رفتار مصالح دانه‌ای درهنگام بارگذاری و مقایسه نتایج شبیه سازی عددی و تجربی آنها*

غلامعلی شفابخش، استادیار، دانشکده فنی- مهندسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
عبدالحسین حداد، استادیار، دانشکده فنی – مهندسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
E-mail:ghshafabakhsh@semnan.ac.ir

چکیده

محیط‌های دانه‌ای، محیط‌های غیر پیوسته‌ای هستند که ساختمان آنها را دانه‌های در تماس با یکدیگر با اشکال و ابعاد مختلف تشکیل می‌دهد، مانند مصالح به کار رفته در لایه‌های زیرسازی و روسازی غیر تثبیت شده راه‌ها. مطالعه در خصوص رفتار مصالح دانه‌ای در هنگام بارگذاری نیازمند بررسی و تحلیل متغیرها در دو مقیاس میکروسکپی (local) و ماکروسکپی (global)می‌باشد. رفتار مصالح دانه‌ای از یک طرف متاثر از ساختار هندسی آن و از طرف دیگر ناشی از متغیر های میکرو مکانیک، مانند نیروهای تماس بین دانه‌ای می‌باشد. شبیه سازی عددی یکی از روش‌هایی است که امروزه برای مطالعه رفتار محیط‌های دانه‌ای بسیار متداول است. در این مقاله با شبیه سازی عددی آزمایش فشار دو محوری، علاوه بر این که تغییرات هندسی و مکانیکی محیط در طول بارگذاری نشان داده می‌شود، مقایسه‌ای نیز بین نتایج حاصل از شبیه سازی عددی و تجربی صورت می‌گیرد.

واژه های کلیدی: مصالح دانه‌ای، شبیه سازی عددی، رفتار مکانیکی، مقیاس میکروسکپی وماکروسکپی

1. مقدمه

مطالعه رفتار مکانیکی و تغییرات هندسی محیط‌های دانه‌ای از جمله مصالح به کار رفته در لایه‌های زیرسازی و روسازی غیر تثبیت شده راه‌ها (متشکل از دانه‌هایی با اشکال و ساختار هندسی غیرمنظم)، رفتاری پیچیده و وابسته به متغیرهای بسیاری است. بررسی رفتار سنجی این محیط‌ها موضوع تحقیق بسیاری از پژوهشگران است. این مطالعات بر اساس سه روش تئوری، تحلیلی - تجربی و از طریق شبیه سازی عددی انجام می شوند. برای اجتناب از فرضیات ساده‌ای که در روش‌های تئوری به کار گرفته می‌شوند و همچنین محدودیت‌هایی که در روش‌های تجربی وجود دارند، روش‌های عددی توسعه بسیاریافته‌اند. روش المان‌های مجزا (کد PFC2D) یک ابزار مفید جهت مطالعه برروی محیط‌های دانه‌ای است [1و2و3و4]. یکی از اهداف مهم مطالعات عددی به منظور درک بهتر بعضی از پدیده‌های رفتاری مصالح دانه‌ای در طول بارگذاری است. در این تحقیق سعی می‌گردد متغیرهای مختلفی که رفتار محلی وکلی محیط را توصیف می‌کنند مورد بحث قرارگیرند و با شبیه سازی عددی آزمایش فشار دو محوری علاوه بر مقایسه نتایج این شبیه سازی عددی با نتایج تجربی، تغییرات متغیرهای محیط در طول بارگذاری مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد.

2. توصیف هندسی و مکانیکی

متغیرهای محیط‌های دانه‌ای را میتوان به دو گروه هندسی و مکانیکی تقسیم نمود که متغیرهای مکانیکی خود شامل متغیرهای

*تاریخ دریافت: 84/1/18 - تاریخ پذیرش: 84/5/23

استاتیکی و سینماتیکی می‌باشند. در ادامه، متغیرهای هندسی و مکانیکی محیط معرفی می‌شوند.

2-1 توصیف هندسی

برای تحلیل ساختار هندسی محیط‌های دانه‌ای، انجام مطالعات هندسی در دو مقیاس میکروسکپی وماکروسکپی الزامی است، زیرا خصوصیات ماکروسکپی محیط قویا مرتبط با خصوصیات میکروسکپی آن است.

