

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 گرانیبی 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 گرانیته اینادا^۴ استفاده شده که نمونه های آن از معدنی در ایباراکی^۵ کشور ژاپن تهیه شده است. میانگین ساین دانه ها ۲ میلی متر و تخلخل سنگ ۰/۱ است. نمونه های آزمایشگاهی قطر ۵ و ارتفاع ۱۲ سانتی متر دارد [۱].

۳- معادلات رفتاری

در روش ذرات متصل به هم، برای بیان نحوه ارتباط میان ذرات، سه حالت پیوند موازی^۶، پیوند اتصالی^۷ و بدون پیوند^۸ در نظر گرفته می شود. پیوند موازی نشان دهنده رفتار فیزیکی اتصالی سیمانی میان ذرات متصل است و این پیوند نیرو و ممان را تحمل می کند. پیوند اتصالی، رفتار فیزیکی اتصال سیمانی ضعیف را نشان می دهد که به عبارت دیگر، حالتی از پیوندی موازی با شعاع پیوندی صفر است و فقط نیرو تحمل می کند. حالت بدون پیوند (رفتار ذره ذره) دارای سختی محدودی است و مقاومت این پیوند با اندازه ذرات، تخلخل و ضریب اصطکاک کنترل می شود. اتصالات میان ذرات برای مدل سازی سنگ های گرانیته، با توجه به توضیحات بالا، به صورت حالت اول و رفتار پیوندهای موازی در نظر گرفته می شود [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 هم پوشانی سیستم ذره ذره در رفتار دانه ای و $\bar{F}_i$ و $\bar{M}_i$ با پیوند موازی تحمل می شود [۹، ۲]. اتصالات میان ذرات برای مدل سازی سنگ های گرانیته به صورت پیوندهای موازی در نظر گرفته می شود [۱۰].

به هم پیوستن ریز ترک های کششی است که در نهایت باعث گسیختگی برشی^۱ در سنگ خواهد شد. تغییر در فشار همه جانبه وارد بر سنگ در آزمایش سه محوری بر نتایج آزمایش و الگوی گسیختگی نمونه تأثیر گذاشته و در زمان تنش های جانبی کم، صفحه شکست نمونه به حالت قائم و در تنش های جانبی بیشتر، صفحه شکست به حالت مایل تغییر کرده و صفحه گسیختگی برشی نامیده می شود [۱]. برای افزایش دقت و کاهش هزینه ها، بسیار مناسب تر است که با استفاده از روش های عددی، آزمایش های مکانیک سنگ را مدل سازی 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 به دست آوریم. یکی از روش های مدل سازی در مکانیک شکست سنگ، روش ذرات متصل به هم^۲ است [۲]. در روش ذرات متصل به هم سنگ به شکل مجموعه ای از ذرات با اتصالات خاص در کنار هم فرض می شود که بهترین روش عددی برای مدل سازی ذرات متصل به هم، روش المان مجزا است [۳]. تحقیقات انجام شده قبلی نشان می دهد که برای اجرای مدل با توصیفات بالا، استفاده از نرم افزار جریان ذرات سه بعدی (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 آزمایش های سه محوری بوده و بر نحوه تأثیر تنش همه جانبه بر الگوی شکست نمونه، توجه زیادی نشده است. هدف این مقاله مطالعه تأثیر فشار همه جانبه وارد بر نمونه ای از سنگ شکننده با 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

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

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.

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

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

ریزخصوصیات ذرات سیمانی: $E_c, \left(\frac{k_n}{k_s}\right), \mu$
 $\bar{\lambda}, \bar{E}_c, \left(\frac{\bar{k}^n}{\bar{k}^s}\right), \bar{\sigma}_c, \bar{\tau}_c$ ریز خصوصیات سیمان
 که 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].

