

مدل سازی عددی تأثیر فشار همه جانبه بر الگوی شکست سنگ های شکننده در آزمایش سه محوری

علی اکبر گلشنی^{۱*}، حمید رجبی^۲

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس

golshani@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۱۲/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۴/۲۴

چکیده - یکی از اهداف اصلی آزمایش های مکانیک سنگ، یافتن ویژگی های تغییر شکل و مقاومت نمونه های سنگ، تحت شرایط حاکم در محل نمونه برداری است. در این میان، آزمایش سه محوری به علت کاربرد فراوان در درک رفتار مکانیکی سنگ بسیار مورد توجه است. برای شبیه سازی الگوی شکست سنگ گرانیتی اینادا در آزمایش سه محوری به صورت ذرات متصل به هم، از روش المان مجزا و از نرم افزار PFC3D استفاده شده است. تنش محوری تفاضلی بیشینه و ضریب پواسون حاصل از مدل سازی، تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. چگالی ترک در نتایج آزمایشگاهی از عدد ابتدایی خاصی شروع شده و این عدد با افزایش تنش محوری کاهش می یابد و در لحظه شکست تقریباً ثابت است. در مدل سازی به خاطر در نظر نگرفتن ریزترک های اولیه در مدل سنگ، عدد چگالی ترک در ابتدای آزمایش صفر است اما با افزایش تنش محیطی، شروع به ترک خوردن کرده و این روند در نزدیکی تنش بیشینه محوری تفاضلی دچار افزایش ناگهانی می شود و در زمان شکست، عدد چگالی ترک در بازه ای ثابت قرار می گیرد که نشان دهنده شکست در نمونه است. در آزمایش تک محوری می توان تجمع ریزترکها برای ایجاد شکست به موازات محور طولی نمونه و یا شکاف^۱ را به خوبی در مدل مشاهده کرد. با افزایش تنش همه جانبه به ۲۵ مگا پاسکال، حالت تجمع ریزترکها برای ایجاد شکست در مدل به حالت شکست برشی نزدیک می شود. با پیگیری روند ایجاد ریزترکها و شکست مدل در آزمایش های سه محوری با فشارهای همه جانبه ۵۰، ۶۰ و ۸۰ مگاپاسکال به خوبی نحوه شکست برشی در مدل دیده شد.

کلیدواژگان: مکانیک سنگ، الگوی شکست، فشار همه جانبه، ذرات متصل به هم، عدد چگالی ترک.

۱- مقدمه

آزمایش سه محوری به علت کاربرد فراوان خود در درک رفتار مکانیکی سنگ، بسیار مورد توجه است. تحقیقات نشان می دهد که گسیختگی شکننده^۲ ایجاد شده در سنگ تحت اثر بارهای وارده در آزمایش سه محوری، از تجمع و

یکی از اهداف اصلی آزمایش های مکانیک سنگ، یافتن ویژگی های تغییر شکل و مقاومت نمونه های سنگ، تحت شرایط حاکم در محل نمونه برداری است. در این میان،

2- Brittle failure

1- Splitting

۲- مطالعات آزمایشگاهی

در این مقاله از نتایج آزمایشگاهی مطالعات گلشنی و همکاران بر روی سنگ گرانیتی اینادا^۴ استفاده شده که نمونه‌های آن از معدنی در ایباراکی^۵ کشور ژاپن تهیه شده است. میانگین سایز دانه‌ها ۲ میلی‌متر و تخلخل سنگ ۰/۱ است. نمونه‌های آزمایشگاهی قطر ۵ و ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر دارد [۱].

۳- معادلات رفتاری

در روش ذرات متصل به‌هم، برای بیان نحوه ارتباط میان ذرات، سه حالت پیوند موازی^۶، پیوند اتصالی^۷ و بدون پیوند^۸ در نظر گرفته می‌شود. پیوند موازی نشان‌دهنده رفتار فیزیکی اتصالی سیمانی میان ذرات متصل است و این پیوند نیرو و ممان را تحمل می‌کند. پیوند اتصالی، رفتار فیزیکی اتصال سیمانی ضعیف را نشان می‌دهد که به‌عبارت دیگر، حالتی از پیوند موازی با شعاع پیوندی صفر است و فقط نیرو تحمل می‌کند. حالت بدون پیوند (رفتار ذره-ذره) دارای سختی محدودی است و مقاومت این پیوند با اندازه ذرات، تخلخل و ضریب اصطکاک کنترل می‌شود. اتصالات میان ذرات برای مدلسازی سنگهای گرانیتی، با توجه به توضیحات بالا، به‌صورت حالت اول و رفتار پیوندهای موازی در نظر گرفته می‌شود [۹]. نیرو و گشتاور کلی اعمالی بر هر اتصال و سیمان در شکل ۱، شامل نیروهای F_i ، \bar{F}_i و \bar{M}_i است که در آن F_i از هم‌پوشانی سیستم ذره-ذره در رفتار دانه‌ای و \bar{F}_i و \bar{M}_i با پیوند موازی تحمل می‌شود [۹، ۲]. اتصالات میان ذرات برای مدلسازی سنگ‌های گرانیتی به‌صورت پیوندهای موازی در نظر گرفته می‌شود [۱۰].

