ضریب میرایی، و سرعت لغزشی در جهت مماسی هستند.

زمانی که مقدار نیروی مماسی از رابطه‌ی ۳ به دست می‌آید و از مقدار حدی اصطکاکی کولمب (\vec{F}_{fric}) تجاوز کند، نیروی لغزشی اصطکاکی فعال می‌شود. بنابراین نیروی مماسی در محل تماس از رابطه‌ی ۴ تعیین می‌شود:

$$\vec{F}_T = -\vec{s}_{ij} \min\left(\left|K_T \vec{\delta}_T + D_T \vec{V}_T\right|, \left|\vec{F}_{fric}\right|\right) \quad (۴)$$

که در آن، T زیرنویس معرف مؤلفه در جهت مماسی و \vec{s}_{ij} بردار یکه در راستای مماس بر ذره در نقطه‌ی تماس است. این تذکر لازم است که نیروی لغزشی اصطکاکی از طریق رابطه‌ی ۵ تعریف می‌شود:

$$\vec{F}_{fric} = -\mu \left| \vec{F}_N \right| \vec{s}_{ij} \quad (۵)$$

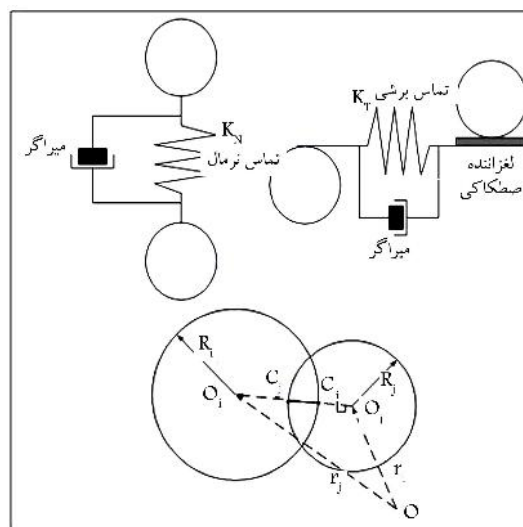
که در آن، μ ضریب اصطکاک بین ذرات است. مقادیر پارامترهای مورد استفاده در مدل فنر - میراگر در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

۲.۲. انواع شرایط مرزی در آزمایش دومحوره

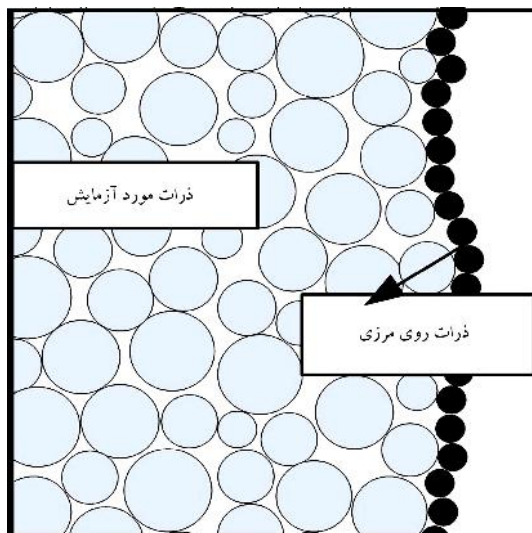
جهت بررسی اثر شرایط مرزی در نتایج آزمایش دومحوره، سه نوع مرز با رویکردهای متفاوت در نظر گرفته شده است. در ادامه، نحوه‌ی معرفی این مرزها و چگونگی عملکرد آنها بیان شده است.

جدول ۱. پارامترهای تماس بین ذرات.

پارامتر	مقدار
چگالی	۲۶۰۰
سختی تماس نرمال	7.5×10^7
سختی تماس مماسی	5×10^7
ضریب اصطکاک بین ذرات	۰/۵
ضریب میرایی	۰/۵



شکل ۱. مشخصات تماس بین دو ذره.



شکل ۳. مرز انعطاف پذیر با غشاء لاستیکی.

جدول ۲. مشخصات ذرات غشاء لاستیکی.

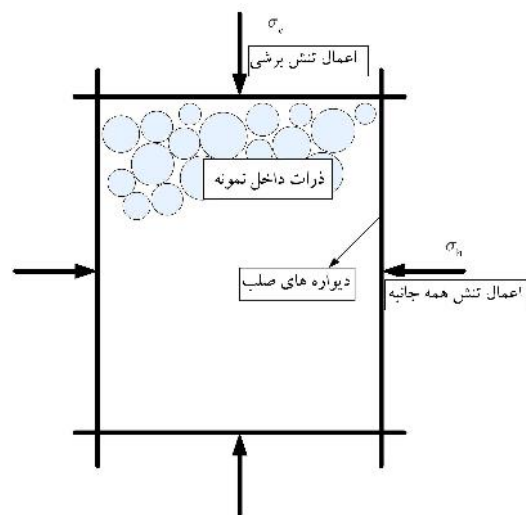
مقدار	پارامتر
۲	قطر ذرات
۱۰۰۰	چگالی
1×10^{100}	چسبندگی نرمال بین ذرات
1×10^{100}	چسبندگی مماسی بین ذرات
$3,75 \times 10^6$	سختی تماس نرمال
$2,5 \times 10^6$	سختی تماس مماسی

۲.۲.۲. مرز انعطاف پذیر با غشاء لاستیکی

با توجه به نحوه انجام آزمایش دوماحوره در شرایط آزمایشگاهی، عموماً در مرزهای جانبی، غشاهای لاستیکی به عنوان لایه واسط بین عامل تنش خارجی و نمونه آزمایشگاهی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مرزهای بالا و پایین نیز به صورت صفحات صلب هستند، که با حرکت تحت سرعت ثابت، اعمال تنش می‌کنند. برای شبیه‌سازی واقع‌بینانه‌تر مرز خارجی در آزمایش دوماحوره از مرز انعطاف پذیر استفاده می‌شود. [۱۵] در این روش مطابق شکل ۳، دیواره‌های صلب کناری حذف و رشته‌یی از دانه‌های ریز به هم چسبیده به عنوان غشاء لاستیکی و مرز انعطاف پذیر جایگزین آن می‌شود. دانه‌های رشته‌ی مذکور توسط تماس‌های نقطه‌یی محکمی به یکدیگر متصل می‌شوند، به نحوی که رشته‌ی ذرات در اثر کشش دچار از هم گسیختگی نشود، اما انعطاف پذیر باشد و قابلیت تحمل لنگر را نداشته باشد. مشخصات دانه‌های استفاده شده در رشته‌ی خارجی در جدول ۲ ارائه شده است.

به منظور اعمال تنش خارجی به مرز انعطاف پذیر دو رویکرد وجود دارد: رویکرد اول آن است که مطابق شکل ۴، با وجود تغییر فرم مرز انعطاف پذیر، جهت نیروهای اعمالی همواره عمود بر راستای مرز اولیه (بدون تغییر فرم) نمونه در نظر گرفته شود. بنابراین، در این حالت نیرو به مرکز هر ذره‌ی تشکیل‌دهنده‌ی مرز و در راستای عمود بر محور مرکزی اولیه‌ی نمونه اعمال می‌شود و هیچ مؤلفه‌ی دیگری ندارد.

رویکرد دوم، اعمال نیرو به صورت عمود بر خط واصل بین مراکز دو ذره‌ی مجاور در رشته‌ی مرزی است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در این حالت نیرویی که به مرکز هر ذره‌ی مرزی اعمال می‌شود، دو مؤلفه‌ی عمود بر هم



شکل ۲. مرز صلب.