$$\begin{aligned}
 k_n &= \begin{cases} 2tE_c, t=1; & \text{PFC 2D} \\ 4RE_c & \text{PFC 3D} \end{cases} \\
 k_s &= \frac{k_n}{\left(\frac{k_n}{k_s}\right)} \\
 \bar{k}^n &= \frac{\bar{E}_c}{R^{(A)} + R^{(B)}} \\
 \bar{k}^s &= \frac{\bar{k}^n}{\left(\frac{\bar{k}^n}{\bar{k}^s}\right)}
 \end{aligned} \quad (6)$$

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.

$$\begin{aligned}
 \bar{F}_i &= \bar{F}^n n_i + \bar{F}^s t_i \\
 \bar{M}_i &= \bar{M}^n n_i + \bar{M}^s t_i
 \end{aligned} \quad (2)$$

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].

$$\begin{aligned}
 \Delta \bar{F}^n &= \bar{k}^n A \Delta U^n \\
 \Delta \bar{F}^s &= -\bar{k}^s A \Delta U^s \\
 \Delta \bar{M}^s &= -\bar{k}^n J \Delta \theta^n \\
 \Delta \bar{M}^n &= -\bar{k}^s I \Delta \theta^s
 \end{aligned} \quad (3)$$

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

مصالح با PFC^{3D} ارائه می شود.

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

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

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

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

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

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

(۱) پارامترهایی که با استفاده از عدد یک مشخص شده اند به عنوان فرض در نظر گرفته شده (نسبت های 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 مدل سازی با نتایج آزمایشگاهی باید با استفاده از روش های خاصی به نام کالیبراسیون، به این هدف دست یافت. برای انجام این مرحله باید از نتایج آزمایشگاهی و مدل سازی در حالت تک محوری و استفاده از پارامترهای بی بعد زیر بهره برد [۱۰]:

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

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

پارامترهای $E_c, k_n/k_s, \mu$ خصوصیات مکانیکی ذرات را نشان می دهند و ضریب اصطکاک μ ۰/۵ فرض می شود. در راستای آسان سازی روند مدل سازی، 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 دانه ای 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 آن که $k_n = k_n^{(A)} = k_n^{(B)}$ و با رجوع به رابطه (۶)

برای رفتار سیمانی مصالح خواهیم داشت:

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

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

(۷)

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

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

مدول سیمان، به اندازه ذرات وابسته است. برای

به دست 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 به دست 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 مدل سازی در کنار هم آورده شده است. اختلاف بسیار زیادی میان اعداد مدول الاستیسیته ۵۰ درصد آزمایشگاهی و مدول الاستیسیته ۵۰ درصد مدل سازی وجود دارد. وجود نزدیکی مدول اعداد الاستیسیته ۵۰ درصد مدلسازی به یک عدد واحد می تواند نشان دهنده وجود اختلاف در مبانی مدل سازی آزمایش ها با حالت طبیعی سنگ باشد.

در شکل ۹ الگوی شکست نمونه سنگ در مدل سازی آزمایش تک محوری را می بینید. خطوط ارتفاعی روی شکل، برش های قائم محتمل روی نمونه را در حالت گسیختگی قائم یا شکاف (splitting زیر نویس) نشان می دهد. در قسمت (ب) شکل ۹ با اعمال تنش همه جانبه 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 همه جانبه به ۲۵، ۵۰، ۶۰ و ۸۰ مگا پاسکال، به ترتیب، می توان حالت گسیختگی برشی و صفحه محتمل برش را مشاهده کرد.

در شکل ۱۰ اعداد تنش اولیه ترک در تنش های همه جانبه متفاوت در مطالعات گلشنی و همکاران [۱] و اعداد تنش اولیه ترک در مدل سازی حاضر نشان داده شده است.