به‌هم پیوستن ریزترک‌های کششی است که در نهایت باعث گسیختگی برشی^۱ در سنگ خواهد شد. تغییر در فشار همه‌جانبه وارد بر سنگ در آزمایش سه‌محوری بر نتایج آزمایش و الگوی گسیختگی نمونه تأثیر گذاشته و در زمان تنش‌های جانبی کم، صفحه شکست نمونه به‌حالت قائم و در تنش‌های جانبی بیشتر، صفحه شکست به‌حالت مایل تغییر کرده و صفحه گسیختگی برشی نامیده می‌شود [۱]. برای افزایش دقت و کاهش هزینه‌ها، بسیار مناسب‌تر است که با استفاده از روش‌های عددی، آزمایش‌های مکانیک سنگ را مدلسازی کرده و برای کاربردهای بعدی، همراه انجام آزمایش، از مدل مشابه استفاده کنیم، و نتیجه صحیح و منطبق با واقعیت را با دقت قابل قبولی به‌دست آوریم. یکی از روش‌های مدلسازی در مکانیک شکست سنگ، روش ذرات متصل به‌هم^۲ است [۲]. در روش ذرات متصل به‌هم سنگ به‌شکل مجموعه‌ای از ذرات با اتصالات خاص در کنار هم فرض می‌شود که بهترین روش عددی برای مدلسازی ذرات متصل به‌هم، روش المان مجزا است [۳]. تحقیقات انجام‌شده قبلی نشان می‌دهد که برای اجرای مدل با توصیفات بالا، استفاده از نرم‌افزار جریان ذرات سه‌بعدی (PFC3D)^۳ بسیار مفید و منطقی بوده و نتایجی مطابق با واقعیت منعکس کرده است [۴-۸]. در مطالعات گذشته تکیه بر پدیده شکست سنگ در آزمایش‌های سه‌محوری بوده و بر نحوه تأثیر تنش همه‌جانبه بر الگوی شکست نمونه، توجه زیادی نشده است. هدف این مقاله مطالعه تأثیر فشار همه‌جانبه وارد بر نمونه‌ای از سنگ شکننده بر الگوی شکست و بررسی این الگوی پس از اعمال تنش انحرافی محوری تا مرز گسیختگی است.

4- Inada granite
5- Ibaraki
6- Parallel bond
7- Contact bond
8- unbonded

1- Shear failure
2- Bonded particle model
3- Particle flow code in 3 dimensions

$$A = \begin{cases} 2\bar{R}t, t=1; & PFC 2D \\ \pi\bar{R}^2 & PFC 3D \end{cases} \quad (4)$$

$$I = \begin{cases} \frac{2}{3}\bar{R}^3t, t=1; & PFC 2D \\ \frac{1}{4}\pi\bar{R}^4 & PFC 3D \end{cases}$$

$$J = \begin{cases} NA; & PFC 2D \\ \frac{1}{2}\pi\bar{R}^3 & PFC 3D \end{cases}$$

پیوندهای میان ذرات از نظریه‌ی تیرها پیروی می‌کنند و اگر میزان بیشینه تنش کششی از میزان مقاومت کششی ($\bar{\sigma}_{max} \geq \bar{\sigma}_c$) و یا میزان بیشینه تنش برشی از میزان مقاومت برشی تجاوز کند ($\bar{\tau}_{max} \geq \bar{\tau}_c$)، پیوند موازی موجود می‌شکند و پیوند از مدل مورد نظر حذف می‌شود.

$$\bar{\sigma}_{max} = \frac{-\bar{F}^n}{A} + \frac{|\bar{M}^s|\bar{R}}{I} \quad (5)$$

$$\bar{\tau}_{max} = \frac{|\bar{F}^s|}{A} + \frac{|\bar{M}^n|\bar{R}}{J}$$

خصوصیات توصیفی روش ذرات متصل به هم، ریزخصوصیات ذرات سیمانی است:

$$E_c, \left(\frac{k_n}{k_s}\right), \mu$$

ریز خصوصیات دانه‌ها: $\bar{\lambda}, \bar{E}_c, \left(\frac{\bar{k}^n}{\bar{k}^s}\right), \bar{\sigma}_c, \bar{\tau}_c$

که \bar{E}_c و \bar{E}_c ، به ترتیب، مدول الاستیسیته ذرات و سیمان، و نسبت‌های $\left(\frac{k_n}{k_s}\right)$ و $\left(\frac{\bar{k}^n}{\bar{k}^s}\right)$ ، به ترتیب، نسبت‌های سختی نرمال به برشی ذرات و سیمان در نظر گرفته می‌شود؛ $\bar{\lambda}$ ضریب افزایش شعاع پیوند موازی، μ ضریب اصطکاک ذرات، $\bar{\sigma}_c$ و $\bar{\tau}_c$ ، به ترتیب، مقاومت کششی و برشی پیوند موازی است [۲].

$$k_n = \begin{cases} 2tE_c, t=1; & PFC 2D \\ 4RE_c & PFC 3D \end{cases} \quad (6)$$

$$k_s = \frac{k_n}{(k_n/k_s)}$$

$$\bar{k}^n = \frac{\bar{E}_c}{R^{(A)} + R^{(B)}}$$

$$\bar{k}^s = \frac{\bar{k}^n}{(\bar{k}^n/\bar{k}^s)}$$

پیوند موازی، پارامترهای $\bar{k}^n, \bar{k}^s, \bar{\sigma}_c, \bar{\tau}_c, \bar{\lambda}$ و \bar{R} که به ترتیب، سختی نرمال و برشی در واحد سطح پیوند، مقاومت کششی و برشی پیوند، ضریب افزایش شعاع پیوند موازی و شعاع پیوند است، تعریف می‌شوند. در اتصال، موازی شعاع اتصال از رابطه (۱) به دست می‌آید و $R^{(A)}$ و $R^{(B)}$ شعاع ذرات اتصال است.

