

بررسی عددی رفتار هیدرومکانیکی درزه‌های سنگی منفرد تحت بارگذاری برش مستقیم

بهنام قبادی^۱، حمیدرضا نجاتی^{۲*}، کامران گشتاسبی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس

(دریافت: آذر ۱۳۹۴، پذیرش: تیر ۱۳۹۶)

چکیده

نفوذپذیری توده سنگ یکی از مهمترین پارامترهای کنترل کننده پروژه‌های مختلف مهندسی سنگ اعم از مخازن دفن زباله‌های اتمی، پی سدها، فضاها، زیرزمینی همانند تونلها و مغارها، پروژه‌های ژئوترمال و تولید نفت و گاز است. به طور کلی نفوذپذیری توده سنگ متشکل از نفوذپذیری سنگ بکر و ناپیوستگی‌های موجود در آن است اما در حوضه‌های با سنگ میزبان سخت و کریستالی نفوذپذیری سنگ بکر تقریباً ناچیز و قابل اغماض است و کنترل کننده اصلی جریان عبوری از توده سنگ، درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها هستند. در چنین شرایطی، علاوه بر پارامترهای هندسی درزه لازم است تاثیر عواملی همانند جابجایی برشی و تنش نرمال نیز بررسی گردد. در این مقاله با روش عددی المان مجزاء یک کد عددی توسط نرم افزار *UDEC* برای بررسی کوپل هیدرومکانیکی درزه‌های منفرد تحت برش با مدل درزه داری بارتن - باندیس توسعه داده شده است. در کد عددی توسعه داده شده تاثیر پارامترهایی همانند جابجایی برشی، تنش نرمال و سختی درزه بررسی شده است. برای راستی آزمایی مدل عددی نتایج آن با نتایج تجربی بدست آمده توسط السون - بارتن (۲۰۰۱) مقایسه شده است. بررسی‌های انجام شده، نشان می‌دهد که نتایج مدلسازی عددی هماهنگی خوبی با نتایج آزمایشگاهی السون - بارتن (۲۰۰۱) دارد. همچنین تحلیل‌های عددی انجام شده حاکی از آنست که متناسب با افزایش جابجایی برشی، مقدار بازشدگی هیدرولیکی و نرخ جریان افزایش می‌یابد.

کلید واژه‌ها

کوپل هیدرومکانیکی، جابجایی برشی، نفوذپذیری، بارتن - باندیس، روش المان مجزاء

* عهده دار مکاتبات: h.nejati@modares.ac.ir

۱- مقدمه

صحیحی نسبت به پروژه در مراحل اولیه آن به دست آورد و تا حدودی در هزینه و زمان صرفه‌جویی نمود.

۲- رفتار درزه‌های سنگی منفرد تحت تنش برشی و نرمال

رفتار برشی درزه‌های سنگی معمولاً به‌وسیله آزمایش‌های بار نرمال ثابت CNL ، سختی نرمال ثابت CNS و بار دینامیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بعضی موارد بار نرمال فعال بر روی صفحه درزه در طی پروسه برش همانند یک بلوک قرار گرفته بر روی شیروانی‌های بدون نگهداری ثابت باقی می‌ماند که در این مورد شرایط درزه‌ها CNL تلقی می‌شوند درحالی‌که در مواردی دیگر همانند سازه‌های زیرزمینی عمیق درزه‌ها در طی برش با محدودیت جابجایی جانبی روبرو می‌باشند و مقاومت برشی درزه‌های سنگی به‌وسیله سختی نرمال ثابت کنترل می‌شود.

بنابراین بسته به شرایط واقعی مسئله مقاومت برشی درزه‌های سنگی باید تحت شرایط CNL و CNS مورد بررسی قرار گیرد. با هر کدام از آزمایش‌های مذکور تاکنون معیارهای متفاوتی برای تعیین مقاومت برشی سنگ ارائه شده است. یکی از پرکاربردترین معیارها، روابط تجربی توسعه داده شده به‌وسیله بارتن و باندیس برای توصیف تأثیر زبری سطح بر روی تغییر شکل و مقاومت درزه‌ها است. این روابط در مجموع به عنوان مدل بارتن-باندیس^۵ شناخته شده است. مدل بارتن-باندیس به خوبی قادر است که مقدار تغییر شکل‌های نرمال و برشی را محاسبه کند. این مدل از روابط تنش — بازشدگی بر مبنای پارامترهای مقاومت (JCS) و ضریب زبری (JRC) سطح درزه استفاده می‌کند [۱۳-۱۴].

به طور خلاصه معادلات (۱) تا (۷) رفتار درزه‌های سنگی منفرد تحت برش را ارائه می‌نمایند. رابطه (۱) ارتباط بین بازشدگی هیدرولیکی ($b_{hydraulic}$) و بازشدگی مکانیکی (b_{mech}) را نشان می‌دهد [۷].

$$b_{hydraulic} [\mu m] = \frac{(b_{mech} [\mu m])^2}{JRC^{2.5}} \quad (1)$$

$$b_{mech} = D_{n,n} + D_{n,s} + D_{n,0}$$

همان‌طور که در رابطه (۱) نشان داده شده است، بازشدگی مکانیکی وابسته به بازشدگی اولیه ($D_{n,0}$)، تغییرات بازشدگی ناشی از تنش نرمال ($D_{n,n}$) و تنش

مطابق با قانون دارسی نفوذپذیری^۱ سنگ ظرفیت توده سنگ برای انتقال سیال یا سرعت انتقال سیال در سنگ است. به علت حضور ناپیوستگی‌ها در توده سنگ، سهم عمده نفوذپذیری توده سنگ مربوط به نفوذپذیری ناپیوستگی‌ها در توده سنگ است [۱]. در حوضه‌های با سنگ میزبان سخت و کریستالی نفوذپذیری سنگ بکر تقریباً ناچیز و قابل اغماض است و کنترل کننده اصلی جریان سیال، درزه‌ها هستند. در این سنگ‌ها علاوه بر پارامترهای هندسی خود درزه لازم است تأثیر پارامترهایی همانند جابجایی برشی و وضعیت تنش نیز در نظر گرفته شود. بنابراین محاسبه تأثیر جابجایی برشی درزه‌های سنگی بر میزان جریان سیال در بسیاری از حوضه‌های مهندسی مکانیک سنگ نظیر شیل‌ها در مخازن نفتی، فضا‌های زیرزمینی حفر شده برای دفن زباله‌های اتمی، حوضه‌های تایت گازی، مخازن ژئوترمال دارای سنگ میزبان سخت و ... از اهمیت زیادی برخوردار است [۲-۴].