2-1-1 مقیاس میکروسکپی

ساختار هندسی محیط‌های دانه‌ای در مقیاس میکروسکپی از دو دیدگاه دانه و ساختار محیطی می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. ابعاد و شکل دانه‌ها از عوامل موثر در رفتار مصالح دانه‌ای در هنگام بارگذاری محسوب می‌شوند.مصالحی که ابعاد و شکل دانه‌های آن متمایل به مکعب باشند مقاومت بهتری در مقابل نیروهای فشاری دارند و دانه‌های شکسته بهتر در هم قفل و بست می‌شوند.

در مقیاس میکروسکپی، هندسه ساختمان یک محیط دانه‌ای به وسیله تماس دانه‌ها و جهات تماس آن ها تعیین می‌شود. طرز قرار گرفتن دانه‌ها و جهات تماس آنها هنگام بارگذاری مهم‌ترین عامل تعیین کننده ساختار هندسی محیط در مقیاس میکروسکپی است. تعیین جهت تماس بین دو دانه به وسیله جهت بردار عمود بر صفحه تماس بین دو دانه مشخص می‌شود.

در یک مجموعه از مصالح دانه‌ای، توزیع جهات تماس بین دانه‌ها را می توان توسط احتمال وجود تماس در جهات مختلف تعیین نمود. با تعیین نمایش احتمال جهت تماس بین دانه‌ای در زوایای مختلف می‌توان وضعیت غیر ایزوتروپی محیط را توصیف کرد.

از نتایج حاصل از شبیه سازی عددی توسط Rothenburg و همکارانش، رابطه‌ای پیشنهاد شده که می‌توان از طریق آن توزیع زوایای جهات تماس بین دانه‌ای را توصیف نمود[5].

$$E(\theta) = 0.5(1+a\cos 2(\theta-\theta 0)) \qquad (1)$$

که در رابطه فوق $E(\theta)$، احتمال وجود یک تماس در جهت θ، a اختلاف اندازه (طول) بین محورهای اصلی و $\theta 0$ جهت محور حداکثرتماس را نشان می‌دهند.

2-1-2 مقیاس ماکروسکپی

در مقیاس ماکروسکپی توصیف هندسی محیط توسط نسبت‌های حجمی فازها (هوا و حجم پر) صورت می‌گیرد، در حالتی که اگر محیط متشکل از دو فاز هوا (خالی) و جامد باشد نسبت‌های فوق شامل نسبت تخلخل، درجه پوکی و ضریب تراکم هستند.

2-2 توصیف مکانیکی

خصوصیات مکانیکی محیط‌های دانه‌ای را می‌توان در دو حالت استاتیکی و سینماتیکی مورد بررسی قرار داد. این بررسی باید در دو مقیاس میکروسکپی و ماکروسکپی صورت پذیرد.

2-2-1 مقیاس میکروسکپی

انتقال نیروها در محیط‌های دانه‌ای غیر پیوسته اساساً از طریق سطح تماس دانه‌ها انجام می‌شود. شدت این نیروها از یک سو به میزان بار اعمال شده و از سوی دیگر به ساختار هندسی محیط دانه‌ای بستگی دارد. در مقیاس میکروسکپی توصیف استاتیکی توسط نیروهای سطح تماس دانه‌ها انجام می‌شود. از نتایج حاصل از شبیه سازی عددی توسط Rothenburg و همکارانش، روابطی پیشنهاد شده که می‌توان توزیع نیروهای عمودی ومماسی متوسط بین دانه‌ای را توصیف کرد [5].

$$\bar{F}_n(\theta) = \bar{F}_0(1+a_n Cos2(\theta-\theta_n)) \qquad (2)$$

$$\bar{F}_t(\theta) = -\bar{F}_0\, a_t Sin2(\theta-\theta_t) \qquad (3)$$

که در روابط فوق $\bar{F}_0$ نیروی عمودی متوسط روی تمام تماس‌های موجود، θ جهت تماس‌ها، θ_n جهت اصلی نیروهای تماس عمودی و θ_t جهتی که در آن نیروی تماس متوسط مماسی صفر می‌باشد. a_n و a_t پارامترهایی هستندکه به صورت عددی محاسبه می‌شوند. در یک محیط دانه‌ای متغیرهای سینماتیک، جابه‌جائی بین دانه‌ای (از نوع انتقالی یا چرخشی) می‌باشند. جابه‌جایی‌های نسبی بین‌دانه‌ها رامی‌توان به‌دوصورت توصیف‌نمود:

- تغییر مکان نسبی مرکز دانه نسبت به مرکز دانه دوم
- تغییر مکان نسبی در نقطه تماس دانه‌ها

2-2-2 مقیاس ماکروسکپی

در مقیاس ماکروسکپی رفتار مکانیکی مصالح دانه‌ای را از طریق رابطه بین دو متغیر استاتیکی و سینماتیکی یعنی تنش و کرنش نشان می‌دهند.