$$\bar{R} = \bar{\lambda} \min(R^{(A)}, R^{(B)}) \quad (1)$$

بردارهای نیرو و ممان را می‌توان با توجه به صفحه اتصال روی دستگاه مختصات محلی و مطابق با شکل ۱ و رابطه (۲) تجزیه کرد که در آن \bar{F}^n و \bar{M}^n به ترتیب نیروی محوری و ممان پیچشی، \bar{F}^s و \bar{M}^s به ترتیب نیروی برشی و ممان خمشی است.

$$\bar{F}_i = \bar{F}^n n_i + \bar{F}^s t_i \quad (2)$$

$$\bar{M}_i = \bar{M}^n n_i + \bar{M}^s t_i$$

زمانی که پیوند موازی شکل می‌گیرد \bar{F}_i و \bar{M}_i دارای مقدار اولیه‌ی صفر است. هر جزء افزایش متوالی جابه‌جایی و چرخش نسبی مانند $\Delta U^n, \Delta U^s, \Delta \theta^n$ و $\Delta \theta^s$ که $\Delta \theta_i = ((\omega_i^{(B)} - \omega_i^{(A)}) \Delta t)$ پس از آن که بردارهای جزئی برشی در صفحه اتصال چرخیده باشد به مقدار جزئی نیرو و ممان را افزایش می‌دهد [۲].

$$\Delta \bar{F}^n = \bar{k}^n A \Delta U^n$$

$$\Delta \bar{F}^s = -\bar{k}^s A \Delta U^s \quad (3)$$

$$\Delta \bar{M}^s = -\bar{k}^n J \Delta \theta^n$$

$$\Delta \bar{M}^n = -\bar{k}^s I \Delta \theta^s$$

A, I, J و J ، به ترتیب مساحت، ممان اینرسی و ممان اینرسی پیچشی سطح پیوند موازی در برش است.

مصالح با PFC^{3D} ارائه می‌شود.

$$\bar{\lambda} = 1^{(1)}$$

$$E_c = \bar{E}_c = 36.5 \times 10^9$$

$$\frac{k_n}{k_s} = 1^{(1)}$$

$$\frac{\bar{k}_n}{\bar{k}_s} = 1^{(1)}$$

$$\mu = 0.5^{(2)}$$

$$\bar{\sigma}_c = \bar{\tau}_c = 100 \text{MPa}^{(3)}$$

(۱) پارامترهایی که با استفاده از عدد یک مشخص شده‌اند به عنوان فرض در نظر گرفته شده (نسبت‌های سختی، فرض اولیه است و در ادامه امکان تغییر دارند).

(۲) پارامترهای مقاومت نرمال و برشی سیمان فرض اولیه است.

ضریب اصطکاک است.

۴- کالیبراسیون

برای همسوسازی نتایج مدلسازی با نتایج آزمایشگاهی باید با استفاده از روشهای خاصی به نام کالیبراسیون، به این هدف دست یافت. برای انجام این مرحله باید از نتایج آزمایشگاهی و مدلسازی در حالت تک‌محوری و استفاده از پارامترهای بی‌بعد زیر بهره برد [۱۰]:

$$\frac{\bar{E}_c}{k_n R} = f\left(\frac{\bar{k}_n}{k_s}, \frac{\bar{\sigma}_c}{\bar{\tau}_c}\right)$$

$$v = g\left(\frac{\bar{k}_n}{k_s}, \frac{\bar{\sigma}_c}{\bar{\tau}_c}\right)$$

پارامترهای $E_c, k_n/k_s, \mu$ خصوصیات مکانیکی ذرات را نشان می‌دهند و ضریب اصطکاک μ ۰/۵ فرض می‌شود. در راستای آسان‌سازی روند مدلسازی، نسبت (k_n/k_s) ، یک و عدد مدول الاستیسیته ذرات با مدول الاستیسیته اتصال سیمان یکسان و برابر با نیمی از مدول الاستیسیته سنگ اینادا انتخاب شده است. پارامترهای

سختی محوری هر تیر فرضی، $K = AE/L$ است که در آن A, E و L مساحت سطح، مدول الاستیسیته و طول تیر است. برای رفتار دانه‌ای مصالح داریم (شکل ۲):

$$K^n = \frac{k_n^{(A)} k_n^{(B)}}{k_n^{(A)} + k_n^{(B)}}$$

$$= \frac{k_n^{(A)} k_n^{(A)}}{k_n^{(A)} + k_n^{(A)}}$$

$$= \frac{k_n^{(A)}}{2}$$

$$K^n = \frac{AE}{L}$$

$$A = Lt$$

$$\Rightarrow \frac{k_n}{2} = \frac{(Lt) E_c}{L}$$

$$= E_c t$$

$$\Rightarrow E_c = \frac{k_n}{2t}, t = 1 \quad \text{PFC 2D}$$

$$\Rightarrow \frac{k_n}{2} = \frac{(L^2) E_c}{L} = E_c L$$

$$\Rightarrow E_c = \frac{k_n}{2L} = \frac{k_n}{4R} \quad \text{PFC 3D}$$

با فرض آن‌که $k_n = k_n^{(A)} = k_n^{(B)}$ و با رجوع به رابطه (۶) برای رفتار سیمانی مصالح خواهیم داشت:

$$K^n = \frac{k_n^{(A)} k_n^{(B)}}{k_n^{(A)} + k_n^{(B)}}$$

$$= \frac{k_n^{(A)} k_n^{(A)}}{k_n^{(A)} + k_n^{(A)}} = \frac{k_n^{(A)}}{2} \quad (7)$$

$$\bar{k}^n A = \frac{A \bar{E}_c}{L} = \frac{A \bar{E}_c}{R^{(A)} + R^{(B)}}$$

$$\Rightarrow \bar{E}_c = \bar{k}^n (R^{(A)} + R^{(B)})$$

مدول سیمان، به اندازه ذرات وابسته است. برای به‌دست آوردن مدول سیمان پایدار و ثابت باید سختی پیوند موازی با توجه به مجموع شعاع ذرات انتخاب شود. مدول ذرات E_c هم، به اندازه ذرات وابسته است. برای به‌دست آوردن مدول ذرات ثابت بایستی سختی ذرات با توجه به شعاع ذره انتخاب شود [۹]. در ادامه لیست پارامترهای انتخابی اولیه برای مدلسازی