برای بررسی کوپل هیدرومکانیکی درزه‌های تحت برش، کارهای تحقیقاتی متنوعی تحت شرایط تنش نرمال ثابت CNL ، سختی نرمال ثابت CNS ، جابجایی نرمال ثابت و حجم ثابت^۴ هم به‌صورت عددی و هم به‌صورت آزمایشگاهی ارائه شده است. آزمایش تنش نرمال - جریان سیال بر روی درزه‌های سنگی از سال ۱۹۷۰ به بعد توسط کویاما به طور خلاصه مورد بررسی قرار گرفته است [۵]. بعد از دهه ۱۹۸۰، تعداد زیادی آزمایش کوپل تنش برشی-جریان تحت شرایط تنش نرمال ثابت CNL انجام گرفته است و به‌وسیله افراد مختلفی گزارش شده است [۶-۱۰]. همچنین در دهه‌های اخیر آزمایش کوپل تنش برشی-جریان تحت شرایط جابجایی نرمال ثابت/حجم ثابت و سختی نرمال ثابت توسط افراد متفاوتی ارائه شده است [۲، ۳، ۱۱، ۱۲]. بررسی رفتار هیدرومکانیکی درزه‌های سنگی تحت برش در آزمایشگاه نیازمند تجهیزات ویژه‌ای شامل واحد اعمال کننده بار نرمال، بار برشی و فشار سیال، تجهیزات آب‌بندی نمونه، واحد جمع‌آوری داده‌ها و ... است و تقریباً نیازمند یک پروسه زمانی طولانی و پرهزینه است. چنانچه بتوان به‌وسیله روش‌های عددی مدل‌سازی صحیح و درستی از شرایط حاکم بر مسئله را طراحی نمود می‌توان دید

حوضه جریان حالت پایا به موجب حرکت از یک مکان به مکان دیگر با سرعت متفاوت داشته باشند) است. همچنین جملات سمت راست معادله مذکور به ترتیب بیانگر نیروی حجمی بکار رفته، گرادیان فشار و نیروهای ویسکوزیته هستند. در حالت جریان پایا، روابط ناویر-استوکس می‌توانند به صورت زیر خلاصه شوند.

$$\mu \nabla^2 u - \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla p \quad (9)$$

رابطه (۹) برای سه مؤلفه مجهول سرعت و یک مؤلفه فشار سه معادله را ارائه می‌نماید. رابطه چهارم بر اساس اصل بقای جرم فراهم می‌شود که برای سیالات تراکم‌ناپذیر معادله پایستگی حجم است و به فرم زیر بیان می‌شود.

$$\text{div} u = \nabla \cdot u = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (10)$$

ساده‌ترین مدل مفهومی از یک شکستگی برای اهداف هیدرولوژیکی، این است که از دو صفحه صاف، موازی و دارای بازشدگی یکنواخت h استفاده شود. برای این هندسه، روابط ناویر-استوکس را می‌توان به منظور دستیابی به پروفیل سرعت که بین دو دیواره سهمی شکل است، به طور دقیق حل نمود. اگر محور x در جهت گرادیان فشار باشد، محور y شامل عمود بر گرادیان فشار در داخل صفحه شکستگی است و محور z عمود بر صفحه شکست است که دیواره درزه در $z = \pm \frac{h}{2}$ قرار داده شده است.

راه حل زیر روشی برای حل روابط (۸ و ۹) است [۱۵].

$$u_x = -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \left[\left(\frac{h}{2} \right)^2 - z^2 \right], u_y = 0, u_z = 0 \quad (11)$$

با یکپارچه‌سازی شار حجمی کلی $\left(\frac{m^3}{s} \right)$ با کمیت سرعت، رابطه زیر تحت عنوان قانون مکعبی به دست می‌آید.

$$Q_x = W \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} u_x dz = -\frac{w}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \left[\left(\frac{h}{2} \right)^2 - z^2 \right] dz \quad (12)$$

$$= -\frac{wh^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x}$$

w پهنای درزه در جهت y (عمود بر گرادیان فشار) است. با محاسبه میزان شار حجمی کلی از رابطه (۱۲)، برای قابلیت گذردهی^۷ سیال رابطه (۱۳) حاصل خواهد شد.

$$T = \frac{Q}{Wi} \quad (13)$$

برشی $(D_{n,s})$ است. برای محاسبه $D_{n,0}$ از رابطه (۲) استفاده شده است. علاوه بر این تغییرات هیپربولیک $D_{n,n}$ برحسب تنش نرمال مؤثر $(\sigma_{n,eff})$ در رابطه (۳) نشان داده شده است. در رابطه (۳) D_{max} بیشینه بسته شدگی و K_{ni} سختی نرمال است. تغییر در مقدار زاویه اتساع برشی $(d_{n,s}^0)$ با استفاده از رابطه (۴) اندازه‌گیری می‌شود [۱۳-۱۴]. $d_{n,s}^0$ در ارتباط با ضریب زبری متحرک (JRC_{mob}) است که تابعی از جابجایی برشی (D_s) همانند رابطه (۵) است. ارتباط ضریب زبری متحرک (JRC_{mob}) به ضریب زبری نهایی (JRC_{peak}) نسبت به جابجایی برشی (D_s) بر جابجایی برشی حداکثر $(D_{s,peak})$ می‌تواند با توجه به جدول‌های استاندارد همانند جدول‌های ارائه شده به وسیله بارتن و همکاران به دست آید. بر مبنای معادله (۶)، $D_{n,s}$ مقداری برابر با تانژانت $d_{n,s}^0$ را دارد [۷].

$$D_{n,0} = \frac{JRC}{5} [0.2 \frac{\sigma_c}{JCS} - 0.1] \quad (2)$$

$$D_{n,n} = \frac{D_{max} \sigma_{n,eff}}{K_{ni} D_{max} + \sigma_{n,eff}} \quad (3)$$

$$d_{n,s}^0 = \frac{1}{2} JRC_{mob} \log \left(\frac{JCS}{\sigma_{n,eff}} \right) \quad (4)$$

$$\frac{JRC_{mob}}{JRC_{peak}} = f \left(\frac{D_s}{D_{s,peak}} \right) \quad (5)$$

$$D_{n,s} = \tan(d_{n,s}^0) \quad (6)$$

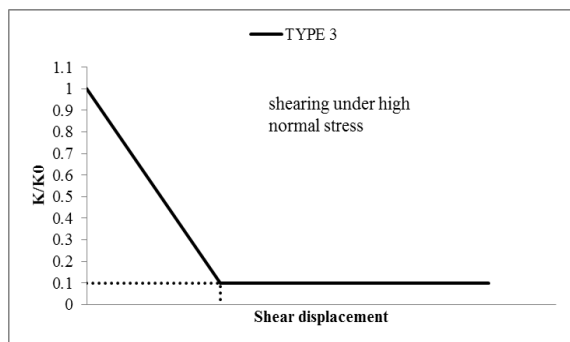
$$\tau = \sigma_{n0} \tan(\phi_b + JRC \log \left(\frac{JCS}{\sigma_{no}} \right)) \quad (7)$$

۳- تئوری جریان سیال در درزه‌های سنگی منفرد

جریان سیال در درزه‌های سنگی منفرد به وسیله روابط ناویر-استوکس^۶ کنترل می‌شود. در واقع فرم کلی روابط آن می‌تواند به صورت زیر نوشته شود [۱۵].