از تقسیم تعداد ریز ترک های موجود در نمونه بر حجم نمونه، پارامتری به نام چگالی ترک^۱ به دست می آید. در مطالعات آزمایشگاهی در فشار ۸۰ مگاپاسکال، این عدد در ۹۰ درصد تنش بیشینه ی تفاضلی محوری، برابر با 2×10^{-2} بر میلی متر مکعب بوده و این عدد تا شکست نمونه تقریباً ثابت است؛ ولی در مدل سازی این عدد در زمان شکست مدل از نمونه $2/98 \times 10^{-2}$ بر میلی متر مکعب است. به نظر می رسد در نمونه آزمایشگاهی در نزدیکی شکست دیگر

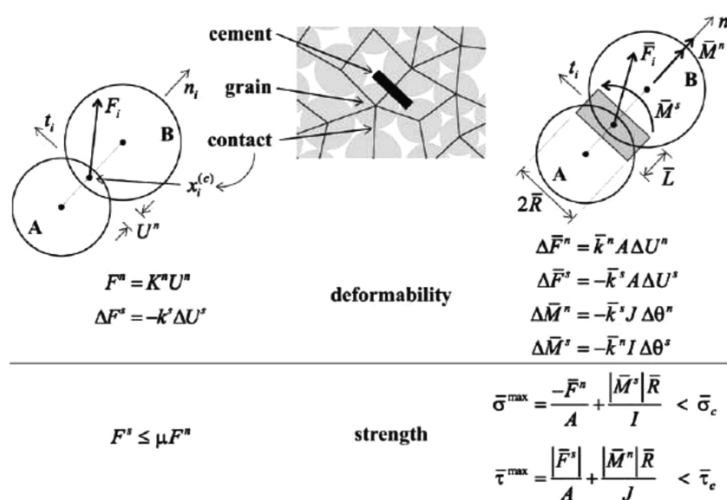
$\bar{\lambda}, \bar{E}_c, k_n/k_s, \bar{\sigma}_c, \bar{\epsilon}_c$ خصوصیات مکانیکی اتصال سیمانی بین ذرات را نشان می دهند. ذرات اندازه یکسانی دارند و اندازه هر دو ذره انتخابی یکسان خواهد بود. با مراجعه به راهنمای برنامه بهترین فرض برای $\bar{\lambda}$ عدد یک است. عدد تنش همسان قفل و بست دانه ای σ_0 با توجه به راهنمای برنامه، ۱ مگاپاسکال فرض می شود. منحنی های کالیبراسیون در شکل های ۳ و ۴ نشان داده شده است. مقداری برای پارامتر $\bar{\sigma}_c/\bar{\epsilon}_c$ انتخاب می کنیم. این نسبت برابر با یک انتخاب می شود. با استفاده از منحنی شکل ۴ و داشتن عدد ضریب پواسون آزمایشگاهی، نسبت $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ بدست می آید. 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 می آید. با استفاده از میزان سختی نرمال سیمان و نسبت $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ ، مقدار سختی برشی سیمان نیز به دست می آید. با داشتن عدد ضریب پواسون برابر با ۰/۲۳ و استفاده از شکل ۳ میزان نسبت $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ به دست می آید. 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، می توان نسبت $\bar{E}_c/\bar{k}_n R$ را به دست آورد.

۵- بحث و نتایج

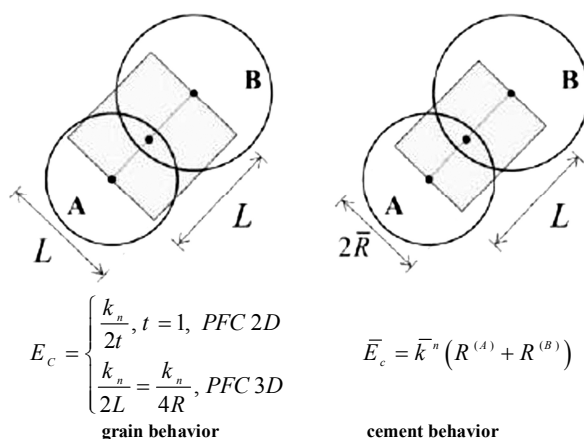
در شکل ۵ منحنی های تنش و کرنش آزمایشگاهی و مدل سازی در تنش جانبی ۸۰ مگاپاسکال نشان داده شده است. در شکل ۶، منحنی میزان تنش های تفاضلی بیشینه محوری آزمایشگاهی و مدل سازی در برابر تنش های جانبی متفاوت رسم شده است.