درصد آزمایشگاهی و مدل‌سازی در کنار هم آورده شده است. اختلاف بسیار زیادی میان اعداد مدول الاستیسیته ۵۰ درصد آزمایشگاهی و مدول الاستیسیته ۵۰ درصد مدل‌سازی وجود دارد. وجود نزدیکی مدول اعداد الاستیسیته ۵۰ درصد مدل‌سازی به یک عدد واحد می‌تواند نشان‌دهنده وجود اختلاف در مبانی مدل‌سازی آزمایش‌ها با حالت طبیعی سنگ باشد.

در شکل ۹ الگوی شکست نمونه سنگ در مدل‌سازی آزمایش تک‌محوری را می‌بینید. خطوط ارتفاعی روی شکل، برش‌های قائم محتمل روی نمونه را در حالت گسیختگی قائم یا شکاف (splitting زیر نویس) نشان می‌دهد. در قسمت (ب) شکل ۹ با اعمال تنش همه‌جانبه ۱۰ مگا پاسکال، الگوی شکست نمونه بیانگر حالت مابین گسیختگی قائم و گسیختگی برشی است؛ صفحه محتمل در شکل نشان داده شده است. در قسمت (ج) تا (و) شکل ۹ با افزایش تنش همه‌جانبه به ۲۵، ۵۰، ۶۰ و ۸۰ مگا-پاسکال، به ترتیب، می‌توان حالت گسیختگی برشی و صفحه محتمل برش را مشاهده کرد.

در شکل ۱۰ اعداد تنش اولیه ترک در تنش‌های همه‌جانبه متفاوت در مطالعات گلشنی و همکاران [۱] و اعداد تنش اولیه ترک در مدل‌سازی حاضر نشان داده شده است.

از تقسیم تعداد ریزترک‌های موجود در نمونه بر حجم نمونه، پارامتری به نام چگالی ترک^۱ به دست می‌آید. در مطالعات آزمایشگاهی در فشار ۸۰ مگاپاسکال، این عدد در ۹۰ درصد تنش بیشینه‌ی تفاضلی محوری، برابر با 2×10^{-2} بر میلی‌متر مکعب بوده و این عدد تا شکست نمونه تقریباً ثابت است؛ ولی در مدل‌سازی این عدد در زمان شکست مدل از نمونه $2/98 \times 10^{-2}$ بر میلی‌متر مکعب است. به نظر می‌رسد در نمونه آزمایشگاهی در نزدیکی شکست دیگر

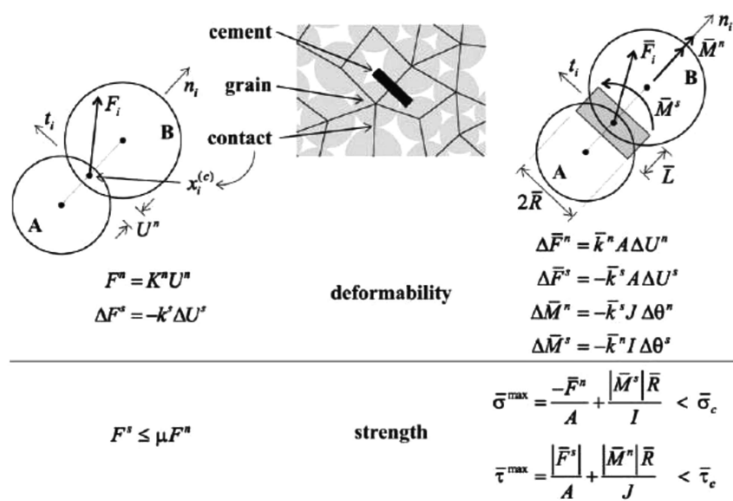
$\bar{\lambda}, \bar{E}_c, k_n/k_s, \bar{\sigma}_c, \bar{\epsilon}_c$ خصوصیات مکانیکی اتصال سیمانی بین ذرات را نشان می‌دهند. ذرات اندازه یکسانی دارند و اندازه هر دو ذره انتخابی یکسان خواهد بود. با مراجعه به راهنمای برنامه بهترین فرض برای $\bar{\lambda}$ عدد یک است. عدد تنش همسان قفل و بست دانه‌ای σ_0 با توجه به راهنمای برنامه، ۱ مگاپاسکال فرض می‌شود. منحنی‌های کالیبراسیون در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. مقداری برای پارامتر $\bar{\sigma}_c/\bar{\epsilon}_c$ انتخاب می‌کنیم. این نسبت برابر با یک انتخاب می‌شود. با استفاده از منحنی شکل ۴ و داشتن عدد ضریب پواسون آزمایشگاهی، نسبت \bar{k}_n/\bar{k}_s بدست می‌آید. با فرض عددی برای نسبت $\bar{\sigma}_c/\bar{\epsilon}_c$ در شکل ۳ و با داشتن نسبت \bar{k}_n/\bar{k}_s و استفاده از منحنی شکل ۳، مقدار $\bar{E}_c/\bar{k}_n R$ و در نهایت میزان سختی نرمال سیمان بدست می‌آید. با استفاده از میزان سختی نرمال سیمان و نسبت \bar{k}_n/\bar{k}_s ، مقدار سختی برشی سیمان نیز به دست می‌آید. با داشتن عدد ضریب پواسون برابر با ۰/۲۳ و استفاده از شکل ۳ میزان نسبت \bar{k}_n/\bar{k}_s به دست می‌آید. با انتخاب نسبت \bar{k}_n/\bar{k}_s برابر با ۱/۶ در منحنی شکل ۳ که نسبت $\bar{\sigma}_c/\bar{\epsilon}_c = 0.5$ یک دارد، می‌توان نسبت $\bar{E}_c/\bar{k}_n R$ را به دست آورد.