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = F - \frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{u}{\rho} \nabla^2 u \quad (8)$$

که در آن $u = (u_x, u_z)$ بردار سرعت، F بردار نیروی حجمی در واحد جرم، ρ دانسیته، μ ویسکوزیته و P فشار سیال است. روابط ناویر-استوکس دربردارنده اصول بقاء مومنتوم خطی همراه با یک رابطه ساختاری خطی بین تانسور تنش با نرخ تغییر شکل هستند. در سمت چپ رابطه (۸)، قسمت اول بیانگر شتاب ذرات سیال و قسمت دوم نمایانگر شتاب افقی (شتابی که ذرات ممکن است حتی در



شکل ۱: بررسی رفتار سنگ در تنش نرمال و جابجایی برشی [۱۶]

۵-۵- مدل‌سازی عددی

در سالیان اخیر کوپل هیدرومکانیکی درزه‌های سنگی تحت برش به وسیله روش‌های عددی بسیار مورد توجه قرار گرفته است، یکی از این روش‌ها روش عددی المان مجزا است. روش عددی المان مجزا برای تحلیل محیط‌های ناپیوسته توسعه یافته است در این روش مجموعه‌ای از بلوک‌های سنگی که با درزه‌ها محدود شده‌اند، تشکیل می‌شود و امکان شبیه‌سازی روابط پیچیده برای برش، جدایش و چرخش بلوک‌ها را فراهم می‌آورد. محاسبات *UDEC* بر اساس قانون دوم حرکت نیوتون، بقای جرم و اصول مومنتم و انرژی بنا نهاده شده است. بلوک‌ها می‌توانند صلب و یا تغییر شکل‌پذیر باشند. از نظر هیدرولیکی بلوک‌ها نفوذ ناپذیرند و جریان فقط از درون درزه‌ها عبور می‌کند.

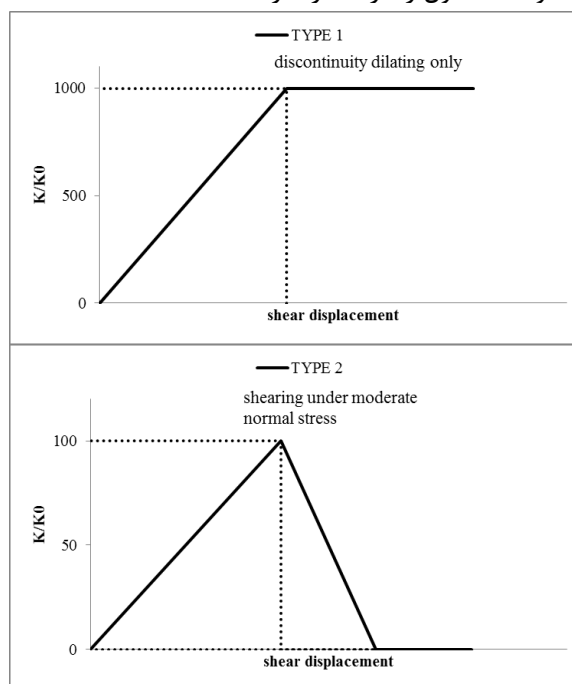
در این تحقیق از روش عددی المان مجزا در قالب برنامه *UDEC* برای شبیه‌سازی جریان استفاده شده است. این نرم‌افزار مجهز به یک زبان برنامه‌نویسی تعبیه شده (*FISH*) است که قابلیت‌های گسترده‌ای را برای کاربران فراهم می‌نماید. همچنین نرم‌افزار *UDEC* قابلیت تحلیل کوپل کامل هیدرومکانیکی را داراست که در آن هدایت هیدرولیکی شکستگی به تغییر شکل مکانیکی وابسته است و برعکس فشار آب حفره‌ای درزه رفتار مکانیکی درزه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در نرم‌افزار *UDEC* درزه به صورت دو صفحه موازی با بازشدگی ثابت (تماس لبه به لبه) شبیه‌سازی می‌شود و جریان در اثر اختلاف فشار بین نواحی مجاور ایجاد می‌شود. در این روش نرخ جریان از یک ناحیه با فشار P_1 به یک ناحیه با فشار P_2 و با استفاده از رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود.

$$q = -K_j a^3 \frac{\Delta p}{L} \quad (13)$$

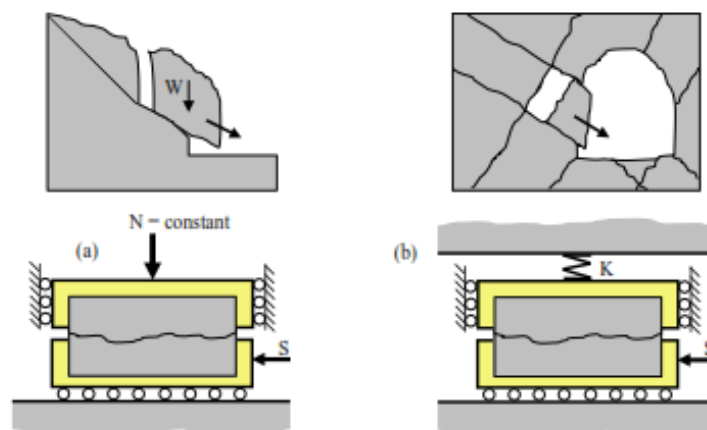
در رابطه (۱۳)، i نمایانگر گرادیان هیدرولیکی سیال است.