۱.۲.۲. مرز صلب

در این نوع مرز، شرایط مرزی تنش توسط تنظیم سرعت صفحات صلب و به صورت کنترل کرنش اعمال می‌شود. روند کلی شامل تعریف صفحات صلب به عنوان مرزهای اطراف نمونه است (شکل ۲)، به نحوی که برای اعمال تنش‌های موردنظر در راستای خاص، صفحات صلب عمود بر آن راستا با سرعت مشخصی به سمت یکدیگر حرکت می‌کنند و یا از یکدیگر دور می‌شوند. سرعت دیواره‌های صلب بستگی به تنش موردنیاز و خصوصیات میکرومکانیکی نمونه دارد. براساس پیشنهاد ارائه شده در پژوهشی در سال ۲۰۰۸ [۱۴]، سرعت دیواره‌ها (\dot{u}) در هر سیکل محاسباتی از رابطه‌ی ۶ محاسبه می‌شود:

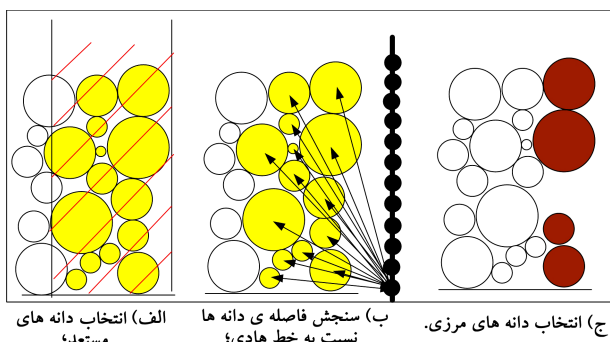
$$\dot{u} = G (\sigma^{measured} - \sigma^{required}) = G \Delta \sigma \quad (6)$$

که در آن، $\sigma^{measured}$ و $\sigma^{required}$ به ترتیب تنش موردنیاز و تنش قرانت شده بر روی دیواره در هر سیکل محاسباتی هستند. G پارامتری است که به خصوصیات میکرومکانیکی نمونه بستگی دارد و از رابطه‌ی ۷ به دست می‌آید:

$$G = \frac{\alpha A}{k_n^w N_c \Delta t} \quad (7)$$

که در آن، A مساحت دیواره، k_n^w متوسط سختی ذرات روی دیواره، N_c تعداد تماس‌های روی دیواره، و Δt گام زمانی در هر سیکل محاسباتی است. α نیز ضریب کاهش می‌باشد که برای پایداری روش اعمال می‌شود و در این مطالعه، 0.5 در نظر گرفته شده است.

روند کلی اعمال تنش‌های یکنواخت توسط مرز صلب بدین صورت است که با مشخص بودن مقدار تنشی که باید به مرز اعمال شود (تنش موردنیاز)، با استفاده از رابطه‌ی ۶، سرعت حرکت صفحات تنظیم می‌شود. در هر سیکل محاسباتی میزان تنش بین نمونه و مرز از طریق تقسیم مؤلفه‌ی عمودی نیروی ایجاد شده در محل تماس ذرات با دیواره بر مساحت دیواره به دست می‌آید. در این راستا، از طریق کنترل پیایی (سر- کنترل)، سرعت صفحات به نحوی تنظیم می‌شود که تنش به دست آمده بر روی دیواره (تنش قرانت شده) با تنش موردنیاز (با در نظر گرفتن یک حد تحمل خاص) برابر شود. بدین ترتیب از طریق کنترل سرعت صفحات صلب می‌توان تنش خارجی را اعمال کرد.



شکل ۶. روند تشکیل مرز بدون غشاء لاستیکی.

می‌شود. در صورتی که برای دو نقطه روی خط هادی، یک ذره به عنوان نزدیک‌ترین ذره تشخیص داده شود، آن ذره فقط یک بار در حافظه‌ی رایانه ذخیره می‌شود. روند تشخیص مرز در شکل ۶ نشان داده شده است. پس از تشخیص ذرات مرزی، اثر تنش محصورکننده از طریق اعمال نیروها به مراکز این ذرات شبیه‌سازی می‌شود. به نحوی که نیروی وارد بر تک ذره‌ی مرزی i در جهت اعمال تنش محصورکننده از رابطه‌ی ۱۰ به دست می‌آید:

$$F_i = (\sum R_i) \frac{A_b}{\sum_{j=1}^{N_b} (\sum R_j)} \sigma_{xx} \quad (10)$$

که در آن، F_i نیروی وارد بر تک ذره‌ی i ، A_b سطح مرز اولیه، R_i شعاع ذره‌ی مرزی i ، N_b تعداد ذرات مرزی، و σ_{xx} مقدار تنش محصورکننده هستند.

۳. شبیه‌سازی عددی

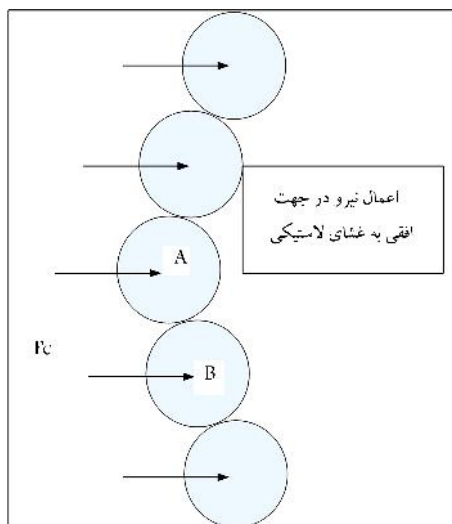
در این نوشتار برای ساخت عددی نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش دوجمله‌ای در روش تراکم در چند لایه استفاده شده است، که مزیت عمده‌ی آن تولید نمونه‌های همگن به خصوص برای نمونه‌های شل است. [۱۶] اصول کلی روش مبتنی بر انتخاب تعداد و قطر دانه‌ها، انتخاب نسبت تخلخل هدف و ایجاد نمونه در لایه‌های مختلف است. در ادامه، هر یک از مراحل به تفصیل شرح داده شده است.

۱.۳. انتخاب تعداد و قطر دانه‌ها

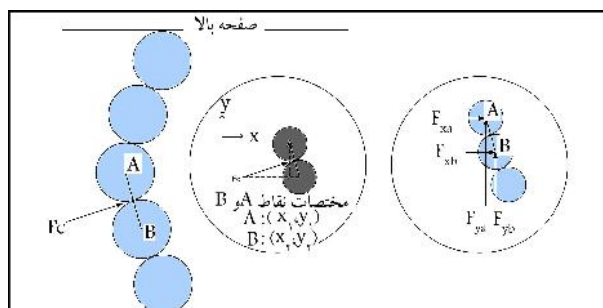
برای شبیه‌سازی محیط خاک دانه‌ی بی توسط مصالح ایده‌آل شده در روش اجزاء منفصل، منحنی توزیع ذرات مطابق شکل ۷ در نظر گرفته شده است. با توجه به منحنی مشاهده شده در شکل ۷، بزرگ‌ترین قطر مصالح در روش اجزاء منفصل ۹ میلی‌متر و کوچک‌ترین قطر ۶ میلی‌متر است. این در حالی است که قطر متوسط دانه‌ها ۷٫۶ میلی‌متر و ضریب یکنواختی مصالح C_u ۱٫۳ است. تعداد دانه‌های به کار برده شده در مدل اجزاء منفصل برای هر شعاع مشخص از رابطه‌ی ۱۱ تعیین شده است: [۱۶]

$$N_i = \frac{P_i}{r_i^3 P} N \quad (11)$$

که در آن، N_i تعداد کل دانه‌هایی است که شعاعی برابر با r_i و P_i درصد وزنی این ذرات در کل نمونه است. N نیز تعداد کل ذرات با شعاع‌های مختلف است، که در



شکل ۴. اعمال نیروی افقی به مرز انعطاف‌پذیر با غشاء لاستیکی.



شکل ۵. اعمال نیروی نرمال با مرز انعطاف‌پذیر با غشاء لاستیکی.

دارد. در این حالت مؤلفه‌های نیروی اعمالی بر هر ذره‌ی مرزی با توجه به شکل ۵، با استفاده از رابطه‌های ۸ و ۹ به دست می‌آیند:

$$F_x = \sigma_{xx} \frac{y_1 - y_2}{\sqrt{(y_1 - y_2)^2 + (x_1 - x_2)^2}} \quad (8)$$

$$F_y = \sigma_{xx} \frac{x_1 - x_2}{\sqrt{(y_1 - y_2)^2 + (x_1 - x_2)^2}} \quad (9)$$

که در آن‌ها، (x_1, y_1) و (x_2, y_2) به ترتیب مختصات نقاط A و B هستند. σ_{xx} نیز تنش همه‌جانبه‌ی موردنیاز در جهت افقی است.