3. شبیه سازی عددی آزمایش فشار دو محوری

در میان روش‌های عددی مطالعه بر روی محیط‌های دانه‌ای، روش المان‌های مجزا از معروفیت خاصی برخوردار است و بیش از همه توسعه یافته است.

در این روش دانه‌های تولید شده به صورت مستقل از یکدیگر عمل می‌کنند، مگر این که تماسی بین آنها بر قرار گردد. در روش المان‌های مجزا (کد PFC2D) برای محاسبات از یک فرآیند دینامیکی استفاده می‌گردد. در واقع سیستم، زمانی در تعادل استاتیکی است که برآیند نیروها و ممان‌های وارد بر هر دانه صفر باشد. در صورت صفر نبودن برآیند نیروها و ممان‌ها، شتاب‌های خطی و زاویه‌ای تولید می‌شوند. زمان محاسباتی در هر سیکل در این روش به اندازه کافی کوچک انتخاب می‌شود تا سرعت و شتاب دانه‌ها در آن پریود ثابت فرض گردد.

در پایان هر سیکل موقعیت جدید دانه‌ها محاسبه می‌شود. جهت انجام این محاسبات از دو قانون حرکت و نیرو – تغییر مکان استفاده می‌شود. موقعیت جدید هر دانه در هر سیکل محاسباتی از طریق قانون حرکت توسط محاسبه شتاب‌های خطی و چرخشی و نهایتا سرعت دانه‌ها تعیین می‌شود. با تعیین یک قانون نیرو – تغییر مکان، نیروهای تماس جدید جهت محاسبه تغییر مکان دانه‌ها در سیکل بعدی تکرار می‌شود تا نهایتا سیستم به یک تعادل استاتیکی برسد [6].

3-1 مراحل انجام شبیه سازی عددی

مراحل انجام شبیه سازی عددی آزمایش فشار دو محوری را می‌توان به سه مرحله زیر تقسیم نمود:

الف) تولید هندسی نمونه دانه‌ای

ب) ایجاد وضعیت ابتدایی تنش‌ها (ایزوتروپ)

ج) اجرای آزمایش فشار دو محوری

3-1-1 تولید هندسی نمونه دانه‌ای

آزمایش فشار دو محوری در آزمایشگاه 3S گرونوبل فرانسه توسط Lanier و همکارانش با استفاده از دستگاه برش $1\gamma 2\varepsilon$ انجام شده است. توسط این دستگاه می‌توان مقادیر ماکروسکپی کرنش‌ها (γ و ε_y و ε_x) و تنش‌ها (τ_{xy} و σ_y و σ_x) را در حین آزمایش کنترل نمود. آزمایش روی یک نمونه از دانه‌های حقیقی دو بعدی با مقطع دایره با تعداد و قطرهای به شرح ذیل صورت گرفته است [7].

- 177 دانه با قطر 28 میلیمتر
- 240 دانه با قطر 18 میلیمتر
- 305 دانه باقطر 13 میلیمتر

خصوصیات اندازه‌گیری شده دانه‌های حقیقی مورد آزمایش عبارتند از:

- ضریب اصطکاک بین دانه‌ای 0/532
- جرم حجمی $500\ Kg/m^3$
- ضریب سختی عمودی دانه‌ها 100 Mpa

در شبیه سازی عددی دانه‌هایی با همین ابعاد، شکل، دانه بندی وخصوصیات تولید شده است. در این مرحله موقعیت هندسی دانه‌ها در زمان تولید دقیقا مطابق با موقعیت اندازه‌گیری شده دانه‌های حقیقی و قطر آنها در آزمایشگاه بوده است. به دلیل موجود نبودن ضریب سختی مماسی دانه‌های حقیقی در شبیه سازی عددی مقدار آن برابر با سختی عمودی دانه‌ها در نظر گرفته شده است.