۵- بحث و نتایج

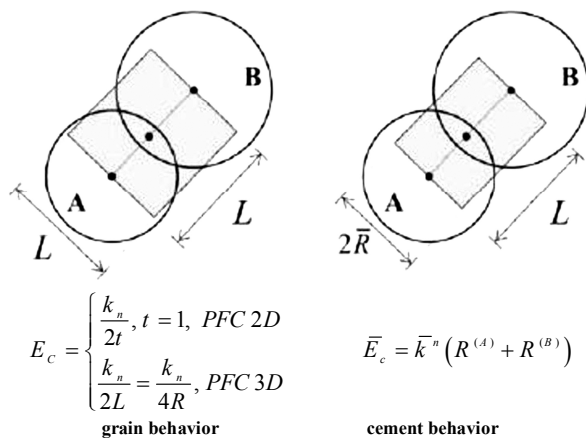
در شکل ۵ منحنی‌های تنش و کرنش آزمایشگاهی و مدل‌سازی در تنش جانبی ۸۰ مگاپاسکال نشان داده شده است. در شکل ۶، منحنی میزان تنش‌های تفاضلی بیشینه محوری آزمایشگاهی و مدل‌سازی در برابر تنش‌های جانبی متفاوت رسم شده است.

در شکل ۷ منحنی عدد ضریب پواسون ۵۰ درصد از نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی در برابر تنش‌های جانبی رسم شده است. در شکل ۸ منحنی مدول الاستیسیته ۵۰

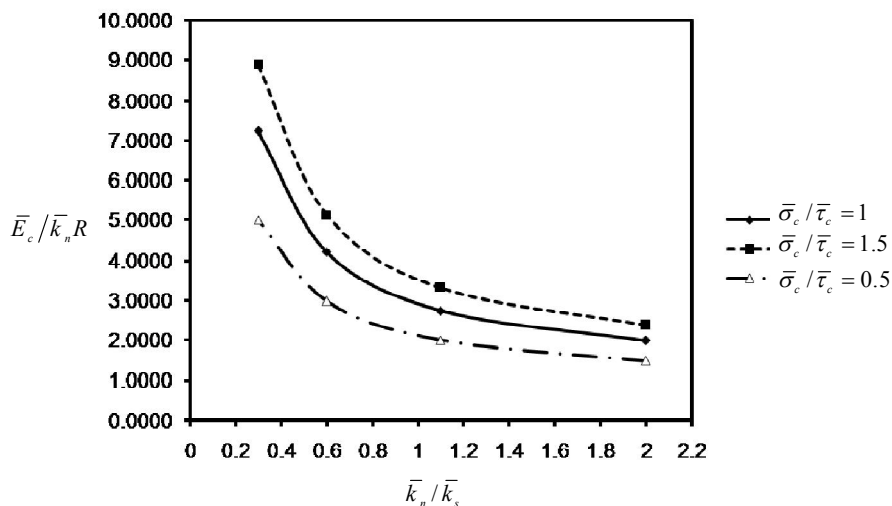
1- Number density of microcracks



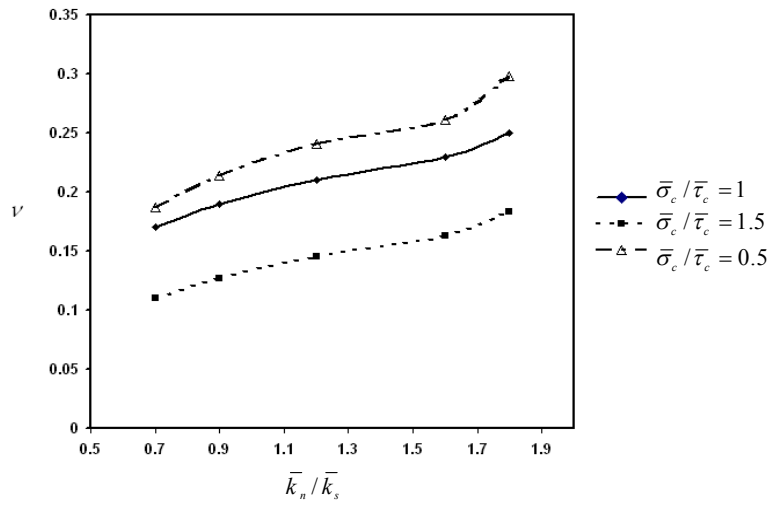
شکل (۱) مدل ذرات متصل بهم [۲]