۳.۲.۲. مرز انعطاف‌پذیر بدون غشاء لاستیکی

برای شبیه‌سازی این نوع مرز، هیچ‌گونه رشته‌ی مرزی تعریف نمی‌شود و نیروی خارجی مستقیماً به مرکز ذراتی از نمونه، که به عنوان مرز عمل می‌کنند، اعمال می‌شود. ذرات مذکور در طی روند محاسباتی تشخیص داده می‌شوند و به اصطلاح به‌روز می‌شوند. برای این منظور، محدوده‌ی در حدود ۲ برابر قطر بزرگ‌ترین ذره در طرفین مرز اولیه‌ی نمونه (مرزهای جانبی) در نظر گرفته می‌شود. دانه‌های قرارگرفته در این محدوده، پتانسیل تبدیل شدن به ذرات مرزی را دارند. سپس یک خط هادی در کنار هر یک از مرزهای جانبی به گونه‌ی در نظر گرفته می‌شود تا اطمینان حاصل شود که نمونه حتی پس از تغییر فرم، با آن خط برخورد نمی‌کند. خط موردنظر به قطعاتی با طول کمتر از اندازه‌ی کوچک‌ترین دانه تقسیم‌بندی می‌شود. با مینا قراردادن هر یک از نقاط به دست آمده بر روی خط هادی (حاصل از تقسیم‌بندی)، فاصله‌ی تمامی ذرات نسبت به آن نقطه سنجیده و نزدیک‌ترین دانه به نقطه‌ی مینا به عنوان دانه‌ی مرزی در نظر گرفته می‌شود. همین روند برای سایر نقاط ایجادشده بر روی خط هادی تکرار

این مطالعه ۲۴۰۰۰ است. پارامتر P نیز از رابطه‌ی ۱۲ به دست می‌آید:

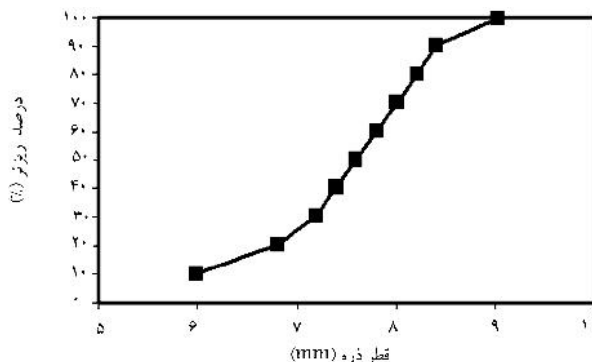
$$P = \sum_{i=1}^{n_T} \frac{P_i}{r_i^2} \quad (12)$$

که در آن، n_T تعداد کل شعاع‌های در نظر گرفته شده برای مجموعه‌ی ذرات است. در این مطالعه با توجه به شکل ۷، این عدد ۱۰ است.

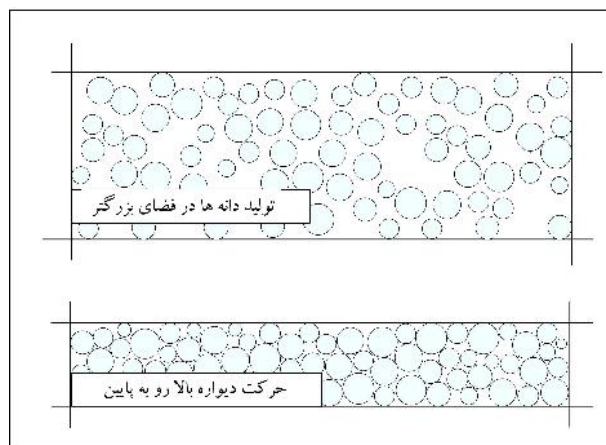
۲.۳. ایجاد نمونه با روش تراکمی چندلایه [۱۶]

برای ایجاد نمونه‌ی همگن با روش تراکمی چندلایه، نسبت تخلخل صفحه‌ی برابر با ۰٫۲۴ به عنوان متوسط نسبت تخلخل هدف در نظر گرفته شده و ساخت نمونه در ۸ لایه صورت پذیرفته است. برای این منظور به هر لایه تعداد ۳۰۰ ذره (یک هشتم کل تعداد ذرات) اختصاص داده شده است، که به صورت تصادفی در محیط مشخصی به عرض ۸۰ میلی‌متر توزیع شده‌اند. نسبت تخلخل اولیه‌ی که براساس آن توزیع تصادفی ذرات صورت گرفته است، حدود ۰٫۶ (تقریباً ۲ برابر نسبت تخلخل هدف پس از تراکم) است. سپس مطابق شکل ۸، با ثابت نگه داشتن صفحات جانبی و پایینی و حرکت صفحه‌ی فوقانی به سمت پایین با سرعت ثابت ۰٫۵ متر بر ثانیه، هر لایه تا نسبت تخلخل صفحه‌ی مورد نظر تراکم می‌شود.

برای اطمینان از اینکه نمونه‌ی کلی که متشکل از تمامی لایه‌هاست، به نسبت تخلخل متوسط نهایی \bar{e}_f برسد، باید اختصاص نسبت تخلخل صفحه‌ی هدف به نحوی باشد که مقدار آن از لایه‌های پایینی به سمت لایه‌های بالایی کاهش یابد. در این راستا، اگر برای لایه‌ی ۱ که پایین‌ترین لایه است، نسبت تخلخل e_1 اختصاص



شکل ۷. منحنی توزیع قطر دانه‌ها.



شکل ۸. تولید دانه‌ها با روش تراکمی چندلایه.

یابد، باید شرط $e_1 > \bar{e}_f$ برقرار باشد. حال به لایه‌ی ۲ نسبت تخلخلی اختصاص می‌یابد که متوسط نسبت تخلخل‌های لایه‌های ۱ و ۲ یعنی $e_{(1+2)}$ ، بزرگ‌تر از \bar{e}_f باشد. این روند به همین شکل ادامه می‌یابد، تا در نهایت متوسط نسبت‌های تخلخل همان نسبت تخلخل هدف شود. به بیان دیگر، برای ۸ لایه رابطه‌ی ۱۳ را خواهیم داشت:

$$e_1 > e_{(1+2)} > e_{(1+2+3)} > \dots > e_{(1+2+\dots+8)} = \bar{e}_f \quad (13)$$

توزیع $e_1, e_{(1+2)}, \dots, e_{(1+2+\dots+8)} = \bar{e}_f$ با استفاده از روش آزمون و خطا به دست می‌آید.

براساس مطالعه‌ی در سال ۲۰۰۳ [۱۶]، نسبت تخلخل کمتر از ۰٫۲۶ در محیط دو بُعدی معادل حالت متراکم است. بر این اساس با توجه به شرایط دانه‌بندی، پارامترهای میکرو، و شرایط تراکمی محیط دانه‌ی ایجاد شده می‌توان آن را معادل یک خاک دانه‌ی متراکم با زاویه‌ی اصطکاک داخلی ۲۶٫۵ درجه در نظر گرفت.

۴. بررسی نتایج

۴.۱. رفتار تنش - کرنشی نمونه‌ها

یکی از شاخصه‌های مهم رفتاری مصالح در مقیاس ماکرو، نحوه‌ی تغییرات تنش در مقابل تغییرات کرنش در آنهاست. برای بررسی چگونگی رفتار تنش - کرنشی نمونه‌ها لازم است که مقادیر تنش‌ها و کرنش‌های اصلی در هر نمونه مشخص شود. برای تعیین تنش‌های اصلی بر روی هر یک از مرزها، مجموع مؤلفه‌های نیروهای تماسی در راستای عمود بر مرز تعیین می‌شود و با تقسیم این حاصل جمع بر مساحت مربوط، متوسط تنش نرمال بر روی مرز تعیین می‌شود. سپس در هر یک از راستاهای اصلی، با میانگین‌گیری از تنش‌های به دست آمده در مرزهای مقابل به هم، تنش اصلی در راستای مورد نظر تعیین می‌شود. این در حالی است که روند تعیین کرنش‌های اصلی برای کرنش اصلی بیشینه و کمینه با یکدیگر متفاوت است. با توجه به اینکه کرنش اصلی بیشینه در راستای عمود بر مرزهای صلب (راستای اعمال تنش انحرافی) رخ می‌دهد و جابه‌جایی ذرات زیر مرز صلب یکسان و برابر جابه‌جایی صفحات فرض می‌شود، کرنش اصلی بیشینه را می‌توان به سادگی از تقسیم تغییر طول نمونه به طول اولیه آن، که براساس سرعت صفحات قابل محاسبه است، به دست آورد. از طرفی در مرزهای انعطاف پذیر (که راستای عمود بر آن منطبق بر راستای کرنش اصلی کمینه است)، تمامی ذرات در یک موقعیت مکانی قرار ندارند؛ لذا لازم است که ابتدا یک موقعیت مکانی متوسط برای ذرات روی هر یک از مرزهای جانبی تعیین و سپس براساس نسبت تغییر طول به طول اولیه، کرنش اصلی کمینه تعیین شود. با توجه به مقادیر به دست آمده برای تنش‌ها و کرنش‌های اصلی، مقادیر تنش انحرافی و کرنش حجمی با استفاده از روابط ۱۴ تعیین می‌شوند:

$$q = \sigma_1 - \sigma_2, \quad \varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (14)$$

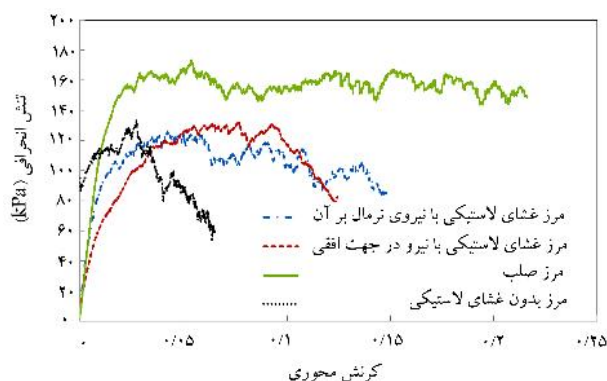
که در آن‌ها، q و ε_v به ترتیب تنش انحرافی و کرنش حجمی هستند. همچنین ε_1 و ε_2 به ترتیب کرنش اصلی بیشینه و کمینه، و σ_1 و σ_2 به ترتیب تنش اصلی بیشینه و کمینه هستند.