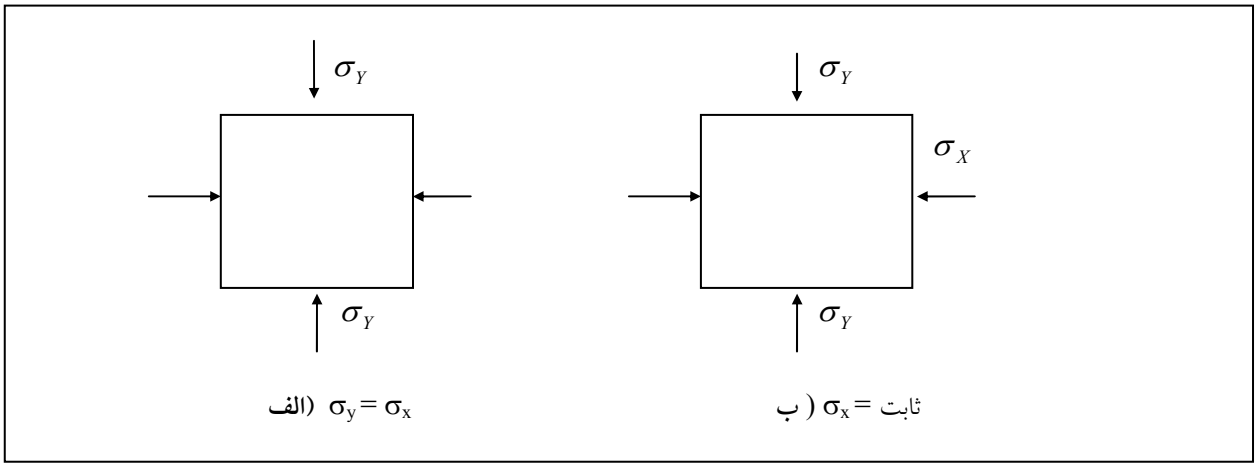
3-2-2 وضعیت ابتدایی تنش‌ها

در آزمایشگاه قبل از شروع آزمایش فشار دو محوری، نمونه حقیقی در یک وضعیت تنش ایزوتروپ برابر 50 kpa قرارگرفته است. در شبیه سازی عددی (کد PFC2D) توسط یک برنامه servo میتوان تنش را روی جداره‌های نمونه تولیدشده کنترل نمود. این عمل با حرکت دادن جداره‌ها و به وجود آمدن تنش‌های عمودی (σ_y) و افقی (σ_x) روی جداره‌ها صورت می‌گیرد. بنابراین با نوشتن برنامه‌ای، قادر خواهیم بود با کنترل سرعت جابه‌جایی جداره‌ها در دو جهت عمودی و افقی، تنش‌های افقی و عمودی وارد به نمونه تولید شده را به مقدار 50kpa مطابق شرایط آزمایشگاهی ثابت نگاهداریم (شکل 1 الف).