در شکل ۷ منحنی عدد ضریب پواسون ۵۰ درصد از نتایج آزمایشگاهی و مدل سازی در برابر تنش های جانبی رسم شده است. در شکل ۸ منحنی مدول الاستیسیته ۵۰

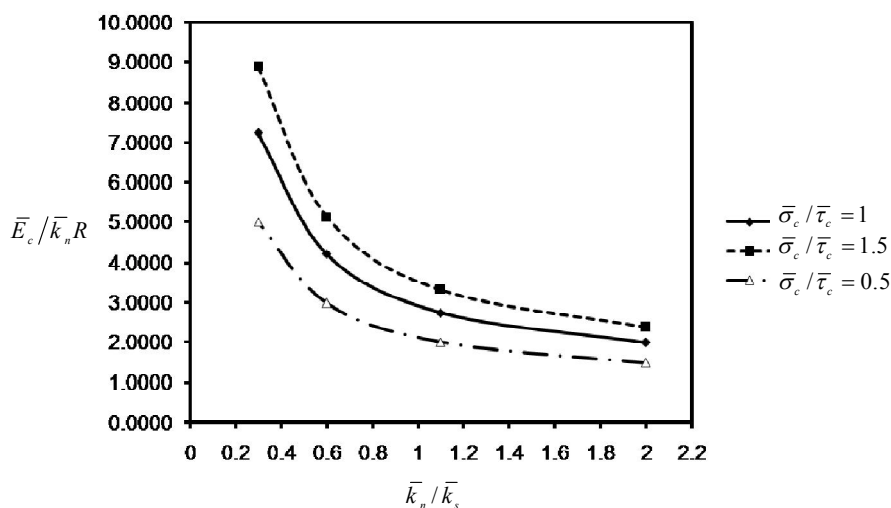
1- Number density of microcracks



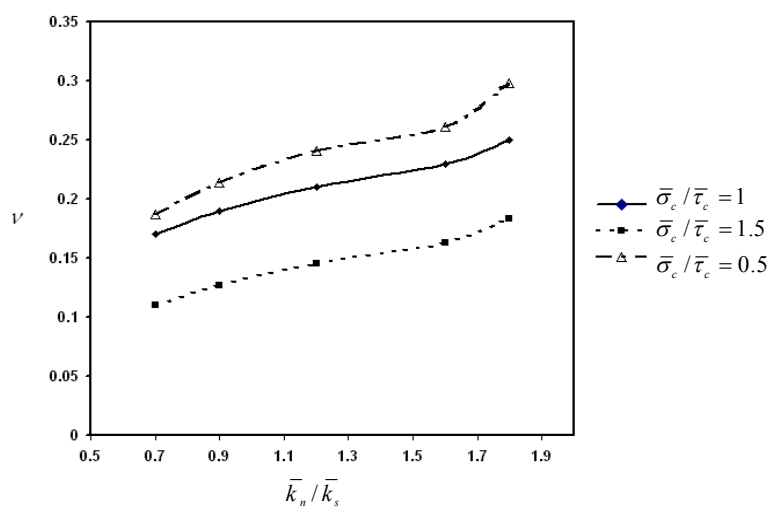
شکل (۱) مدل ذرات متصل به هم [۲]