جهت بررسی رفتار تنش - کرنشی نمونه‌ها با شرایط مرزی مختلف، نمودار تغییرات تنش انحرافی در مقابل کرنش محوری هر نمونه در شکل ۹ و نمودار تغییرات کرنش حجمی در مقابل کرنش محوری هر نمونه نیز در شکل ۱۰ نشان داده شده

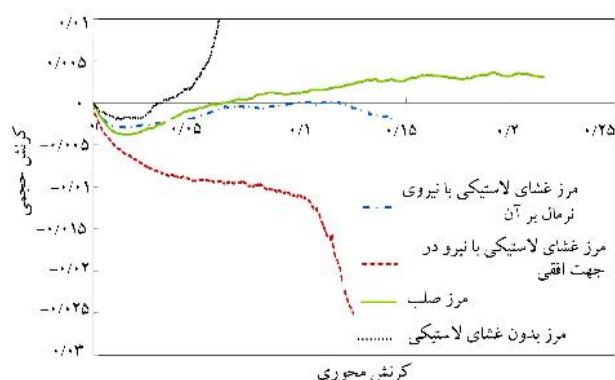
این روند در کرنش محوری حدود ۸٪ متوقف و نمونه مجدداً دچار انقباض می‌شود. از طرفی، نمونه‌یی که در آن نیروی محصورکننده همواره در راستای افق وارد می‌شود، رفتار به صورت پیوسته انقباضی است، تا اینکه در کرنش محوری حدود ۱۲٪ نمونه به صورت کلی دچار از هم پاشیدگی می‌شود و نمونه رفتاری ناپایدار را از خود نشان می‌دهد. نمونه با مرز انعطاف‌پذیر بدون غشاء لاستیکی نیز در کرنشی حدود ۳٪ دچار از هم پاشیدگی می‌شود و رفتاری کاملاً ناپایدار از خود نشان می‌دهد.

جهت بررسی صحت نتایج به دست آمده از تحلیل‌های عددی و نیز تعیین شرایط مرزی قابل قبول در شبیه‌سازی آزمایش دومحوره لازم است که نتایج تحلیل‌های عددی با آزمایش‌های واقعی مقایسه شوند. نتایج آزمایش‌ها در زمینه‌ی شکل‌گیری و گسترش نوار برشی وابستگی زیادی به نوع آزمایش و مسیر تنش دارند؛ به عنوان نمونه براساس مشاهدات صورت‌گرفته،^[۱۷] شکل‌گیری نوار برشی در آزمایش سه‌محوره همواره پس از نقطه‌ی اوج مقاومت در منحنی تنش - کرنش رخ می‌دهد و وضوح چندانی ندارد. از طرفی در آزمایش دومحوره، نوار برشی همواره قبل از نقطه‌ی اوج مقاومت در منحنی تنش - کرنش شکل می‌گیرد و کاملاً آشکار است.^[۱۸، ۱۹] حال با توجه به اینکه شبیه‌سازی‌های عددی صورت‌گرفته برای آزمایش دومحوره بوده، لازم است که نتایج به دست آمده با نتایج آزمایش دومحوره مقایسه شوند. این در حالی است که شبیه‌سازی‌های عددی برای مصالح ایده‌آل شده یعنی ذرات دیسک مانند انجام شده است، در حالی که آزمایش‌های دومحوره واقعی که بر روی ماسه انجام می‌شود، شامل ذراتی است که شکل‌ها و گوشه‌داری‌های مختلف دارند و این امر کاملاً در نتایج آزمایش و رفتار نمونه‌ها در مقیاس ماکرو تأثیرگذار است. از این رو بهترین ترفند برای صحت‌سنجی نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌های عددی آن است که آنها با نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی مصالح دیسکی شکل مقایسه شوند. در این‌گونه آزمایش‌ها که به مدل‌های اشنیپلی،^[۲۰] معروف هستند، محیط

دانه‌یی توسط دیسک‌هایی از پلاستیک فشرده و یا فلزات شبیه‌سازی می‌شود و بارگذاری به صورت دومحوره صورت می‌گیرد. در بسیاری از این مدل‌ها، مرزهای جانبی انعطاف‌پذیر هستند و مرزهای بالا و پایین نمونه به صورت صفحات صلب هستند و این شرایط کاملاً شبیه‌سازی‌های عددی هماهنگی دارد. با توجه به اینکه شبیه‌سازی دقیق آزمایش نیازمند کالیبره کردن میکرو پارامترهاست، در این قسمت فقط روند تغییرات تنش - کرنش و نیز تغییرات حجم برای شبیه‌سازی‌های عددی و آزمایشگاهی مقایسه می‌شوند. پژوهشی که در این نوشتار به عنوان مبنای مقایسه قرار گرفته است، آزمایش انجام شده توسط اسلیوان و همکاران است،^[۲۱] که در آن رفتار محیط میله‌یی تحت آزمایش دومحوره مورد بررسی قرار گرفته است. براساس مشاهدات صورت‌گرفته رفتار تنش - کرنشی نمونه‌ها با رسیدن نمونه‌ها به نقطه‌ی اوج مقاومت با سختی اولیه‌ی زیاد و سپس کاهش مقاومت با تشکیل نوار برشی و رسیدن مقاومت نمونه‌ها به مقدار صفر همراه است (شکل ۱۱) و این لحظه‌یی است که تماس ذرات با صفحات بارگذاری قطع شده است. حال اگر بارگذاری ادامه یابد، مجدداً تماس برقرار می‌شود و به صورت یک رفتار سیکلی، شرایط قبل ادامه می‌یابد. این تذکر لازم است که نمونه‌ی مورد استفاده در آزمایش مطرح شده بسیار متراکم و اندازه‌ی ذرات یکنواخت با مقطع ۶ ضلعی بوده است. با وجود تفاوت‌های بیان شده می‌توان روند کلی رفتار تنش - کرنش را به صورت رسیدن به نقطه‌ی اوج مقاومت و سپس کاهش مقاومت تعبیر کرد. همچنین از جنبه‌ی تغییر حجمی نیز می‌توان اندکی فشرده‌گی اولیه و سپس اتساع نمونه را انتظار داشت که این اتساع می‌تواند مجدداً به رفتار انقباضی تبدیل شود. از مقایسه‌ی نتایج به دست آمده برای شبیه‌سازی‌های صورت‌گرفته می‌توان مشاهده کرد که مرزهای رشته‌یی با نیروهای نرمال و افقی بر مرز از لحاظ رفتار مقاومتی، رفتاری مشابه نمونه‌ی آزمایشگاهی نشان می‌دهند و



شکل ۹. نمودار تنش برشی در مقابل کرنش محوری.



شکل ۱۰. نمودار کرنش حجمی در مقابل کرنش محوری.

است. شایان ذکر است که تنش همه‌جانبه در تمامی آزمایش‌ها ۲۰۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است و نمونه‌های ساخته شده درصد تخلخل برابر دارند. با توجه به شکل ۹، نمونه‌یی که با شرایط مرزی صلب تحت آزمایش دومحوره قرار گرفته است، مقاومت برشی بالاتری را در مقایسه با نمونه‌های با مرز انعطاف‌پذیر نشان می‌دهد. همچنین در نمونه‌های با مرز صلب، آفت محسوس در مقاومت برشی اوج مشاهده نمی‌شود و رفتار تنش کرنشی نمونه، پایداری کامل دارد. از طرفی، نمونه‌هایی که مرز انعطاف‌پذیر رشته‌یی دارند، مقاومت پایین‌تری از خود نشان می‌دهند. این در حالی است که نمونه با مرز رشته‌یی و نیروی نرمال بر مرز در کرنش محوری در حدود ۳٪ به اوج مقاومت می‌رسد و پس از آن با روندی نسبتاً ملایم دچار نرم‌شوندگی می‌شود، اما نمونه‌یی که در آن فشار محصورکننده به صورت نیروی افقی وارد می‌شود، در کرنش محوری در حدود ۷٪ به اوج مقاومت می‌رسد و بلافاصله پس از آن به سرعت دچار نرم‌شوندگی می‌شود و مقاومت از دست می‌دهد. شایان ذکر است که مقدار اوج مقاومت برای هر دو نمونه تقریباً یکسان است. نمونه با مرز انعطاف‌پذیر بدون غشاء لاستیکی، رفتاری کاملاً نرم‌شونده و ناپایدار را نشان می‌دهد؛ به طوری که نمونه در سطح کرنشی در حدود ۶٪ دچار گسیختگی می‌شود. مشاهده‌ی رفتار تغییر حجمی نمونه‌ها در شکل ۱۰، نیز نشان‌گر نوعی رفتار انقباضی - اتساعی برای نمونه با مرز صلب است که با توجه به رفتار تنش - کرنشی این نمونه (شکل ۹) می‌توان رفتار آن را مشابه رفتار آزمایشگاهی یک نمونه خاک دانه‌یی با تراکم نسبی متوسط در نظر گرفت. برای نمونه با مرز انعطاف‌پذیر رشته‌یی، جهت اعمال نیروی محصورکننده به مرز در رفتار تغییر حجمی نمونه بسیار تأثیرگذار است، به نحوی که در نمونه‌یی که نیرو به صورت نرمال بر مرز وارد می‌شود، در ابتدا رفتاری مشابه نمونه با مرز صلب نشان می‌دهد و پس از انقباض، در کرنش محوری حدود ۲٪ شروع به اتساع می‌کند، اما