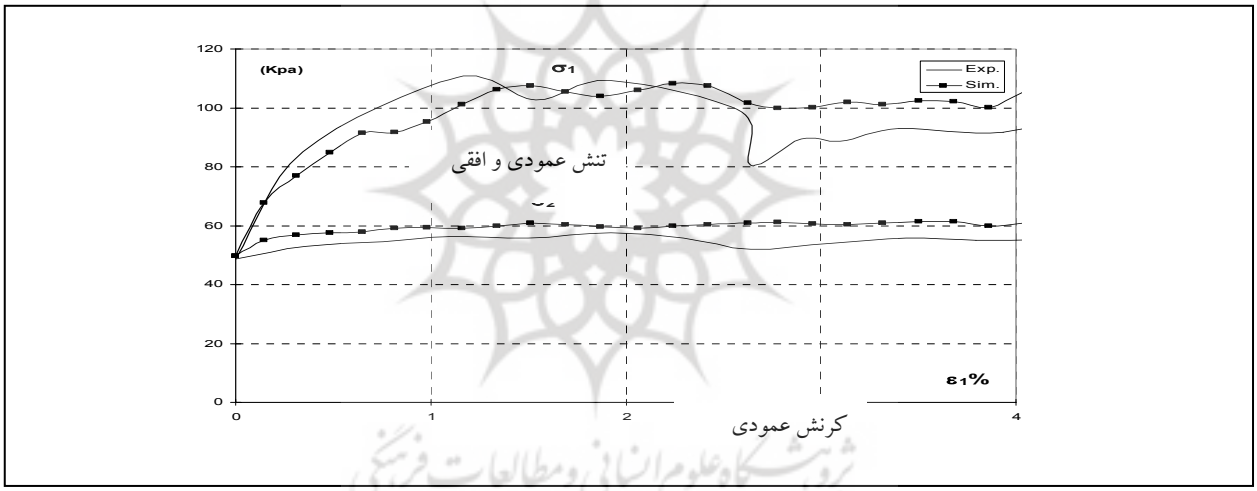
3-3-3 اجرای آزمایش فشار دو محوری

در شبیه سازی عددی بعد از به وجود آوردن یک وضعیت تنش ایزوتروپ برای نمونه تولید شده، اجرای آزمایش فشار دو محوری

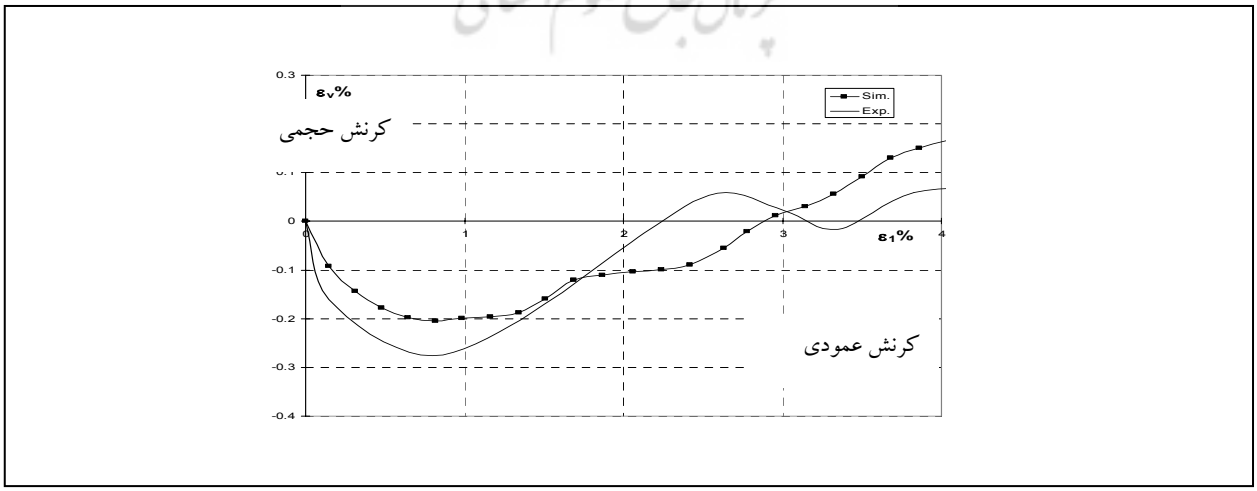
آغاز می‌شود، در طول آزمایش فشار دو محوری با تغییر مکان عمودی جداره‌های افقی تنش در جهت عمودی به نمونه اعمال می‌شود و همزمان با آن جداره‌های قائم طوری تغییر مکان افقی می‌دهند که همواره در طول آزمایش تنش افقی تقریبا به مقدار 50kpa ثابت بماند (شکل 1 ب).



شکل 1. انواع حالت بارگذاری: الف) ایزوتروپی و ب) فشار دو محوری



شکل2. تغییرات تنش‌های محوری وثابت تابعی از کرنش محوری برای دو حالت عددی و تجربی



شکل3. تغییرات کرنش حجمی تابعی از کرنش محوری برای دو حالت عددی و تجربی

4. مقایسه نتایج شبیه سازی عددی و تجربی

در این بخش نتایج حاصل از شبیه سازی عددی برای آزمایش فشار دو محوری و مقایسه آنها با نتایج حاصل از روش آزمایشگاهی در دو مقیاس میکروسکپی و ماکروسکپی ارایه می‌گردد.

4-1 نتایج در مقیاس ماکروسکپی

شکل‌های 2و3 به ترتیب تغییرات تنش فشاری ($\sigma_1 = \sigma_y$)، تنش ثابت ($\sigma_2 = \sigma_x$) وکرنش حجمی(ε_v) را نسبت به کرنش محوری ($\varepsilon_1 = \varepsilon_y$) برای دو حالت عددی و تجربی در طول بارگذاری نشان می‌دهند.