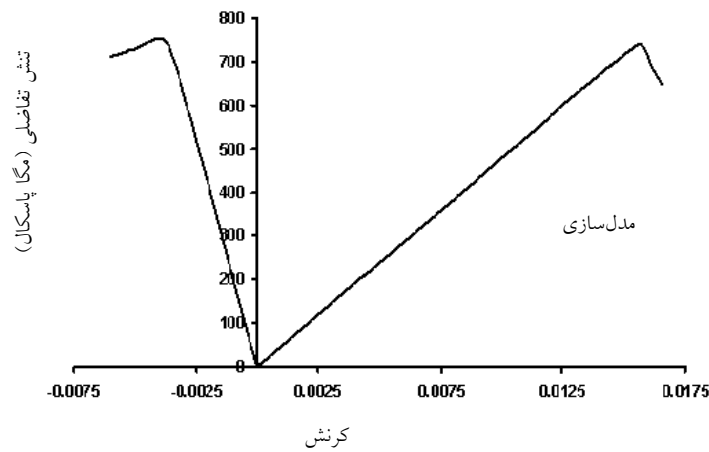
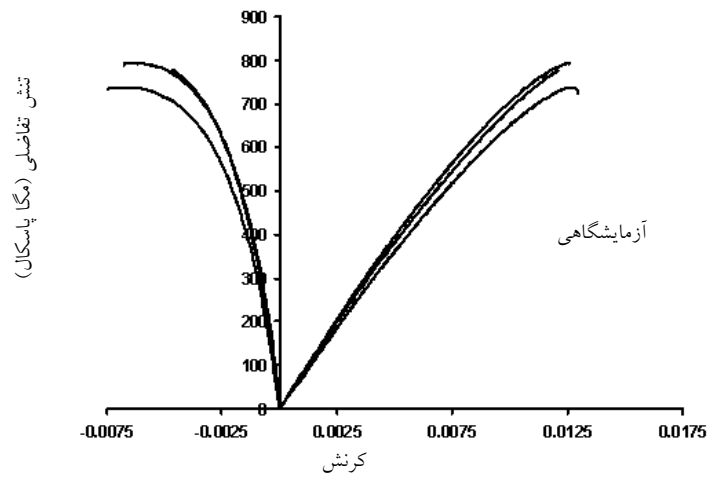
شکل (۲) نحوه مدل سازی مدول الاستیسیته در رفتار دانه ای و سیمانی [۲]



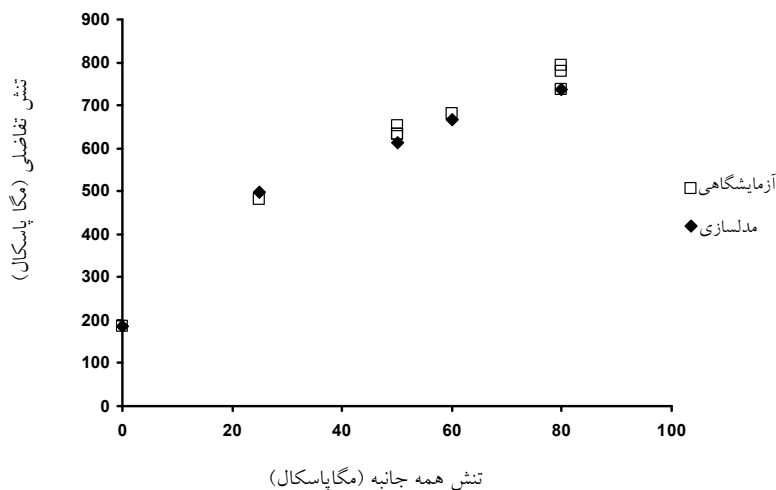
شکل (۳) منحنی کالیبراسیون پارامتر $\bar{E}_c / \bar{k}_n R$



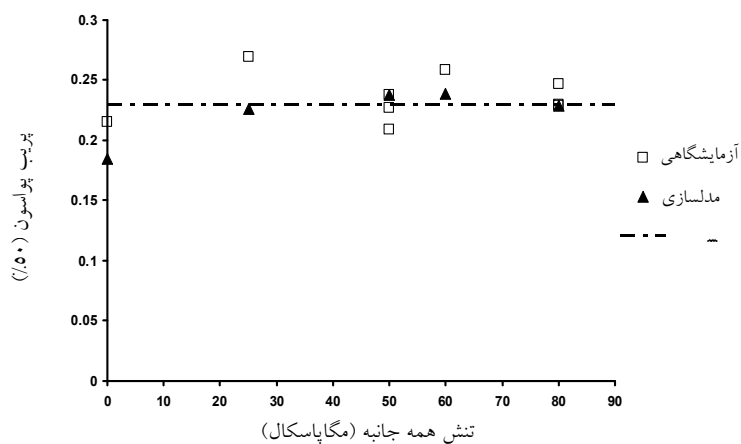
شکل (۴) منحنی کالیبراسیون ضریب پواسون



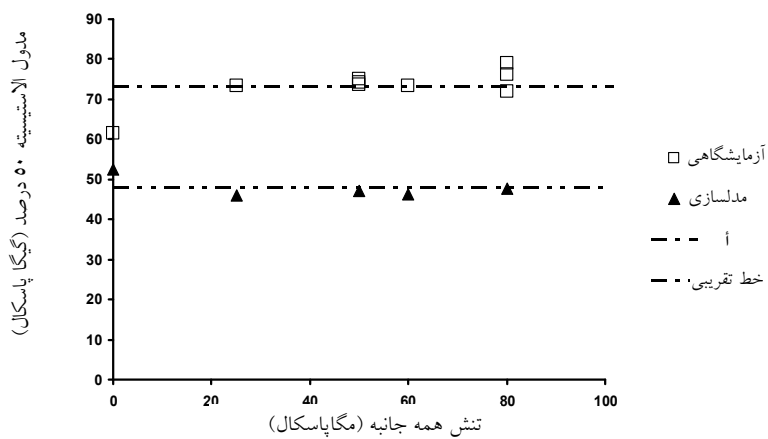
شکل (۵) منحنی تنش و کرنش آزمایشگاهی و مدل سازی در فشار همه جانبه ۸۰ مگاپاسکال [1]