تنش وارده به هر ذره براساس رابطه‌ی ۱۵ تعیین می‌شود:

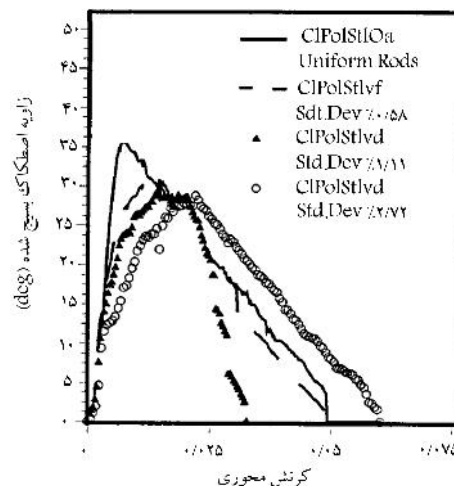
$$\sigma_{ij} = \sum_C r_i^C f_j^C \quad (15)$$

که در آن، مؤلفه‌ی نیروی تماس C در راستای x_i و مؤلفه‌ی بردار نرمال واحد از مرکز ذره به نقطه‌ی تماس C در راستای x_j است. بزرگ‌ترین مقدار ویژه‌ی این تانسور، تنش بیشینه یا به عبارتی اندازه‌ی زنجیره‌ی نیرویی و بردار ویژه‌ی آن که بردار بار ذرات نامیده می‌شود، بیان‌گر راستای تنش بیشینه یا راستای زنجیره‌ی نیرویی است. بر این اساس، در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ برای نمونه‌ها با شرایط مرزی مختلف، شکل تغییر فرم یافته و زنجیره‌های نیرویی در داخل نمونه نشان داده شده است. جهت بررسی نحوه‌ی تغییر شکل نمونه‌ها، یک شبکه‌ی مربعی بر روی نمونه‌ی اولیه در نظر گرفته شده و با توجه به کرنش محوری که در نمونه به وجود می‌آید، تغییر شکل این شبکه‌بندی مورد مطالعه قرار گرفته است.

با توجه به شکل ۱۲ الف، برای نمونه با مرزهای صلب، به دلیل محدودیت‌های حرکتی که مرزها به نمونه اعمال کرده‌اند، المان‌های داخلی تغییر شکل برشی ناچیزی پیدا کرده و المان‌های مستطیلی حتی در کرنش‌هایی در حدود ۱۳٪ کماکان شکل خود را حفظ کرده‌اند. همچنین روند تشکیل زنجیره‌های نیرویی نیز در داخل المان، یکنواختی خاصی دارد و این زنجیره‌ها به شکلی تقریباً همگن در کل نمونه توزیع شده‌اند و حتی در کرنش‌هایی در حدود ۱۳٪ اثری از کمانش و شکست این زنجیره‌های نیرویی مشاهده نمی‌شود.

در شکل‌های ۱۲ ب و ۱۲ ج و همچنین ۱۳ ا و ۱۳ ج، نحوه‌ی تغییر فرم و تشکیل زنجیره‌های نیرویی برای نمونه‌های با مرز انعطاف‌پذیر رشته‌ی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای نمونه‌هایی که نیروی محصورکننده به صورت نرمال بر مرز وارد شده است، تغییر فرم‌های برشی در المان‌های کناری محسوس است، اما این تغییر فرم‌ها با ارجحیت جهت خاصی همراه نیست و نمونه‌ی مستطیلی، شکلی خمه‌ی‌مانند به خود گرفته است. در نمونه‌هایی که راستای نیروی محصورکننده، همواره افقی است، کرنش‌های برشی داخل نمونه چندان قابل توجه نیست و عمده‌ی تغییر شکل‌ها به صورت تغییر شکل‌های کششی در المان‌های مرزی هستند. همچنین نحوه‌ی توزیع زنجیره‌های نیرویی در ۲ نمونه در کرنش‌های محوری بالا نسبت به هم متفاوت است. در نمونه‌ی که نیروی محصورکننده، به صورت نرمال بر مرز است، توزیع زنجیره‌های نیرویی تقریباً یکنواخت است، که با افزایش کرنش محوری در قسمت‌های مرکزی نمونه، زنجیره‌های قائم شروع به کمانش کرده‌اند و نمونه در همین راستا دچار زوال شده‌اند و این در شرایطی است که توزیع زنجیره‌های نیرویی در کرنش‌های بالا نیز همچنان یکنواختی خود را حفظ کرده‌اند. از طرفی توزیع زنجیره‌های نیرویی در نمونه‌ی که نیروی محصورکننده همواره در جهت افقی است، در ابتدا حالتی یکنواخت دارد؛ اما به تدریج با افزایش کرنش محوری یکنواختی از بین رفته و به صورت پراکنده در آمده است.

شرایط مرزی بدون در نظر گرفتن رشته‌ی خارجی منجر به شکل تغییر فرم و زنجیره‌های نیرویی می‌شود که در شکل‌های ۱۲ د و ۱۳ د نشان داده شده است. با توجه به شکل‌های مذکور، با افزایش کرنش محوری، تغییر فرم‌های برشی شدید و متماثل به یک طرف در کل نمونه ایجاد شده است، که منجر به گسیختگی نمونه در کرنش محوری در حدود ۶/۵٪ شده است. نحوه‌ی توزیع زنجیره‌ی نیرویی نیز شکست زنجیره‌های نیرویی و عدم همگنی آن را با افزایش کرنش محوری نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، همان‌طور که در بررسی‌های ماکرو نشان داده شده است، تعریف این نوع شرایط مرزی عملاً منجر به ناپایداری نمونه می‌شود و نمی‌تواند شرایط آزمایشگاهی را شبیه‌سازی کند.



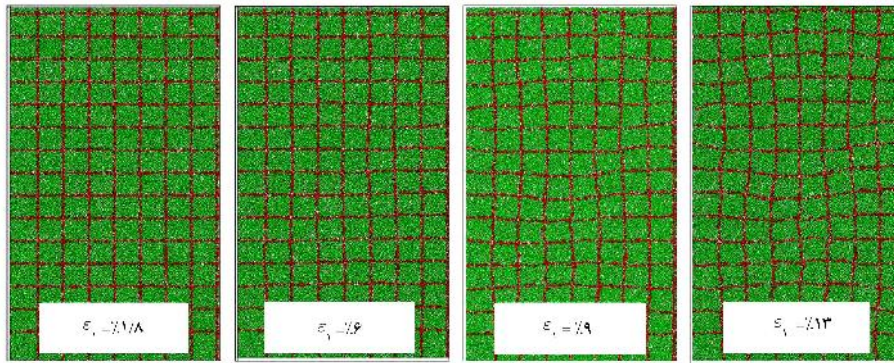
شکل ۱۱. زاویه‌ی اصطکاک بسنج شده در مقابل کرنش محوری. [۲۱]

هر دو افت مقاومت را پس از نقطه‌ی اوج نشان می‌دهند، که این امر در مرز با نیروی افقی مشهودتر است. اما به لحاظ رفتار تغییر حجمی مرز رشته‌ی با نیروی افقی همواره رفتاری انقباضی را نشان می‌دهد که سازگاری چندانی به نتایج آزمایش‌ها ندارد و مرز رشته‌ی با نیروی نرمال بر مرز به لحاظ رفتار تغییر حجمی، مطابقت بیشتری با نتایج آزمایش‌ها دارد. جهت بررسی اثر شرایط مرزی مختلف در رفتار دانه‌های داخل نمونه‌ها، در بخش بعدی به مقایسه‌ی رفتار نمونه‌ها در مقیاس میکرو پرداخته شده است.