۴-۴- نفوذپذیری متأثر از جابجایی برشی و تنش نرمال

برای نفوذپذیری مرتبط با جابجایی برشی، درزه‌های سنگی ممکن است مطابق شکل (۳) سه نوع رفتار از خود بروز دهند [۱۶]. در حقیقت این سه نوع رفتار مرتبط با تنش عمل کننده بر روی صفحه‌ی درزه به صورت زیر هستند: ۱- درزه فقط اتساع داشته باشد بدون اینکه به هندسه سطح درزه آسیبی برسد، در مقادیر پائین جابجایی برشی مقدار نفوذپذیری درزه به شدت دچار افزایش و نهایتاً پس از آن به یک مقدار ثابت می‌رسد. ۲- ناپیوستگی تحت تنش نرمال متوسط باشد و به دلیل برش دچار اتساع شود، در این حالت ابتدا مقدار نفوذپذیری به میزان بالایی افزایش می‌یابد سپس با افزایش جابجایی برشی مواد گوج در درزه‌ها تولید شده که به تدریج باعث پر شدن بازشدگی درزه‌ها و مانعی برای نفوذ جریان می‌شوند. ۳- چنانچه ناپیوستگی در مقادیر تنش نرمال بسیار بالا برش داده شود از همان ابتدا مواد گوج تولید و مسیر نفوذ جریان مسدود خواهد شد. کد *UDEC*^۸ توسعه داده شده فقط توانایی مدل‌سازی رفتار نوع (۱) و قسمت اول رفتار (۲) را داراست.



محور Y قرار گرفته سپس همانند شکل (۲) یک سرعت افقی به پائین مدل اعمال شده است و نتایج تحلیل‌های مکانیکی و هیدرومکانیکی با اعمال تعداد مشخصی سیکل تا جابجایی برشی ۲۰ میلی‌متر ثبت شده است. در سمت راست مدل فشار ثابت سیال به میزان ۴ متر موازی و همراستا با جهت برش اعمال گردیده است. میزان دبی سیال در جابجایی‌های برشی مختلف ثبت شده است. جدول‌های (۱) و (۲) به ترتیب خواص مکانیکی سنگ، پارامترهای اولیه آزمایش و پارامترهای استفاده شده در مدلسازی را نشان می‌دهند. در مدلسازی از چهار نمونه S_1 ، S_2 ، S_3 و S_4 استفاده شده است. نمونه S_1 تحت شرایط CNL و سه نمونه دیگر دارای شرایط CNS هستند. خواص مکانیکی هر چهار نمونه مطابق با جدول (۱) یکسان است و تنها تفاوت آنها در پارامترهای اولیه استفاده شده همانند تنش نرمال اولیه و سختی درزه است. در روند مدلسازی فرض شده است که بلوک‌های سنگی بین درزه‌ها دارای رفتاری الاستیک و مدل درزه‌ها بارتن-باندیس است.



شکل ۲: رفتار برشی درزه‌ها تحت شرایط CNS و CNL [۱۷].

آمده حاکی از آن است که مدل عددی توسعه داده شده تطابق خوبی با کار آزمایشگاهی السون و بارتن دارد.

۶- بحث و بررسی

برش درزه تحت شرایط مرزی مختلف روی می‌دهد. در حالت اول، همانند برش در سطوح شیب‌دار اتساع آزادانه ناپیوستگی موجب بالا آمدن بلوک لغزشی شده و مقدار تنش نرمال اعمالی بر سطح لغزش ثابت است.

در این رابطه، K_j ضریب نفوذپذیری درزه و به‌طور نظری برابر $\frac{1}{12\mu}$ است (μ ویسکوزیته دینامیکی سیال است)، a بازشدگی هیدرولیکی تماس، Δp اختلاف فشار و L طول تماس است که به‌صورت نصف فاصله به نزدیک‌ترین تماس در سمت راست بعلاوه نصف فاصله به نزدیک‌ترین تماس در سمت چپ تعریف می‌شود.

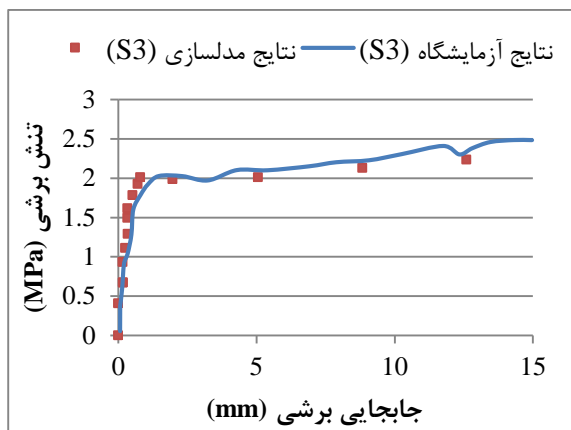
۵-۱- هندسه مدل و شرایط مرزی

برای بررسی رفتار هیدرومکانیکی سنگ تحت برش از مدل‌های مفهومی ارائه شده مطابق شکل (۲) برای آزمایش‌های CNS و CNL استفاده شده است. شکل (۳) مدل توسعه داده شده در نرم‌افزار $UDEC$ را برای شبیه‌سازی رفتار برشی توده سنگ درزه‌دار تحت شرایط بارگذاری CNS نشان می‌دهد.

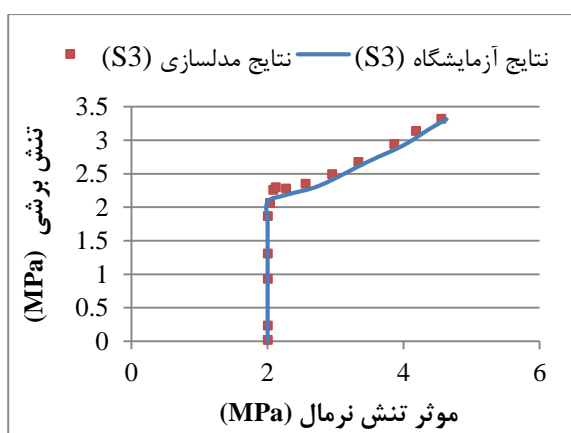
برای شبیه‌سازی آزمایش‌های CNS و CNL از ابعاد یکسانی استفاده شده است. بدین منظور بلوکی با ابعاد استاندارد $40\text{ cm} \times 35\text{ cm}$ برای برش در نظر گرفته شده است. ابتدا مدل تحت بارهای نرمال متفاوت در راستای