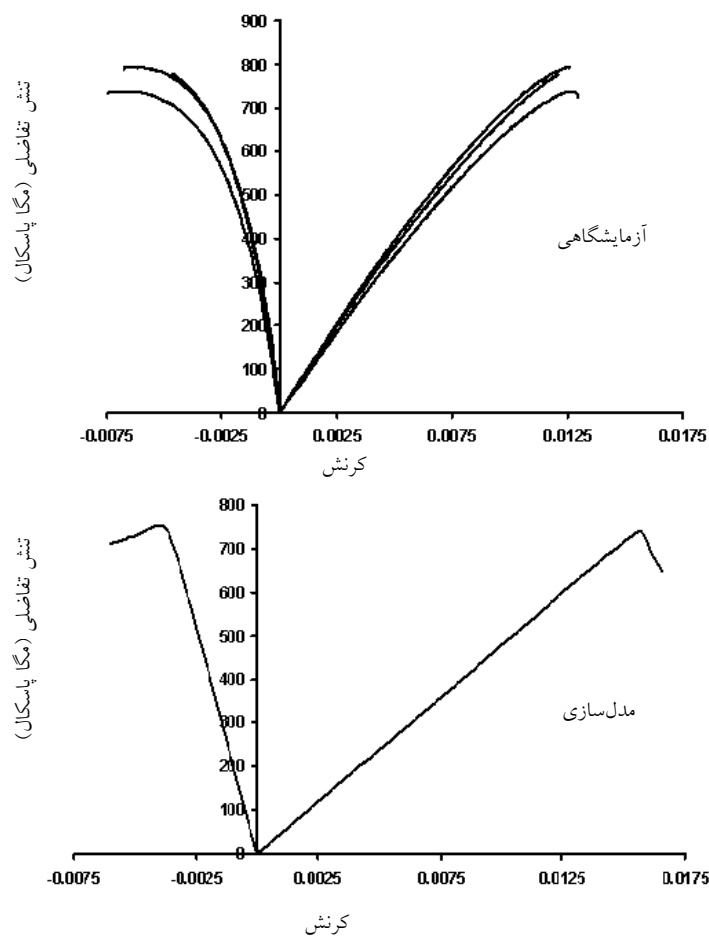
شکل (۲) نحوه مدل سازی مدول الاستیسیته در رفتار دانه ای و سیمانی [۲]



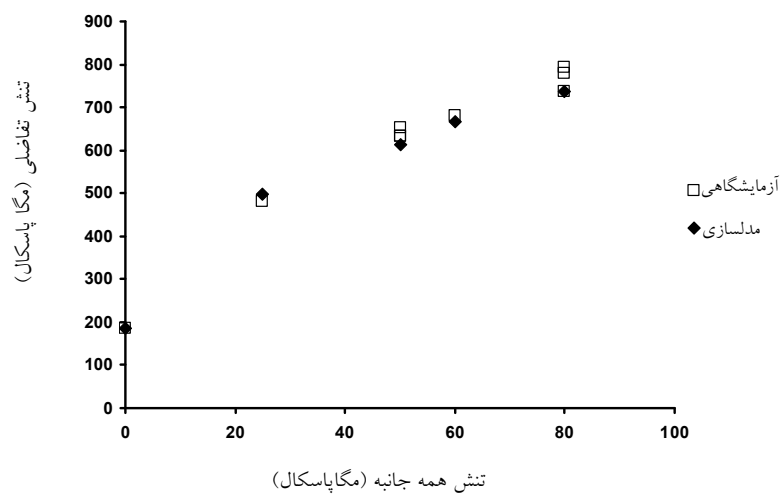
شکل (۳) منحنی کالیبراسیون پارامتر $\bar{E}_c / k_n R$