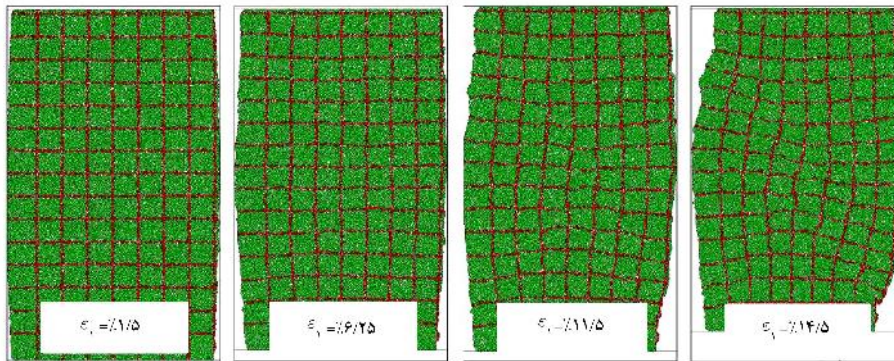
۲.۴. رفتار نمونه‌ها در مقیاس میکرو

آنچه که باعث تفاوت رفتار نمونه‌های با شرایط مرزی متفاوت نسبت به یکدیگر می‌شود، عملکرد متفاوت این نمونه‌ها در مقیاس میکرو است. به طور کلی، زمانی که نمونه‌ی خاک دانه‌ی تحت شرایط بارگذاری قرار می‌گیرد، به دلیل تغییر مکان ذرات محیط، نوعی ناهمگنی در ساختار نمونه به وجود می‌آید، که این ناهمگنی در ساختار، منجر به ناهمگنی در توزیع تنش و در نتیجه تجمع موضعی کرنش و تشکیل نوار برشی می‌شود. از طرفی استفاده از مرزهای صلب باعث می‌شود که این مرزها، قیودی اضافی به دانه‌های محیط اعمال کنند و از گسترش ناهمگنی در محیط جلوگیری کنند؛ لذا استفاده از این مرزها باعث عدم شکل‌گیری مناطقی با تجمع کرنش و در نتیجه عدم تشکیل نوار برشی می‌شود. در این راستا، برای بررسی دقیق‌تر موضوع، نخست نحوه‌ی تشکیل زنجیره‌های نیرویی در نمونه‌ها بررسی و سپس به چگونگی شکل‌گیری نوار برشی پرداخته شده است.

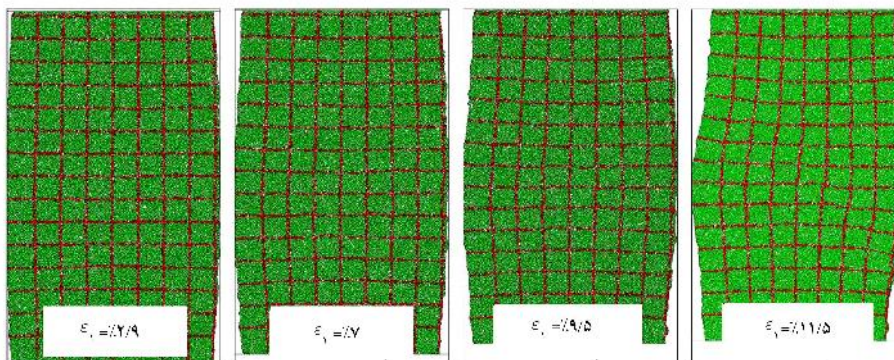
زمانی که یک نمونه از خاک دانه‌ی تحت آزمایش دو محوره و سه محوره قرار می‌گیرد، ذرات در راستای تنش اصلی بیشینه جهت‌گیری می‌کنند. این نحوه‌ی قرارگیری ذرات منجر به تشکیل مسیرهای انتقال نیرو در داخل نمونه می‌شود، که به آنها زنجیره‌های نیرویی گفته می‌شود. زمانی که میزان برش در نمونه افزایش می‌یابد، به تدریج زنجیره‌های نیرویی دچار کمانش و در نهایت شکست می‌شوند که این امر منجر به تشکیل نوار برشی در محل کمانش این زنجیره‌های نیرویی و در نهایت زوال نمونه می‌شود. در مقیاس ماکرو، کمانش و شکست زنجیره‌های نیرویی باعث افت نسبت تنش می‌شود. برای تشخیص زنجیره‌های نیرویی الگوریتم‌های مختلفی ارائه شده است. [۲۳، ۲۴] در این مطالعه روش ارائه‌شده‌ی پیترو همکاران، [۲۳] برای تشخیص زنجیره‌های نیرویی مورد استفاده قرار گرفته است. براساس روش ذکر شده، تانسور



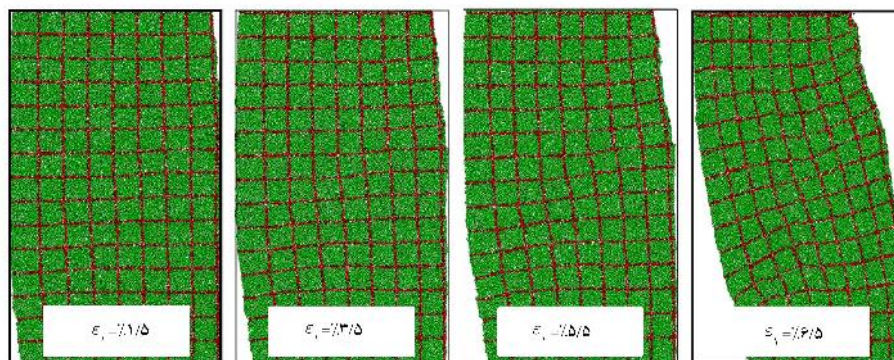
الف) مرز صلب؛



ب) مرز انعطاف پذیر با غشاء لاستیکی و اعمال نیروی نرمال بر مرز؛

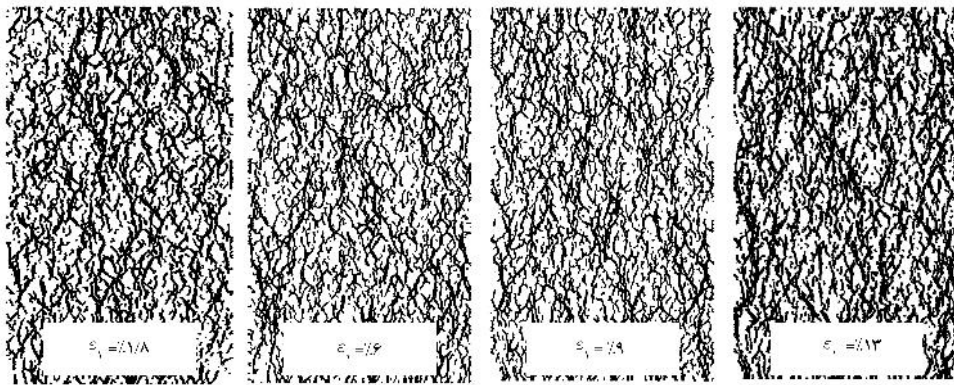


ج) مرز انعطاف پذیر با غشاء لاستیکی و اعمال نیروی جانبی به صورت افقی؛

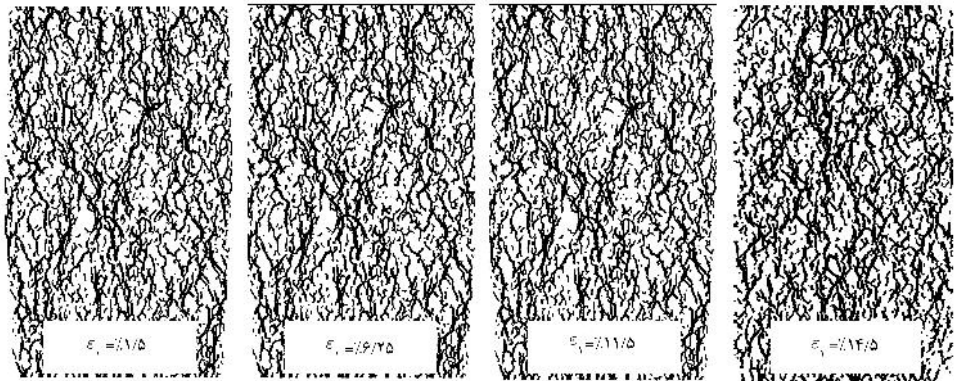


د) مرز انعطاف پذیر بدون غشاء لاستیکی.