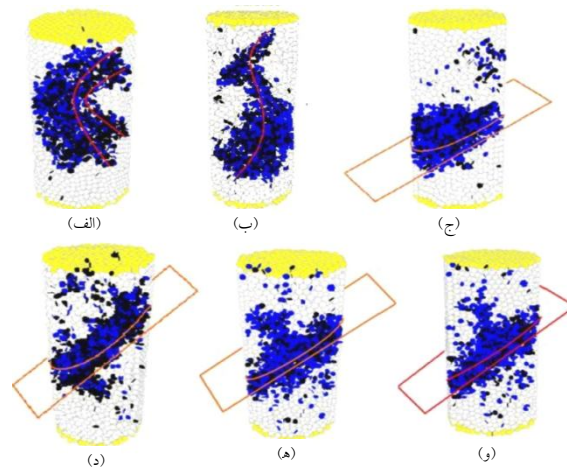
شکل (۶) منحنی تنش‌های تفاضلی بیشینه‌ی محوری آزمایشگاهی و مدلسازی [1]



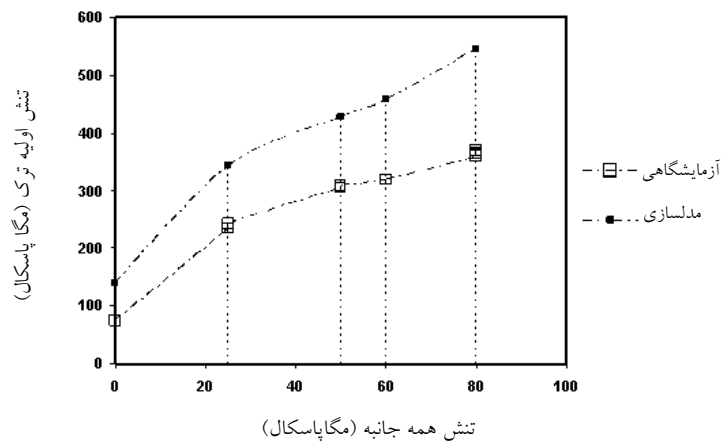
شکل (۷) ضریب پواسون ۵۰ درصد آزمایشگاهی و مدلسازی در برابر تنش همه‌جانبه [1]



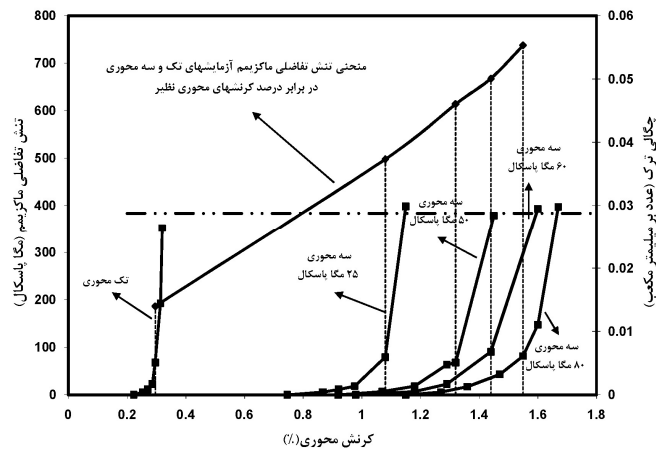
شکل (۸) مدول الاستیسیته ۵۰ درصد آزمایشگاهی و مدلسازی در برابر تنش همه‌جانبه [1]



شکل (۹) تغییر الگوی شکست نمونه در مدل‌سازی با تغییر فشار همه‌جانبه



شکل (۱۰) مقایسه تنش اولیه ترک آزمایشگاهی و مدل‌سازی [1]



شکل (۱۱) منحنی‌های عدد چگالی ترک در برابر کرنش محوری برای مدل‌سازی آزمایش تک محوری و سه محوری

با فشارهای همه‌جانبه ۲۵، ۵۰، ۶۰ و ۸۰ مگاپاسکال [1]

می‌دهد که عدد چگالی ترک در لحظه شکست تقریباً ثابت است. در مدل‌سازی به علت در نظرنگرفتن ریزترک‌های اولیه در مدل سنگ، عدد چگالی ترک در ابتدای آزمایش صفر است اما با افزایش تنش محیط شروع به ترک‌خوردن کرده و این روند در نزدیکی تنش بیشینه محوری تفاضلی افزایشی ناگهانی می‌یابد. رسم منحنی عدد چگالی ترک برای آزمایش‌های مختلف نشان می‌دهد که عدد چگالی ترک در لحظه شکست در بازه‌ای ثابت قرار می‌گیرد. رشد عدد چگالی ترک در حوالی شکست، برخلاف نتایج آزمایشگاهی تقریباً عددی ثابت است. در آزمایش تک‌محوری می‌توان تجمع ریزترکها برای ایجاد شکست قائم یا شکاف را در مدل به‌خوبی مشاهده کرد. با افزایش تنش همه‌جانبه به ۲۵ مگاپاسکال، حالت تجمع ریزترکها برای ایجاد شکست در مدل به حالت شکست برشی نزدیک می‌شود. با پیگیری روند ایجاد ریزترکها و شکست مدل در آزمایش‌های سه‌محوری با فشارهای همه‌جانبه ۵۰، ۶۰ و ۸۰ مگاپاسکال نحوه شکست برشی در مدل به‌خوبی دیده شده است.