۵-۲- راستی آزمایشی مدل عددی

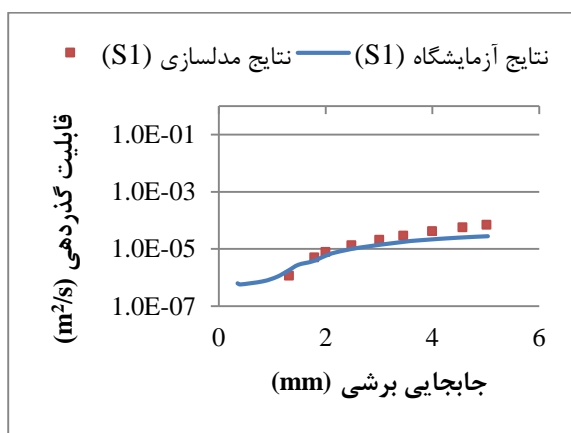
برای هر مدل عددی اولین مرحله صحت‌سنجی نتایج مدل با داده‌های واقعی است. بدین منظور نمودارهای تنش برشی و قابلیت‌گذردگی سیال برحسب جابجایی برشی (شکل‌های ۴ و ۶) و تنش برشی برحسب تنش نرمال (شکل ۵) انتخاب شده و نتایج آن با نتایج به دست آمده توسط السون و بارتن (۲۰۰۱) مقایسه گردیده است. نتایج به دست



شکل ۴: تنش برشی بر حسب جابجایی برشی

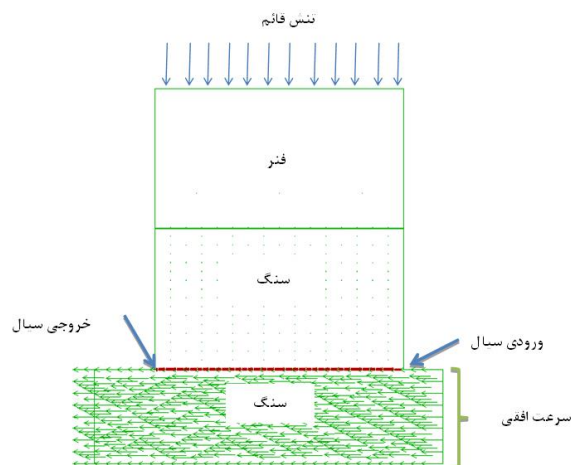


شکل ۵: تنش برشی بر حسب تنش نرمال مؤثر



شکل ۶: میزان قابلیت گذردهی سیال بر حسب جابجایی برشی

در آزمایشگاه این شرایط توسط ثابت نگه داشتن بار نرمال در طول آزمایش برش شبیه‌سازی می‌شود (شرایط بار نرمال ثابت CNL). در حالت دوم، بلوک لغزشی در توده سنگ محصور بوده و نمی‌تواند به‌صورت آزادانه اتساع نماید. این حالت در مورد درزه‌های اطراف تونل و بلوک‌های قرار گرفته بر روی سطوح شیب‌دار نگهداری شده صادق است. در این حالت به علت سختی سنگ اطراف، برش سنگ



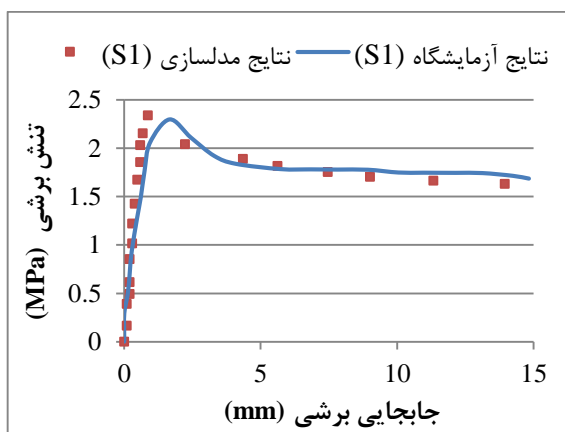
شکل ۳: شماتیک مدل ساخته شده برای آزمایش CNS

جدول ۱: خواص مواد بلوک سنگی [۱۱]

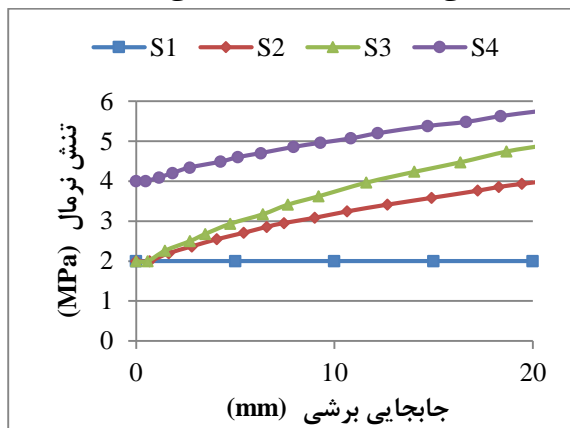
خواص فیزیکی و مکانیکی	شاخص	واحد	مقدار
دانشسته	ρ	$\frac{gr}{cm^3}$	۲/۷۶۰
مقاومت فشاری	σ_c	MPa	۱۶۹±۵
مدول الاستیسیته	E	GPa	۵۹±۳
نسبت پواسون	ν	-	۰/۲۵
مقاومت کششی	σ_t	MPa	۱۳/۶±۲

جدول ۲: خواص مواد درزه‌ها [۱۱]

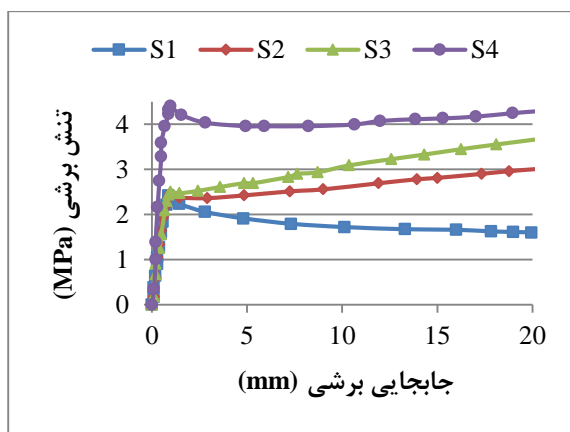
مشخصات نمونه	S_1	S_2	S_3	S_4
تنش نرمال (MPa)	۲	۲	۲	۴
سختی نرمال (MPa/m)	۰	۳۷۰۰	۷۵۰۰	۳۷۰۰
ضریب زبری درزه (JRC)	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
زاویه اصطکاک درزه (درجه)	۳۱	۳۱	۳۱	۳۱



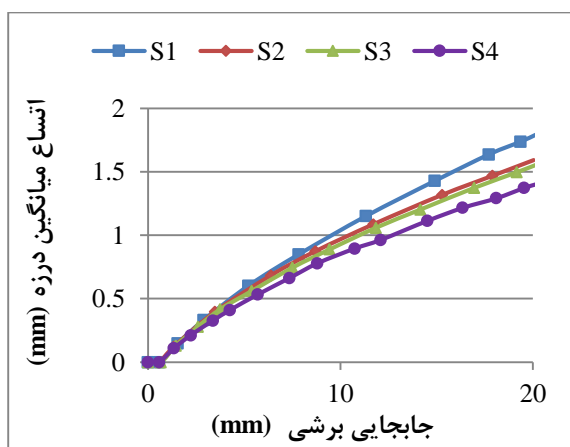
بیشترین مقدار را داراست و در آزمایش *CNS* با افزایش تنش و سختی درزه از میزان آن کاسته می‌شود (شکل ۹).