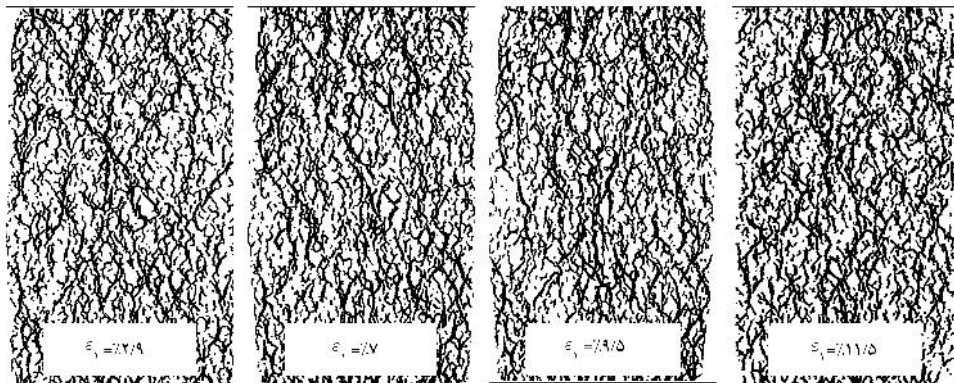
شکل ۱۲. شکل نمونه‌ها در درصد‌های کرنش مختلف.



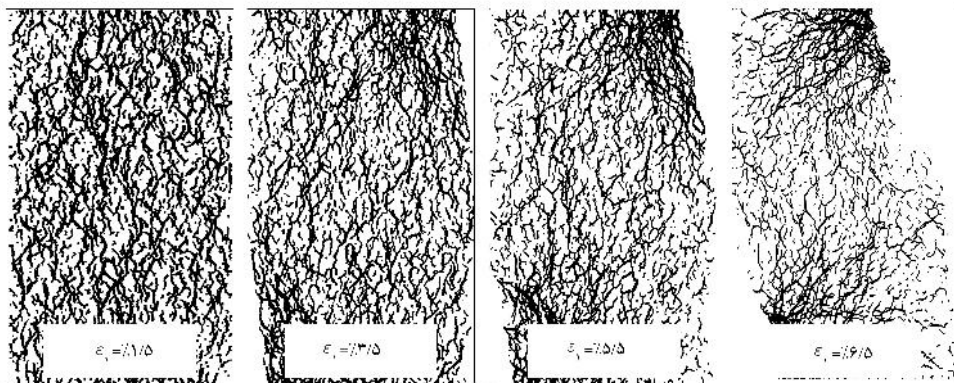
الف) مرز صلب؛



ب) مرز انعطاف پذیر با غشاء لاستیکی و اعمال نیروی نرمال بر مرز؛

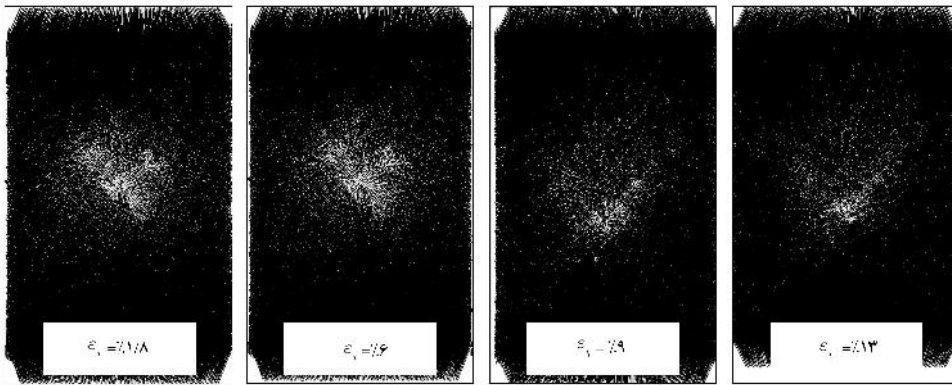


ج) مرز انعطاف پذیر با غشاء لاستیکی و اعمال نیروی جانبی به صورت افقی؛

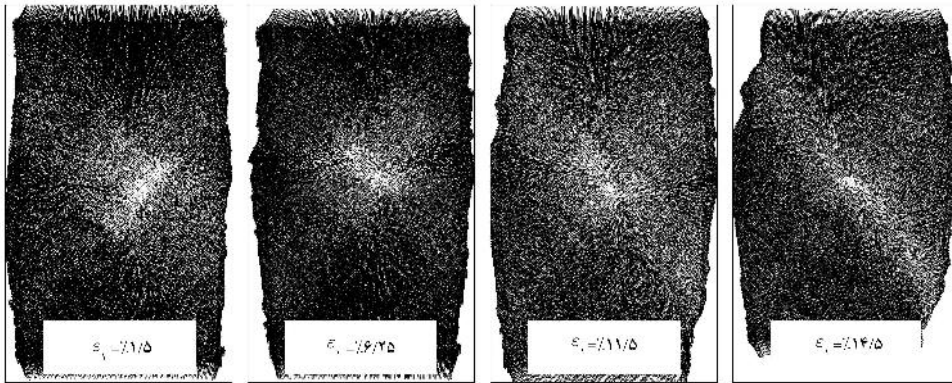


د) مرز انعطاف پذیر بدون غشاء لاستیکی.

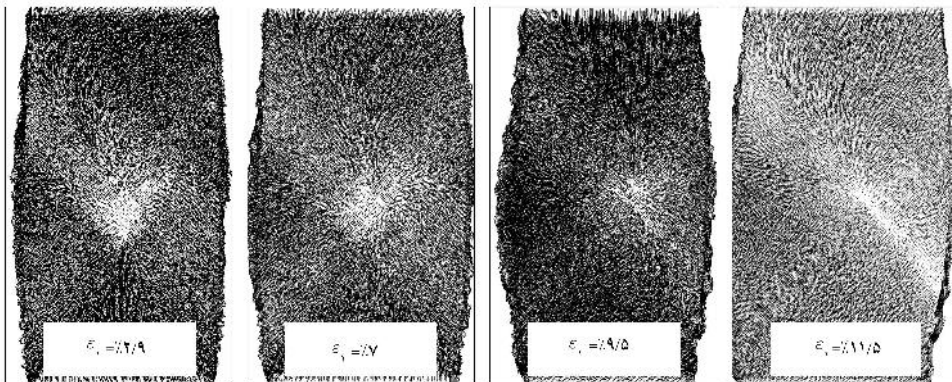
شکل ۱۳. زنجیره‌های قوی نیرویی در درصد‌های کرنش مختلف.



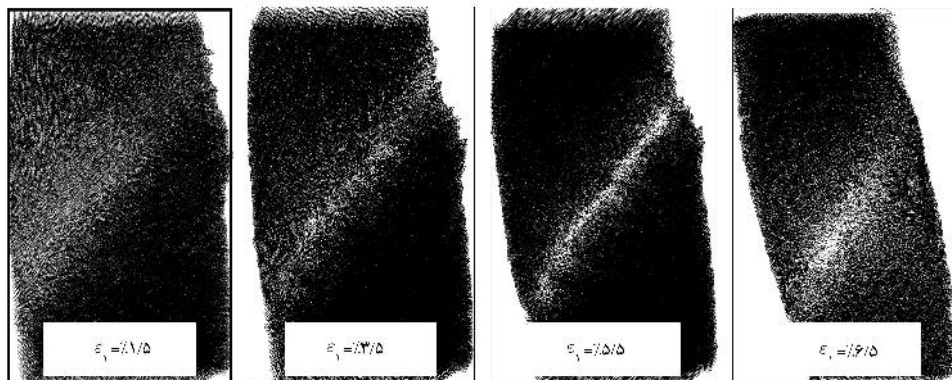
الف) مرز صلب؛



ب) مرز انعطاف پذیر با غشاه لاستیکی و اعمال نیروی نرمال بر مرز؛



ج) مرز انعطاف پذیر با غشاه لاستیکی و اعمال نیروی جانبی به صورت افقی؛



د) مرز انعطاف پذیر بدون غشاه لاستیکی.

شکل ۱۴. بردار جابه‌جایی ذرات در درصدهای کرنش مختلف.

مقاومت کششی در یک رشته‌ی خارجی تعریف شود. تعریف مرز انعطاف‌پذیر بدون در نظر گرفتن رشته‌ی خارجی باعث می‌شود که نمونه‌ی تحت آزمایش، رفتاری ناپایدار را از خود نشان دهد و در سطح کرنش‌های کم، دچار از هم‌پاشیدگی شود. ج) در شبیه‌سازی مرز انعطاف‌پذیر توسط رشته‌ی خارجی، نحوه‌ی اعمال نیرو به دانه‌های مرزی تأثیر بسیار زیادی در رفتار نمونه‌ی تحت آزمایش دارد. به نحوی که اگر راستای نیروی محصورکننده‌ی جانبی همواره به صورت افقی (یعنی عمود بر راستای تغییر فرم‌نده‌ی مرز انعطاف‌پذیر) باشد، نمونه پس از تحمل مقدار مشخصی از کرنش، دچار از هم‌پاشیدگی می‌شود.