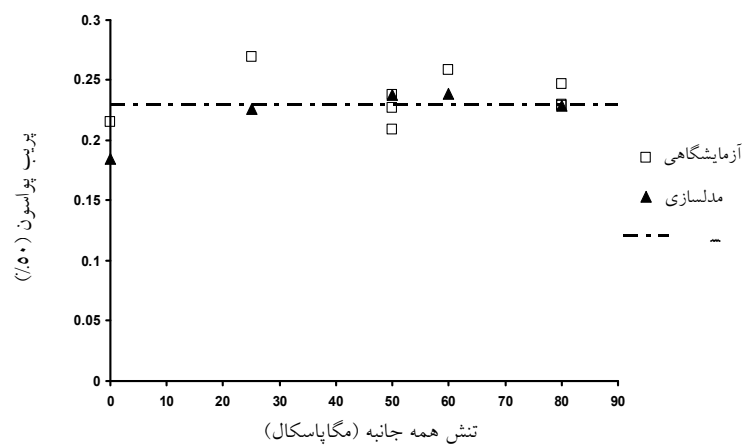
شکل (۴) منحنی کالیبراسیون ضریب پواسون



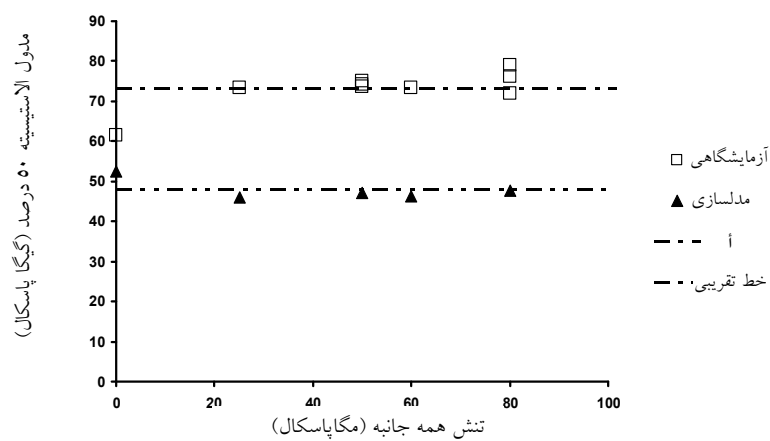
شکل (۵) منحنی تنش و کرنش آزمایشگاهی و مدل سازی در فشار همه جانبه ۸۰ مگاپاسکال [1]



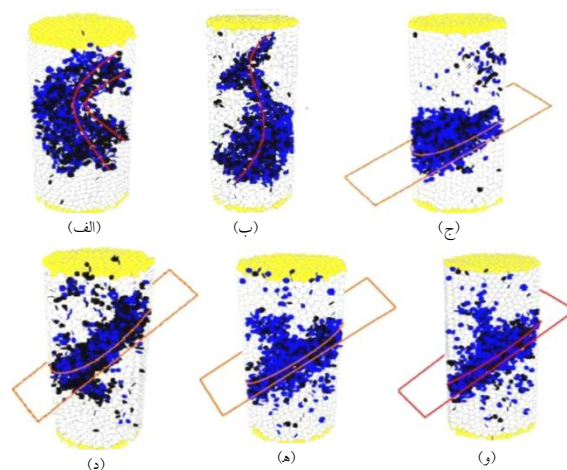
شکل (۶) منحنی تنش‌های تفاضلی بیشینه‌ی محوری آزمایشگاهی و مدلسازی [1]



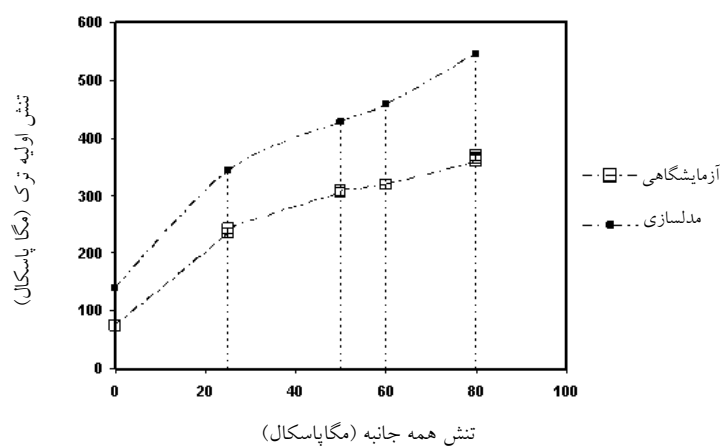
شکل (۷) ضریب پواسون ۵۰ درصد آزمایشگاهی و مدلسازی در برابر تنش همه‌جانبه [1]