شکل ۷: تنش نرمال برحسب جابجایی برشی



شکل ۸: تنش برشی برحسب جابجایی برشی



شکل ۹: اتساع میانگین درزه بر حسب جابجایی برشی

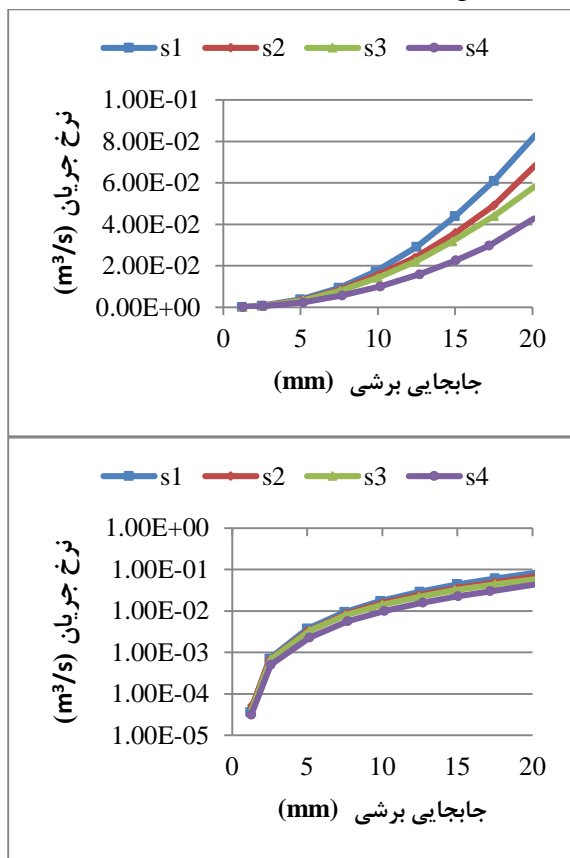
برای بررسی کوپل هیدرومکانیکی درزه‌های سنگی در طی برش نمودارهای بازشدگی هیدرولیکی (شکل ۱۰) و نرخ جریان (شکل ۱۱) برحسب جابجایی برشی ترسیم شده است. با افزایش جابجایی برشی درزه چهار اتساع می‌شود و

همراه با افزایش تنش نرمال بر آن خواهد بود (شکل ۷). شرایط آزمایشگاهی در این حالت با استفاده از سختی فشر در صفحه درزه شبیه‌سازی می‌شود (شرایط درزه *CNS*). در این تحقیق مدل‌سازی کوپل هیدرومکانیکی درزه‌های سنگی به‌وسیله آزمایش‌های *CNL* و *CNS* تحت جابجایی‌های برشی کوچک به‌وسیله نرم‌افزار *UDEC* انجام شده است. برای بررسی رفتار مکانیکی درزه‌های سنگی در طی برش نمودارهای تنش نرمال، تنش برشی و اتساع میانگین برحسب جابجایی برشی رسم گردیده است (شکل‌های ۷-۹). برخلاف آزمایش‌های *CNS* تنش برشی اوج در آزمایش‌های انجام شده تحت شرایط مرزی *CNL* دارای یک مقدار مشخصی است. چنانچه نمودار تنش برشی برحسب جابجایی برشی به دو قسمت مجزا تنش برشی اوج و تنش برشی باقیمانده تفکیک شود، مشاهده می‌شود که تنش برشی اوج با افزایش تنش نرمال اولیه افزایش می‌یابد و تنش برشی باقیمانده با افزایش سختی نرمال افزایش می‌یابد. در طی آزمایش *CNL* تنش برشی یک افزایش خطی را برای رسیدن به مقاومت برشی حداکثر نشان می‌دهد سپس مقدار تنش برشی کاهش پیدا می‌کند تا در نهایت به مقدار باقیمانده خود می‌رسد. تنش برشی در آزمایش *CNS* نیز یک مسیر خطی را قبل از تنش برشی اوج طی می‌کند اما پس از آن مقاومت برشی باقیمانده دارای مقداری بزرگ‌تر از آزمایش *CNL* هست (شکل ۸). شیب قسمت خطی نمودار تنش برشی-جابجایی برشی در آزمایش‌های *CNL* و *CNS* نمایانگر سختی برشی درزه است. در طی برش سنگ جابجایی درزه دارای دو مؤلفه جابجایی برشی و جابجایی عمودی است. جابجایی موازی با سطح درزه جابجایی برشی نامیده می‌شود که مقدار آن با اعمال یک سرعت برشی در تعداد مشخصی سیکل به مدل محقق شده است. جابجایی عمودی یا اتساع میانگین درزه نمایانگر متوسط میزان بازشدگی درزه در راستای عمود بر صفحه آن است، در مطالعه پیش رو این پارامتر وابسته به تنش نرمال اولیه فعال بر روی سطح درزه و سختی درزه است. به هر میزان یک درزه دارای سختی پایین‌تری باشد و تنش نرمال کمتری به سطح آن وارد شود، بیشتر دچار اتساع می‌شود. از آنجایی که بلوک سنگی تحت برش در آزمایش *CNL* در هنگام اتساع با محدودیت جابجایی جانبی روبرو نیست در نتیجه اتساع میانگین درزه در این حالت

برشی، هد سیال و بازشدگی درزه و کاهش متغیرهای تنش نرمال، سختی درزه و ویسکوزیته سیال باعث افزایش نرخ جریان می‌شوند. نمودارهای حساسیت نرخ جریان نسبت به پارامترهای ضریب زبری درزه (JRC)، هد سیال (h)، طول درزه (l) و ویسکوزیته سیال (μ) به ترتیب در شکل‌های (۱۲) تا (۱۵) ترسیم شده است. در قانون مکعبی نرخ جریان رابطه مستقیمی را با پارامترهای گرادیان