د) با استفاده از مرزهای انعطاف‌پذیر می‌توان از طریق مطالعه بر روی بردارهای جابه‌جایی دانه‌ها به بررسی روند تشکیل نوار برشی در نمونه‌ها پرداخت. شایان ذکر است که به دلیل ناهمگنی القایی در نمونه در اثر اعمال برش، ایجاد تجمع کرنش و یا به عبارت دیگر، نوار برشی در نمونه اجتناب‌ناپذیر است.

هـ) مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمون آزمایشگاهی نشان می‌دهد که تعریف مرز رشته‌ی انعطاف‌پذیر به همراه نیروی نرمال بر مرز، از لحاظ رفتار ماکرو نمونه نسبت به سایر شرایط مرزی مطابقت بیشتری با نتایج آزمایشگاهی دارد.

و) با مطالعه‌ی زنجیره‌های نیرویی در داخل نمونه مشخص شده است که در هنگام از هم‌پاشیدگی نمونه، زنجیره‌های نیرویی به صورت تو خالی و پراکنده در می‌آیند و در صورتی که این زنجیره‌ها یکنواختی توزیع خود را حفظ کنند، نمونه همچنان قدرت باربری دارد.

ز) برای مطالعه‌ی نوار برشی در آزمایش‌های دومحوره‌ی شبیه‌سازی شده باید از مرز انعطاف‌پذیری استفاده کرد، تا در اثر اعمال برش، زنجیره‌های نیرویی توزیع یکنواخت خود را حفظ کنند و در این نوشتار مرز رشته‌ی با نیروی نرمال بر مرز این قابلیت را از خود نشان داده است.

برای بررسی نحوه‌ی تشکیل نوار برشی در نمونه‌ها با شرایط مرزی مختلف، بردارهای جابه‌جایی ذرات برای کرنش‌های محوری مختلف در نمونه ترسیم شده است. با توجه به ماهیت نوار برشی، بردار سرعت ذراتی که در این ناحیه قرار می‌گیرند، صفر است. به عبارت دیگر، دو ناحیه‌ی بالا و پایین نوار برشی نسبت به یکدیگر در حرکت هستند و نقاط واقع بر نوار برشی حالتی ایستا دارند. بر این اساس با توجه به شکل ۱۴ الف، مرزهای صلب اجازه‌ی تشکیل هیچ‌گونه نوار برشی در نمونه را نمی‌دهند و با افزایش کرنش محوری، این ناحیه (ناحیه‌ی سرعت صفر) به صورت کلی محو می‌شود. این در حالی است که مطابق شکل‌های ۱۴ تا ۱۴ د، تعریف مرزهای انعطاف‌پذیر باعث می‌شود که فرصت تشکیل نوار برشی پدید آید، هر چند که تشکیل نوار برشی در مرز بدون غشا در واقع ناشی از ناپایداری کلی نمونه است.

۵. نتیجه‌گیری

در این نوشتار، با استفاده از روش اجزاء منفصل، آزمایش دومحوره بر روی خاک دانه‌ی برای شرایط مرزی مختلف شبیه‌سازی شده است. با توجه به تحلیل‌ها و مقایسه‌های صورت‌گرفته، می‌توان این موارد را به عنوان نتایج این پژوهش بیان کرد:

الف) استفاده از مرز صلب در شبیه‌سازی مرزهای جانبی در آزمایش دومحوره به علت تحمل قیود حرکتی به دانه‌های مرزی، همگنی میدان جابه‌جایی در نمونه‌ی خاک را حفظ می‌کند و لذا قابلیت دست‌یابی به شرایط بحرانی را برای نمونه‌ی خاک فراهم می‌آورد. از طرفی، قیود حرکتی باعث می‌شوند که احتمال تشکیل نوار برشی در نمونه از بین برود و نتوان از این نوع مرز برای مطالعه بر روی نوار برشی استفاده کرد.

ب) شبیه‌سازی مرزهای جانبی به صورت انعطاف‌پذیر باید با قیود خارجی از قبیل

منابع (References)

- Cundall, P.A. "A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems", *Proceedings of the International Symposium on Rock Fracture, Nancy*, **1**(II-8), pp. 129-136 (1971).
- Cundall, P.A. and Strack, O.D.L. "A discrete numerical model for granular assemblies", *Geotechnique*, **29**(1), pp. 47-65 (1979).
- Zamani, N. and Shamy, U.E. "Analysis of the seismic response of soil-foundation-structure systems using a microscale framework", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **43**, pp. 398-412 (2012).
- Chen, C., McDowell, G.R. and Thom, N.H. "Discrete element modelling of cyclic loads of geogrid-reinforced ballast under confined and unconfined conditions", *Geotextiles and Geomembranes*, **35**, pp. 76-86 (2012).
- Lobo-Guerrero, S. and Vallejo, L.E. "Influence of pile shape and pile interaction on the crushable behavior of granular materials around driven piles: DEM analyses", *Granular Matter*, **9**(3), pp. 241-250 (2007).
- Van Lysebetten, G., Vervoort, A., Maertens, J. and Huybrechts, N. "Discrete element modeling for the study of the effect of soft inclusions on the behavior of soil mix material", *Computers and Geotechnics*, **55**, pp. 342-351 (2014).
- Bardet, J.P. and Proubet, J. "A numerical investigation of the structure of persistent shear bands in granular media", *Geotechnique*, **41**(4), pp. 599-613 (1991).
- Mahmood, Z. and Iwashita, K. "A simulation study of microstructure evolution inside the shear band in biaxial compression test", *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, **35**(18), pp. 652-667 (2011).
- Fu, P. and Dafalias, F.Y. "Fabric evolution within shear bands of granular materials and its relation to critical state theory", *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, **35**(18), pp. 1098-1126 (2011).
- Hu, M., Catherine, O'S., Richard, R.J. and Jiang, M. "Stress-induced anisotropy in sand under cyclic loading", *Granular Matter*, **12**(5), pp. 469-476 (2010).

11. Cundall, P.A. "Numerical experiments on localization in frictional materials", *Ingenieur-Archiv*, **59**(2), pp. 148-159 (1989).
12. Bardet, J.P. and Proubet, J. "A numerical investigation of the structure of persistent shear bands in granular media", *Géotechnique*, **41**(4), pp. 599-613 (1991).
13. Kuhn, M.R. "A flexible boundary for three-dimensional dem particle assemblies", *Eng. Comput.*, **12**(2), pp. 175-183 (1995).
14. Itasca Consulting Group Inc., *Particle Flow Code in 2D Dimensions*, Version 4.0., Minnesota (2008).
15. Wang, Y.H. and Leung, S.C. "A particulate-scale investigation of cemented sand behavior", *Can. Geotech. J.*, **45**(1), pp. 29-43 (2008).
16. Jiang, M.J., Konrad, J.M. and Leroueil, S. "An efficient technique for generating homogeneous specimens for DEM studies", *Computers and Geotechnics*, **30**(7), pp. 579-597 (2003).
17. Desrues, J. and Chambon, R. "Shear band analysis and shear moduli calibration", *Int. J. Solids Struct.*, **39**(13-14), pp. 3757-3776 (2002).
18. Lade, P.V. "Instability, shear banding, and failure in granular materials", *International Journal of Solids and Structures*, **39**(13-14), pp. 3337-3357 (2002).
19. Vardoulakis, I. "Shear band inclination and shear modulus of sand in biaxial tests", *Int. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **4**(2), pp. 103-119 (1980).
20. Misra, A. and Jiang, H. "Measured kinematic fields in the biaxial shear of granular materials", *Comput. Geotech.*, **20**(3-4), pp. 267-285 (1997).
21. O'Sullivan, C., Bray, J. and Riemer, M. "Influence of particle shape and surface friction variability on response of rod-shaped particulate media", *J. Eng. Mech.*, **128**(11), pp. 1182-1192 (2002).
22. Tordesillas, A. "Force chain buckling, unjamming transitions and shear banding in dense granular assemblies", *Philos. Mag.*, **87**(32), pp. 4987-5016 (2007).
23. Peters, J.F., Muthuswamy, M., Wibowo, J. and Tordesillas, A. "Characterization of force chains in granular material", *Phys. Rev. E Stat. Nonlin Soft Matter Phys.*, **72**(4), pp. 1-8 (2005).