تغییری در تعداد ریزترکها بوجود نمی‌آید و به‌جای آن به‌هم پیوستگی در راستای شکست نمونه حاکم است؛ ولی در مدل‌سازی با افزایش تنش در نزدیکی شکست نمونه، تعداد ریزترکها افزایش و به طبع آن عدد چگالی ترک افزایش می‌یابد. در شکل ۱۱ می‌بینید که منحنی‌های چگالی ترک در برابر کرنش محوری شکلی تقریباً یکسان دارند و در نزدیکی تنش بیشینه‌ی تفاضلی دچار افزایش ناگهانی می‌شوند. اعداد چگالی ترک در زمان شکست نمونه تقریباً به‌هم نزدیک است و با رسم خطوط افقی منقطع پررنگ، می‌توان قرارگیری اعداد انتهایی منحنی‌ها در بازه‌ای محدود را به عنوان آستانه گسیختگی کاملاً مشاهده کرد. با توجه به این‌که در مدل‌سازی، ریزترکها در نمونه برای ساخت گسیختگی در مدل مانند پدیده طبیعی که در آزمایش مشاهده می‌شود، به‌هم نمی‌پیوندند [تا صفحه شکست نمونه را به‌وجود بیاورند]، می‌توان رسیدن به آستانه مذکور را نشانی از شکل‌گیری گسیختگی در مدل‌سازی آزمایش بیان کرد.

۶- نتیجه‌گیری

تنش محوری تفاضلی بیشینه و ضریب پواسون حاصل از مدل‌سازی تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. در مدول الاستیسیته ۵۰ درصد، نتایج مدل‌سازی، و آزمایشگاهی دارای اختلافی در حدود ۳۷ درصد است. به نظر می‌رسد این اختلاف ناشی از در نظرنگرفتن ریزترک‌های اولیه در مدل، نسبت به سنگ طبیعی است.

چگالی ترک در نتایج آزمایشگاهی از عدد ابتدایی خاصی شروع شده و این عدد با افزایش تنش محوری کاهش می‌یابد. با رسیدن تنش محوری تفاضلی به ۹۰ درصد، تنش بیشینه به 2×10^{-2} بر میلی‌متر مکعب رسیده و تا شکست نمونه تقریباً ثابت است. البته مطالعات نشان

۷- مراجع

- [1] Golshani, A; Okui, Y; Oda, M; Takemura, T; "A micromechanical model for brittle failure of rock and its relation to crack growth observed in triaxial compression tests of granite"; *Mechanics of Materials*; 38, 2006, 287-303.
- [2] Potyondy, D. O; Cundall, P. A; "A bonded-particle model for rock"; *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*; 41, 2004, 1329-1364.
- [3] Jing, L; "A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modeling for rock mechanics and rock engineering"; *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*; 40, 2003, 283-353.
- [4] Holt, R. M; Kjølås, J; Larsen, I; Li, L; Pillitteri, A. G; Sønstebo, E. F; "Comparison between

- Mechanics & Mining Sciences; 39, 2002, 409–427.
- [8] Hadjigeorgiou, J; Esmaili, K; Grenon, M; "Stability analysis of vertical excavations in hard rock by integrating a fracture system into a PFC model"; Tunnelling and Underground Space Technology; 24(3), 2009, 296-308.
- [9] Particle Flow Code in three Dimensions (PFC3D), (1993-1998), Itasca Consulting Group Inc., Version 3.00-192. In: Optional features volume, thermal option. Minneapolis, MN: ICG.
- [10] Itasca Consulting Group Inc. PFC2D/3D (Particle Flow Code in 2/3 Dimensions), (1999), Version 2.0. Minneapolis, MN: ICG.
- controlled laboratory experiments and discrete particle simulations of the mechanical behavior of rock"; International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences; 42, 2005, 985–9
- [5] Fakhimi, A; "Application of slightly overlapped circular particles assembly in numerical simulation of rocks with high friction angles"; Engineering Geology; 74, 2004, 129–138.
- [6] Yoon, J; "Application of experimental design and optimization to PFC model calibration in uniaxial compression simulation"; International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences; 44, 2007, 871–889.
- [7] Jing, L; Hudson, J. A; "Numerical methods in rock mechanics"; International Journal of Rock

Numerical Modeling of Confinement Effects on Failure Pattern of Brittle Rocks in Triaxial Tests

A. Golshani^{1*}, H. Rajabi²

1- Lecturer in Geotechnical Engineering

2- MSc in Geotechnical Engineering

golshani@modares.ac.ir

Abstract:

One of the most important goals of the experiments is to determine deformation and strength of the rock specimen under applying triaxial load. The status of failure condition is one of the subjects, which can be used in soil mechanic and foundation engineering applications. To investigate the effect of confining pressure on the triaxial test, the rock was considered as bonded-particles method and simulated by PFC3D program. To compare the mechanical behavior and failure pattern of the numerical and experimental results at uniaxial and triaxial tests at the same conditions, the Young's modulus, Poisson's ratio and maximum axial stress were considered. On the other hand, the microcracks growth and change of failure pattern at the modeling of the uniaxial and triaxial tests with different confining pressures up to failure point were reported. According to the experimental work, the number density of microcracks decreases from starting value and remains almost constant up to the failure beyond that point. Comparison of the numerical and experimental results of maximum axial stress and the Poisson's ratio revealed a good accordance. The simulated Young's modulus was smaller in comparison with the experimental ones and the difference was about 36%, which seems to be due to absence of the pre-existing microcracks on the model. The initial number density of microcracks at the model was zero and increased while microcracking. Also the sudden increment around the maximum stress was observed, which is because of unstable growing of microcracks near the maximum stress. In all uniaxial and triaxial tests with different confining stresses, the number density of microcracks during the failure remained almost constant, which can be considered as a proof of failure occurring in the model. The experimental results indicated a similar trend as well.

Keywords: Rock mechanic, Failure pattern, Confining pressure, Number density of microcracks.