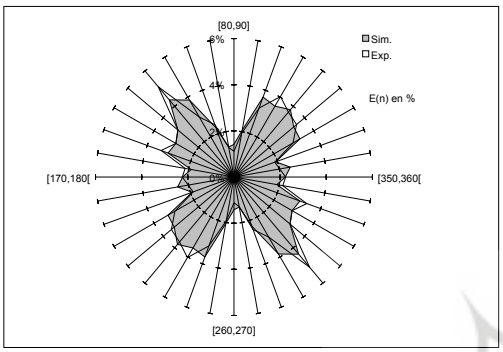
مطالعه مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از شبیه سازی عددی و تجربی ما را به یک تطابق مناسب بین این نتایج هدایت می‌کند. همان طور که در شکل 2 مشاهده می‌شود منحنی‌های تنش-کرنش در طول آزمایش فشار دو محوری برای دو حالت عددی و تجربی نزدیک به یکدیگر می‌باشند، همچنین ملاحظه می‌شود که تنش ثابت ($\sigma 2$) در طول آزمایش تقریبا ثابت نگاه داشته شده است.

با اندازه‌گیری ضریب الاستیسیته در ابتدای منحنی‌های تنش- کرنش، مقدار این ضریب برای هر دوحالت عددی و تجربی تقریبا مساوی است. همچنین مقدار بیشینه ($\sigma 1$) برای هردو حالت تقریبا برابر است. در شکل 3 منحنی‌های کرنش حجمی یک رفتار انبساط حجمی را در ابتدای آزمایش و به دنبال آن یک رفتار انقباض حجمی را از خود نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج، یک تطابق قابل قبول را بین منحنی‌های کرنش حجمی برای دو حالت عددی و تجربی نشان می‌دهند.

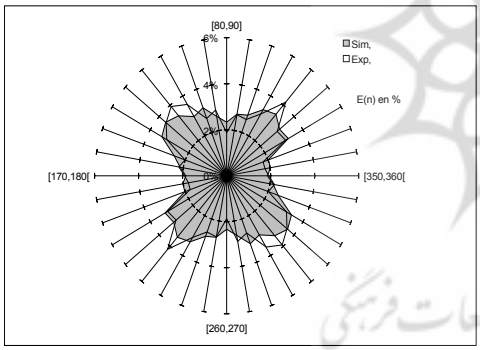
4-2 نتایج در مقیاس میکروسکپی

جهات تماس بین دانه‌ای

شکل 4 توزیع تماس‌های بین دانه‌ای را برای دو حالت عددی و تجربی نشان می‌دهد. در این شکل تغییرات غیر ایزوتروپی هندسی در محیط دانه‌ای بین وضعیت ابتداییε_1 = ٪0 و وضعیت ε_1 =٪12 مشاهده می‌شود. در نمودارها، $E(\theta)$ معرف احتمال وجود تماس در جهت θ است. اختلاف محاسبه شده در توزیع تماس دانه‌ها در حالت ابتدایی(ε_1 = ٪0) بین روش‌های عددی وتجربی، به علت اجرای 69000 سیکل محاسباتی برای رسیدن به وضعیت تنش‌های ایزوتروپ در شبیه سازی عددی است. در روی نمودارها دو جهت با تعداد تماس دانه‌ای قابل ملاحظه، دیده می‌گردد که به علت موقعیت قرارگیری اولیه دانه‌های حقیقی در نمونه آزمایشگاهی است. شکل 4 ب توزیع تماس‌های بین دانه‌ای رادر کرنش12٪ نشان می‌دهد. نتایج تطابق خوبی را در تعداد تماس بین دانه‌ای در جهات مختلف، بین دو روش عددی و تجربی نشان می‌دهند.