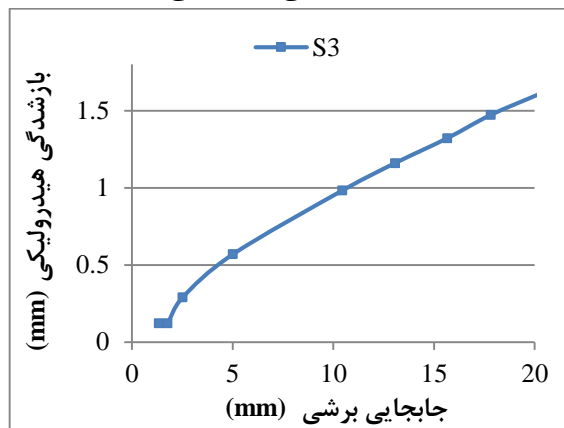
$$i = \frac{h}{l}$$

هیدرولیکی (i) و توان سوم پارامتر بازشدگی هیدرولیکی دارا است و با ویسکوزیته سیال نسبت عکس دارد. مطابق با روابط ارائه شده در قسمت (۲) میزان بازشدگی یک درزه از مجموع پارامترهای بازشدگی اولیه، بازشدگی ناشی از تنش نرمال و بازشدگی ناشی از تنش برشی حاصل می‌شود. همان‌طور که در رابطه‌های (۲ و ۶) مشاهده می‌شود، بازشدگی اولیه و بازشدگی ناشی از تنش برشی در ارتباط مستقیم با ضریب زبری درزه هستند. یعنی هرچه مقدار ضریب زبری یک درزه بزرگ‌تر باشد می‌توان بازشدگی بالاتر و در نتیجه نرخ جریان بیشتری را انتظار داشت (شکل ۱۲).



شکل ۱۱: جابجایی برشی بر حسب نرخ جریان

میزان بازشدگی مکانیکی- هیدرولیکی و به تبع آن نرخ جریان متناسب با قانون مکعبی افزایش می‌یابد.



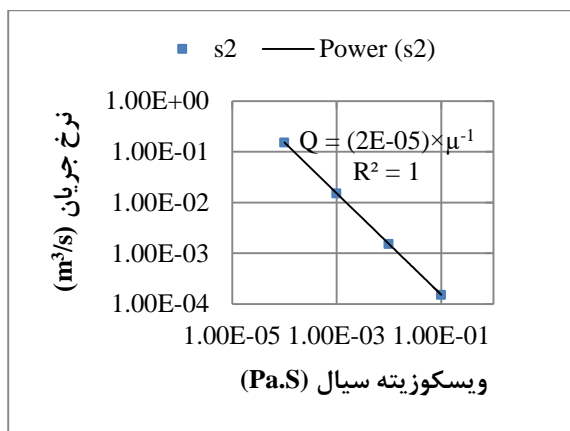
شکل ۱۰: بازشدگی هیدرولیکی بر حسب جابجایی برشی برای نمونه S_3

در شکل (۱۱) برای نمایش واضح‌تر تفاوت بین نرخ جریان نمونه‌های مختلف محور عمودی به دو صورت لگاریتمی و غیر لگاریتمی نمایش داده شده است. همان‌طور که با توجه به این شکل مشخص است نمونه‌های S_1 و S_4 به ترتیب دارای بیشترین و کمترین نرخ جریان می‌باشند. با توجه به شکل (۱۱) مشاهده می‌شود که بیشترین افزایش در مقدار نرخ جریان در ۷ میلی‌متر جابجایی برشی اولیه اتفاق می‌افتد و برای جابجایی‌های برشی بعد از ۷ میلی‌متر شیب افزایش تغییرات مقدار جریان کندتر می‌شود. با فرض این که مقدار نفوذپذیری یک درزه از رابطه $\frac{e^2}{12}$ به دست می‌آید، با افزایش جابجایی برشی به میزان ۲۰ میلی‌متر در هر ۴ نمونه مقدار نفوذپذیری درزه حدود ۶ تا ۷ برابر مقدار اولیه خود افزایش پیدا می‌کند.

۷- تحلیل حساسیت

آنالیز حساسیت پارامترها یک روش مناسب جهت تعیین میزان تأثیر هر کدام از پارامترها بر روی نتایج است. در این تحقیق ۸ پارامتر تأثیرگذار بر روی نرخ جریان شامل ضریب زبری درزه، تنش نرمال، جابجایی برشی، سختی درزه، میزان هد و ویسکوزیته سیال، طول درزه و میزان بازشدگی درزه معرفی شدند. از میان پارامترهای مذکور، تغییر در پارامترهای جابجایی برشی، بازشدگی و ویسکوزیته سیال بیشترین تأثیر را بر روی نتایج خواهند گذاشت. به‌طور کلی افزایش متغیرهای ضریب زبری درزه، جابجایی

BB- UDEC انجام شد و نتایج آن با نتایجی که توسط السون و بارتن ارائه شده بود، مقایسه گردید.



شکل ۱۵: ویسکوزیته سیال برحسب نرخ جریان در جابجایی برشی ۱۰ میلی‌متر

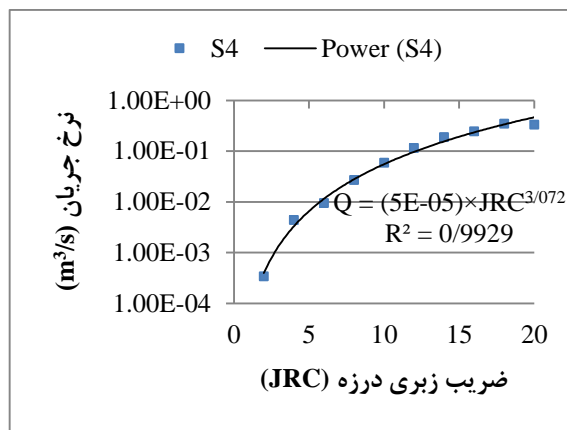
(۱) نتایج آزمایش کوپل برش- جریان نشان می‌دهد که مقدار میانگین اتساع درزه در طول برش دچار افزایش می‌شود و به تبع از آن بازشدگی هیدرولیکی (*e*) و مکانیکی (*E*) و مقدار نرخ جریان (*Q*) افزایش پیدا می‌کند.

(۲) میزان اتساع و بازشدگی در نمونه تحت شرایط مرزی *CNL* به نسبت سه نمونه دیگر بیشتر است در نتیجه دارای نرخ جریان بالاتری هست. برای نمونه‌های تحت شرایط مرزی آزمایش *CNS* نرخ جریان با افزایش تنش نرمال اولیه و افزایش سختی درزه دچار کاهش خواهد شد.