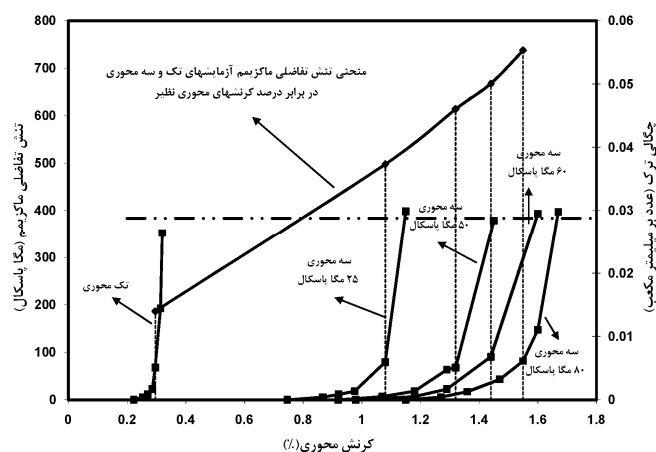
شکل (۸) مدول الاستیسیته ۵۰ درصد آزمایشگاهی و مدلسازی در برابر تنش همه‌جانبه [1]



شکل (۹) تغییر الگوی شکست نمونه در مدل سازی با تغییر فشار همه جانبه



شکل (۱۰) مقایسه تنش اولیه ترک آزمایشگاهی و مدل سازی [۱]



شکل (۱۱) منحنی های عدد چگالی ترک در برابر کرنش محوری برای مدل سازی آزمایش ترک محوری و سه محوری

با فشارهای همه جانبه ۲۵، ۵۰، ۶۰ و ۸۰ مگا پاسکال [۱]

می دهد که عدد چگالی ترک در لحظه شکست تقریباً ثابت است. در مدل سازی به علت در نظر گرفتن ریزترک های اولیه در مدل سنگ، عدد چگالی ترک در ابتدای آزمایش صفر است اما با افزایش تنش محیط شروع به ترک خوردن کرده و این روند در نزدیکی تنش بیشینه محوری تفاضلی افزایشی ناگهانی می یابد. رسم منحنی عدد چگالی ترک برای آزمایش های مختلف نشان می دهد که عدد چگالی ترک در لحظه شکست در بازه ای ثابت قرار می گیرد. رشد عدد چگالی ترک در حوالی شکست، برخلاف نتایج آزمایشگاهی تقریباً عددی ثابت است. در آزمایش تک محوری می توان تجمع ریزترکها برای ایجاد شکست قائم یا شکاف را در مدل به خوبی مشاهده کرد. با افزایش تنش همه جانبه به ۲۵ مگاپاسکال، 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 نحوه شکست برشی در مدل به خوبی دیده شده است.

تغییری در تعداد ریزترکها بوجود نمی آید و به جای آن به هم پیوستگی در راستای شکست نمونه حاکم است؛ ولی در مدل سازی با افزایش تنش در نزدیکی شکست نمونه، تعداد ریزترکها افزایش و به طبع آن عدد چگالی ترک افزایش می یابد. در شکل ۱۱ می بینید که منحنی های چگالی ترک در برابر کرنش محوری شکلی تقریباً یکسان دارند و در نزدیکی تنش بیشینه ی تفاضلی دچار افزایش ناگهانی می شوند. اعداد چگالی ترک در زمان شکست نمونه تقریباً به هم نزدیک است و با رسم خطوط افقی منقطع پررنگ، می توان قرارگیری اعداد انتهایی منحنی ها در بازه ای محدود را به عنوان آستانه گسیختگی کاملاً مشاهده کرد. با توجه به این که در مدل سازی، ریزترکها در نمونه برای ساخت گسیختگی در مدل مانند پدیده طبیعی که در آزمایش مشاهده می شود، به هم نمی پیوندند [تا صفحه شکست نمونه را به وجود بیاورند]، می توان رسیدن به آستانه مذکور را نشانی از شکل گیری گسیختگی در مدل سازی آزمایش بیان کرد.

۶- نتیجه گیری

تنش محوری تفاضلی بیشینه و ضریب پواسون حاصل از مدل سازی تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. در مدول الاستیسیته ۵۰ درصد، نتایج مدل سازی، و آزمایشگاهی دارای اختلافی در حدود ۳۷ درصد است. به نظر می رسد این اختلاف ناشی از در نظر گرفتن ریزترک های 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 می یابد. با رسیدن تنش محوری تفاضلی به ۹۰ درصد، تنش بیشینه به 2×10^{-2} بر میلی متر 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.