الف) ε_1 = ٪0

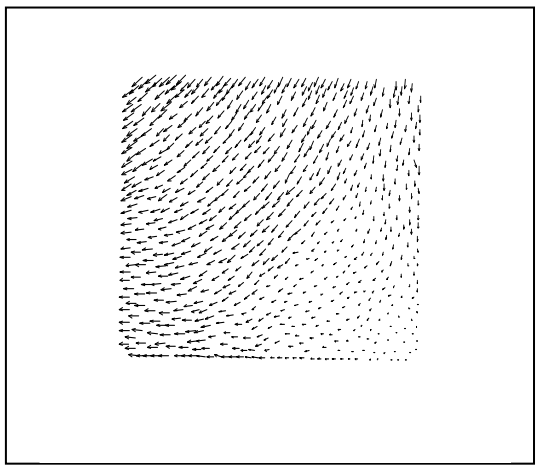


ب) ε_1 =٪12

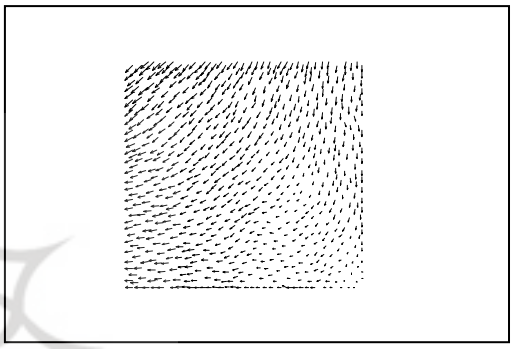
شکل4. توزیع تماس بین دانه‌ای حاصل از شبیه سازی عددی و تجربی در آزمایش فشار دو محوری

میدان برداری تغییر مکان دانه‌ها

تغییر مکان دانه‌ها در طول آزمایش فشار دو محوری توسط شکل 5 به صورت برداری نمایش داده شده است. این میدان‌های برداری برای کرنش محوری معادل 6/6٪ هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود میدان‌های برداری تغییر مکان برای شرایط عددی وتجربی تقریبا مشابهند.

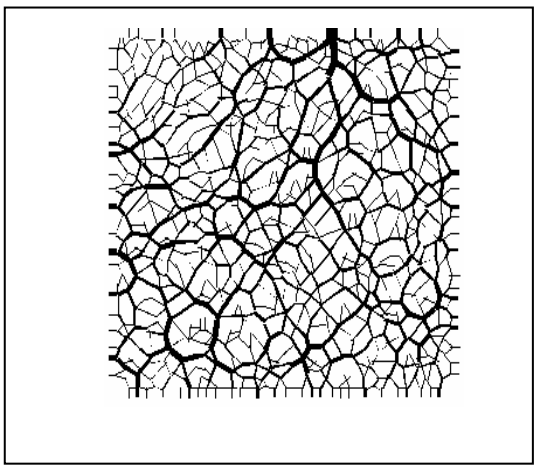


الف) شبیه سازی عددی
(تغییر مکان بیشینه 52/9 میلیمتر)

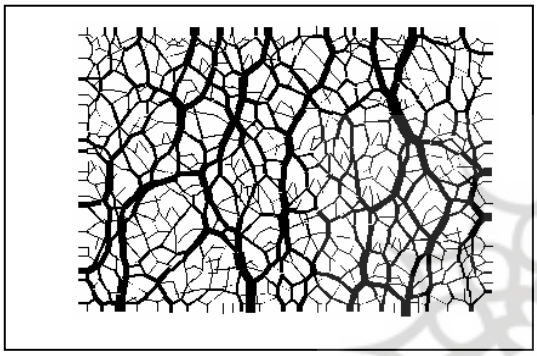


ب) تجربی(تغییر مکان بیشینه 48/9 میلیمتر)

شکل5. میدان برداری تغییر مکان دانه‌ها برای یک کرنش محوری معادل 6/6٪



الف) ε_1 = ٪0 (نیروی بیشینه 16/8 KN)



ب) ε_1 =٪12 (نیروی بیشینه 5 KN)

شکل 6. شبکه نیروهای تماس بین دانه‌ای در آزمایش فشار دو محوری

نیروهای تماس

به علت نداشتن نتایج آزمایشگاهی در مورد نیروهای تماس بین دانه‌ای در طول آزمایش فشار دو محوری در شکل 6 فقط تصاویر نیروهای تماس بین دانه‌ای در کرنش‌های 12٪ در شبیه سازی نشان داده شده است. ضخامت خطوط شبکه نیروها متناسب با شدت نیروهای تماس می‌باشند.