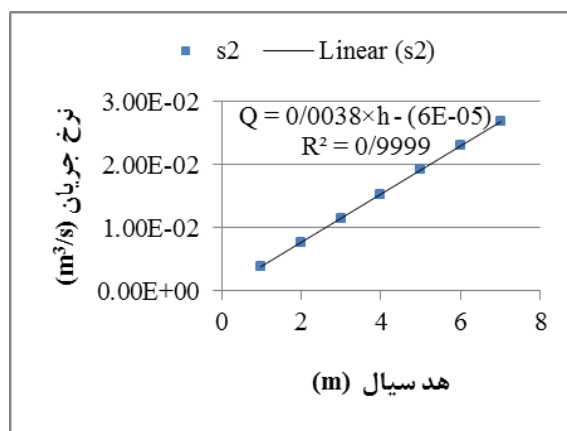
(۳) با افزایش جابجایی برشی به میزان ۲۰ میلی‌متر در هر ۴ نمونه آزمایش شده مقدار نفوذپذیری درزه حدود ۶ تا ۷ برابر مقدار اولیه افزایش پیدا می‌کند.

(۴) در طی آزمایش کوپل برش- جریان پارامترهایی همانند ضریب زبری درزه، جابجایی برشی و بازشدگی درزه، دارای بیشترین تأثیر بر روی نرخ جریان هستند.

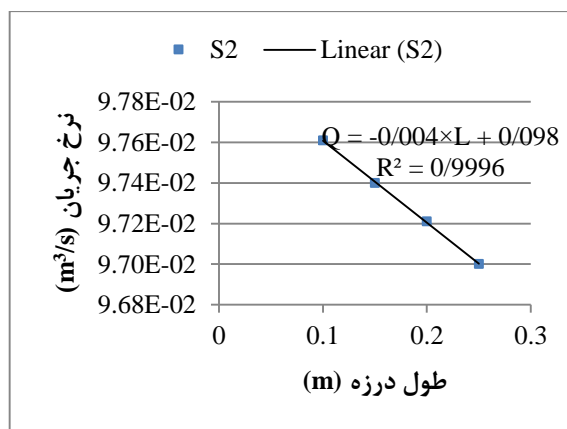
(۵) کد عددی توسعه داده شده توسط نرم‌افزار *UDEC* قادر به مدلسازی آسیب سطح درزه و تولید مواد گوج نیست، بنابراین در کارهای آینده لازم است این مورد نیز در نظر گرفته شود.



شکل ۱۶: ضریب زبری درزه *JRC* برحسب نرخ جریان در جابجایی برشی ۱۰ میلی‌متر



شکل ۱۷: هد سیال بر حسب نرخ جریان در جابجایی برشی ۱۰ میلی‌متر



شکل ۱۸: طول درزه برحسب نرخ جریان در جابجایی برشی ۱۰ میلی‌متر

۸- نتیجه‌گیری

در این پژوهش کوپل هیدرومکانیکی درزه‌های سنگی تحت شرایط آزمایشی *CNL* و *CNS* با استفاده از کد

مراجع

controlled direct shear apparatus applying a constant normal stiffness condition. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 41(2), 275-286.

[13] Barton, N., Bandis, S., & Bakhtar, K. (1985). Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints. *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics*. Vol. 22, No. 3, pp. 121-140).

[14] Barton, N., Bandis, S., & Bakhtar, K. (1986). Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints. *Publikasjon-Norges geotekniske gnostitut*, (162), 1-20.

[15] Zimmerman, R. W., & Bodvarsson, G. S. (1996). Hydraulic conductivity of rock fractures. *Transport in porous media*, 23(1), 1-30.

[16] Smart, B. G. D., Somerville, J. M., Edlman, K., & Jones, C. (2001). Stress sensitivity of fractured reservoirs. *Journal of petroleum science and engineering*, 29(1), 29-37.

[17] Brady, B. H., & Brown, E. T. (2013). *Rock mechanics for underground mining*. Springer science & business media.

[1] Zhang, L. (2013). Aspects of rock permeability. *Frontiers of structural and civil engineering*, 7(2), 102-116.

[2] Nishiyama, S., Ohnishi, Y., Ito, H., & Yano, T. (2014). Mechanical and hydraulic behavior of a rock fracture under shear deformation. *Earth, planets and space*, 66(1), 1-17.

[3] Park, H., Osada, M., Matsushita, T., Takahashi, M., & Ito, K. (2013). Development of coupled shear-flow-visualization apparatus and data analysis. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 63, 72-81.

[4] Baghbanan, A., & Jing, L. (2008). Stress effects on permeability in a fractured rock mass with correlated fracture length and aperture. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 45(8), 1320-1334.

[5] Koyama, T. (2007). Stress, flow and particle transport in rock fractures. PhD thesis, KTH University.

[6] Gale, J., MacLeod, R., & Le Messurier, P. (1990). Site characterization and validation-Measurement of flow rate, solute velocities and aperture variation in natural fractures as a function of normal and shear stress, stage III, Technical report of Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

[7] Esaki, T., Du, S., Mitani, Y., Ikusada, K., & Jing, L. (1999). Development of a shear-flow test apparatus and determination of coupled properties for a single rock joint. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 36(5), 641-650.

[8] Yeo, I. D., De Freitas, M. H., & Zimmerman, R. W. (1998). Effect of shear displacement on the aperture and permeability of a rock fracture. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 35(8), 1051-1070.

[9] Lee, H. S., & Cho, T. F. (2002). Hydraulic characteristics of rough fractures in linear flow under normal and shear load. *Rock mechanics and rock engineering*, 35(4), 299-318.

[10] Mitani, Y., Esaki, T., Sharifzadeh, M., & Vallier, F. (2003). Shear-flow coupling properties of a Rock Joint and its modelling by geographic information system (GIS). 10th ISRM congress, sandton, South Africa.

[11] Olsson, R., & Barton, N. (2001). An improved model for hydromechanical coupling during shearing of rock joints. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 38(3), 317-329.

[12] Jiang, Y., Xiao, J., Tanabashi, Y., & Mizokami, T. (2004). Development of an automated servo-

-
- 1- Permeability
 - 2- Constant Normal Load (CNL)
 - 3- Constant Normal Stiffness (CNS)
 - 4- Constant Normal Displacement/ Constant Volume (CV)
 - 5- Barton – Bandis
 - 6- Navier-Stokes
 - 7- Transmissivity
 - 8- Universal Distinct Element Code