در شکل 6 الف در وضعیت ابتدایی ε_1 = ٪0 جهت اصلی در شبکه نیروها مشخص نیست در صورتی که در یک کرنش 12٪ وضعیت غیر یکنواخت و غیرایزوتروپ در نیروهای تماس قابل مشاهده است. علت این است که جهت بارگذاری در طول آزمایش فشار دو محوری عمودی است، بنابراین جهت اصلی نیروهای تماس بر روی نمودار نیز متمایل به این جهت است.

5. نتیجه‌گیری

رفتار محیط‌های دانه‌ای در مقیاس ماکروسکپی قویاً مرتبط با ساختار هندسی و مکانیکی دانه‌های تشکیل دهنده این محیط‌هاست. مشاهده شد که روش المان‌های مجزا ابزاری مفید برای مطالعه بر روی محیط‌های دانه‌ای است. از طریق شبیه سازی عددی قادر خواهیم بود، پدیده‌هایی که در هنگام بارگذاری در این محیط‌ها رخ می‌دهد را مشاهده و مطالعه کنیم.

نتایج حاصل از شبیه سازی عددی از یک آزمایش فشار دو محوری با نتایج تجربی از تطابق کافی برخوردار بودند. منحنی‌های رفتار ماکروسکپی یعنی تنش-کرنش و تغییرات حجمی به دست آمده از دو روش عددی و تجربی، شبیه به یکدیگر بودند. نتایج نشان دادند که ضریب الاستیسیته در ابتدای منحنی‌های

تنش-کرنش، و همچنین مقدار بیشینه تنش فشاری برای هر دو حالت عددی و تجربی تقریبا برابرند.

در مقیاس میکروسکپی، تغییرات میکروسازه‌ای یعنی توزیع تماس بین دانه‌ای و میدان برداری تغییر مکان دانه‌ها نیز یک تطابق قابل قبول را بین نتایج حاصل از دو روش عددی و تجربی نشان دادند. نتایج حاصل از شبیه سازی عددی یک وضعیت غیر یکنواخت و غیرایزوتروپ در نیروهای تماس بین دانه‌ای را در طول آزمایش فشار دو محوری نشان می‌دهد. مشاهده گردیدکه بر خلاف وضعیت ابتدایی، نمودار شبکه نیروهای تماس در طول آزمایش متمایل به جهت اصلی (بارگذاری) می‌گردد.

6. مراجع

1- Tomiczek, K. (2003) "Modeling of sandstone rock samples using PFC2D Code," in Numerical Modeling in Micromechanics Via Particle Methods. Proceedings of the 1st International PFC Symposium, Gelsenkirchen, Germany, November 2002, pp. 233-239, H. Konietzky, Ed. Lisse, Balkema.

2- Zhou, J. and Chi, Y. (2003) "Shear-band of sand simulated by particle flow code (PFC)," in Numerical Modeling in Micromechanics Via Particle Methods. Proceedings of the 1st International PFC Symposium, Gelsenkirchen, Germany, November 2002, pp. 205-210, H. Konietzky, Ed. Lisse: Balkema.

3- Pierce, M. E., Potyondy, D. and Andrieux, P. L. J. S. (2002) "Use of the particle flow code (PFC2D) to assess stability of undercut rock fill at Brunswick Mine," in NARMS-TAC 2002: Mining and Tunneling Innovation and Opportunity, Vol. 1, pp. 173-180, R. Hammah, et al., Eds. Toronto: University of Toronto Press.

4- Kleier, A. J. and Kleinschrodt. H.D. (2003) "Discontinuous mechanical modeling of granular solids by means of PFC and LS-Dyna", in Numerical Modeling in Micromechanics Via Particle Methods". Proceedings of the 1st International PFC Symposium, Gelsenkirchen, Germany, November 2002, pp. 37-43, H. Konietzky, Ed. Lisse: Balkema.

5- Rothenburg, L., Bathurst, R.J. and Dusseault, M.B. (1989) "Micro mechanical idea constitutive modeling of granular materials". Powders and grain, Thomton (ed), Balkema, Rotterdam, pp.355-363.

6- PFC2D. 2002: User Manual. Itasca Consulting Group, Inc, Minneapolis, USA.

7- Lanier, J., Reynaud, M. and Combe, G. (1996) "Etude des mecanismes de deformation d'une milieu granulaire bidimensionnel". Des geomateriaux aux ouvrages, C. Petit, G. Pijaudier Cabot, J.M. Reynouard, edits, Editions, pp. 15-32.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی