

مطالعه تاثیر میکروپارامترهای مدل عددی PFC بر رشد ترک هیدرولیکی

وهاب سرفرازی^{۱*}، هادی حائری^۲، محمد فاتحی مرجی^۳

^۱عضو هیات علمی، گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران

^۲مدیر تحقیق و توسعه و کنترل کیفیت شرکت راهسازی و عمران، تهران، ایران

^۳عضو هیات علمی، گروه مهندسی معدن، دانشگاه یزد، یزد، ایران

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۰۱؛ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۱

چکیده

در این مقاله، با استفاده از نرم افزار *PFC2D*، تاثیر سختی نرمال و برشی مدل و همچنین مقاومت نرمال و برشی مدل بر الگوی رشد ترک هیدرولیکی مطالعه شده است. برای این منظور ابتدا مدل عددی با ابعاد $1000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ ساخته شد. ذرات شناور در مدل حذف گردید بگونه ای که هر دیسک به سه دیسک مجاور در اتصال است. مدل توسط دو نوار کلامپ از بالا و پایین محصور می شود. این کلامپها مانع حرکت دیسکهای مدل در راستای قائم می شود. بعد از حذف دیسکهای شناور در مدل، یک حفره به قطر 100 mm در مرکز حفره ایجاد شد. تعدادی دیسک بارگذار در درون حفره قرار گرفته که وظیفه اعمال فشار هیدرولیکی به دیواره حفره را برعهده دارند. سپس با تغییر میکروخصوصیاتی نظیر سختی نرمال و برشی و مقاومت نرمال و برشی مدل تاثیر آنها بر الگوی رشد ترک هیدرولیکی آشکار می شود. بطور کلی ۶ الگوی شکست متفاوت شناسایی شد. سختی نرمال و برشی مدل و مقاومت نرمال و برشی مدل تاثیر بسزایی بر الگوی شکست چاه دارد. در ادامه رابطه ای برای تخمین تنش هیدرولیکی شکست براساس مقاومت فشاری تک محوره مدل ارائه شده است.

ترک هیدرولیکی، میکروخصوصیات مدل عددی، *PFC2D*.

واژگان کلیدی

۱- مقدمه

شکست هیدرولیکی شامل آغاز ترک در سنگ و پیشروی ترک بدلیل فشار سیال موجود در ترک می باشد. مثالهای متعددی را می توان از کاربرد شکست هیدرولیکی در ژئومکانیک یافت. شکسته شدن سنگ توسط ماگما و نفوذ ماگما در سنگ در مقیاس بسیار وسیع مثال طبیعی از شکست هیدرولیکی می باشد (اسپنس [۱]). شکست مخازن نفت و گاز توسط سیال با ویسکوزیته مختلف (فیشر [۲])، اندازه گیری تنش برجا (ژانگ [۳]) و روش شکست هیدرولیکی در تحریک مخازن با نفوذپذیری کم کاربرد وسیعی پیدا کرده است (وارپینسکی و همکاران [۴]). اندرکنش ترک هیدرولیکی و شکستگیهای طبیعی و تاثیر تنش محصور کننده بر رشد ترک هیدرولیکی توسط کینگ [۵] مطالعه شده است. آزمایشهای شکست هیدرولیکی برجا توسط محققین متعددی انجام شده است (کای و

همکاران [۶]). تکنولوژی توموگرافی اشعه X (گیو و همکاران [۷]) و تکنولوژی انتشار صوت (استانچیس و همکاران [۸]) برای مطالعه رشد ترک هیدرولیکی آزمایشگاهی استفاده شده است. هنگ و همکاران [۹]، مجموعه ای از آزمایش شکستگی هیدرولیکی را تحت شرایط سه محوره واقعی انجام دادند. با توجه به اینکه انجام تست های برجا و آزمایشگاهی روی شکست هیدرولیکی سخت و هزینه بر است لذا از روش های عددی برای مطالعه رشد ترک هیدرولیکی استفاده می شود (یانگ و همکاران [۱۰]). مک کلور [۱۱] رشد ترک را در یک محدوده شامل شبکه شکستگیها با استفاده از روش ناپیوستگی جابجایی مطالعه نمود. وو و السون [۱۲] با استفاده از روش ناپیوستگی جابجایی اصلاح شده تاثیر تنش های محصور کننده را روی الگوی رشد ترک هیدرولیکی بررسی نمودند. چن [۱۳] با استفاده از روش المان محدود، نرم افزار *ABAQUA*، رشد ترک

$$\Delta F_i^n = (-k^n A \Delta U^n) n_i \quad (1)$$

$$\Delta F_i^s = -k^s A \Delta U_i^s \quad (2)$$

$$\Delta M = -k^n I \Delta \theta_{,,,} \Delta \theta \\ = (\omega^{[B]} - \omega^{[A]}) \quad (3)$$

k^s و k^n بیانگر سختی نرمال و برشی می باشند. ΔU^n و ΔU_i^s نمو افزایشی جابجایی نرمال و جابجایی برشی در یک پله زمانی می باشد. $\omega^{[A]}$ و $\omega^{[B]}$ سرعت چرخشی دو دیسک بهم چسبیده می باشد، n_i بردار نرمال هر تماس می باشد. Δt پله زمانی، A مساحت مقطع عرضی اتصال و I ممان اینرسی اتصال می باشد. نیرو و ممان جدید از مجموع نیرو و ممان در پله زمانی قدیم و مقادیر نمو افزایشی به شرح زیر محاسبه می شود:

$$F_i^n(t + \Delta t) = F^n(t) n_i + \Delta F_i^n, \dots, F^n = F_j^n n_j \quad (4)$$

$$F_i^s(t + \Delta t) = F_i^s(t) + \Delta F_i^s \quad (5)$$

$$M(t + \Delta t) = M(t) + \Delta M \quad (6)$$

تنش نرمال و تنش برشی عمل کننده در سطح مقطع اتصال با روابط زیر محاسبه می شوند. زمانیکه اتصال تحت تنش فشاری است علامت تنش مثبت می باشد.

$$\sigma = \frac{-F^n}{A} + \beta \frac{|M|}{I} R \quad (7)$$

$$\tau = \frac{|F_i^s|}{A} \quad (8)$$

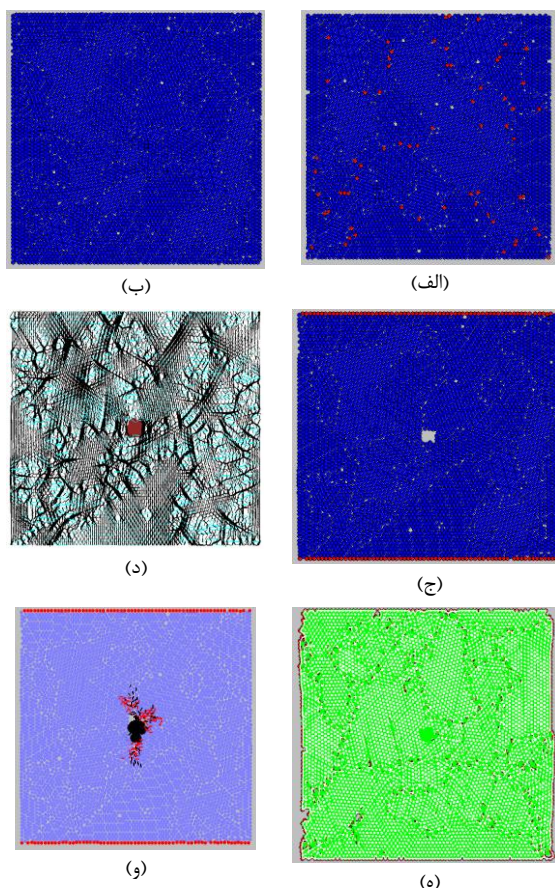
R شعاع دیسک می باشد. زمانیکه تنش $\square$ از مقاومت نرمال اتصال تجاوز می کند (σ_s) و یا تنش $\square$ بر مقاومت برشی اتصال (τ_s) غلبه کند، اتصال بین دیسکها می شکند. معیارهای شکست اتصال عبارتند از: $|\sigma| \geq \sigma_s$ و $0 < \square$ (تنش کششی) و $|\tau| \geq \tau_s$. این بیان می کند که فقط تنش های نرمال و برشی منجر به شکست اتصال می شوند. اگر یک اتصال بشکند، یک میکروتُرک در محل اتصال دیسکها ایجاد می شود. طول این میکروتُرک معادل شعاع اتصال، R ، می باشد و امتداد آن عمود بر خط متصل کننده مرکزهای دو دیسک می باشد. ترک ها تحت معیار مشخصی ایجاد می شوند و رشد ترک به مش بندی مجدد نیاز ندارد. جریان سیال ویسکوز در مدل ذرات بهم پیوسته مطابق الگوریتم ژو [۲۳] شبیه سازی می شود. الگوریتم جریان سیال ژو براساس دو فرضیه استوار است: اتصالها در مجموعه دیسکهای بهم چسبیده،

هیدرولیکی را مطالعه نمود. ونگ [۱۴] با استفاده از نرم افزار ABAQUS، رشد ترک هیدرولیکی را در سنگ های شکننده بررسی نمود. یان [۱۵]، با استفاده از روش اجزای مجزا-المان محدود رشد ترک هیدرولیکی را مطالعه نمود. چوی و همکاران [۱۶]، با استفاده از نرم افزار UDEC فشار بسته شدگی ترک هیدرولیکی را بررسی کردند. زنگنه و همکاران [۱۷]، با استفاده از روش المان مجزا تاثیر شکستگیهای طبیعی و تنش برجا را روی رشد ترک هیدرولیکی مطالعه نمودند. حمیدی و مرتضوی [۱۸]، با استفاده از نرم افزار 3DEC تاثیر خصوصیات سیال، رژیم تکتونیکی منطقه، خصوصیات سنگ و نرخ سیال تزریقی مختلف را مطالعه نمودند. در سالهای اخیر، کد جریان ذره، PFC، بطور گسترده ای در مدلسازی رشد ترک در مواد شبه سنگی (پوتیاندی [۱۹]، ژیا [۲۰]) و رشد ترک هیدرولیکی (وانگ [۲۱]، ژو [۲۲]) کاربرد یافته است. ژو و یونگ [۲۳]، رشد ترک هیدرولیکی مدلسازی شده توسط نرم افزار PFC2D را با استفاده از ترک هیدرولیکی آزمایشگاهی و برجا اعتبارسنجی نمود. شیمیزو و همکاران [۲۴]، با استفاده از نرم افزار PFC، مجموعه ای از شبیه سازیهای عددی را روی رشد ترک هیدرولیکی در سنگ طبیعی انجام دادند و تاثیر اندازه ذرات و ویسکوزیته سیال را روی رشد ترک بررسی نمودند. نتایج نشان داد که ترک کششی مود غالب شکست می باشد که در مدل ایجاد می شود. همچنین انرژی حاصل از ترکهای برشی بیشتر از ترک های کششی می باشد. بعد از ایجاد ترک، سرعت حرکت سیال درون ترک وابستگی شدیدی به ویسکوزیته سیال دارد. اشیت و همکاران [۲۵]، با بکارگیری نرم افزار PFC2D، فشار درون ترک هیدرولیکی را مدل کرده و توالی حرکت رشد ترک هیدرولیکی را شبیه سازی کردند. در این مقاله تاثیر سختی نرمال و برشی مدل و همچنین مقاومت نرمال و برشی مدل بر الگوی رشد ترک هیدرولیکی بررسی شده و ارتباط بین مقاومت فشاری و فشار شکست هیدرولیکی ارائه گردیده است.

۲- کد جریان ذره

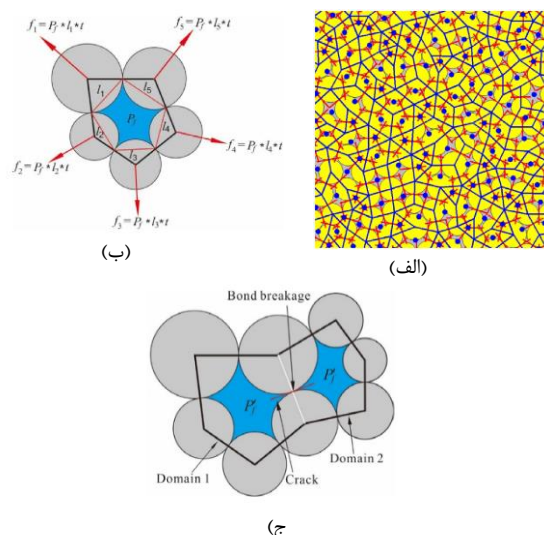
کد جریان ذره، حرکت ذرات و اندرکنش ذرات را مدل می کند (پوتیاندی [۱۹]). این کد توسط ژو [۲۳] اصلاح شده است تا بتواند رشد ترک هیدرولیکی را مدلسازی نماید. کد جریان ذره دو بعدی می تواند تغییر شکل محیط های پیوسته و ناپیوسته را شبیه سازی نماید. در این کد، سنگ بکر بصورت مجموعه ای از دیسک های بهم فشرده مدل می شود که دیسک ها در محل اتصالشان با فنرهای نرمال و برشی به یکدیگر متصل شده اند. در این مقاله از اتصال موازی بین ذرات استفاده شده است. در این اتصال، نمو افزایشی نیروی نرمال ΔF_i^n ، نیروی برشی ΔF_i^s و گشتاور M می توانند توسط حرکت نسبی ذرات محاسبه شوند. این نمو ها توسط روابط (۱)، (۲) و (۳) قابل محاسبه هستند:

۲-الف). در ابتدا ذرات شناور در مدل حذف گردید بگونه ای که هر دیسک به سه دیسک مجاور در اتصال است. زمانی که دیسکهای شناور حذف شدند و مدل به تعادل رسید (شکل ۲-ب)، یک حفره با قطر 100 mm در مرکز مدل ایجاد می شود (شکل ۲-ج). مدل توسط دو نوار کلامپ از بالا و پایین محصور می شود (شکل ۲-د). این کلامپها مانع حرکت دیسکهای مدل در راستای قائم می شود. شکل ۲-د توزیع زنجیره نیروهای فشاری و کششی را در مدل نشان می دهد. شکل ۲-ه نیز شبکه جریان در مدل را نشان می دهد. به منظور اعمال فشار سیال درون حفره، تعداد دیسکهای کوچک با قطر 1 mm درون حفره قرار گرفته که با افزایش قطر این دیسکها عملیات بارگذاری هیدرولیکی شروع می شود و شکست هیدرولیکی بوقوع می پیوندد (شکل ۲-و). با تغییر در سختی نرمال و برشی اتصالها و همچنین مقاومت نرمال و برشی آنها، الگوی رشد ترک هیدرولیکی و تنش شروع ترک هیدرولیکی بررسی شد.



شکل ۲- الف) حذف دیسک های شناور، ب) تعادل مدل، ج) ایجاد حفره در مرکز مدل و ایجاد کلامپ در بالا و پایین مدل، د) توزیع زنجیره نیروهای فشاری و کششی، ه) شبکه جریان در مدل عددی، و) نصب دیسکهای بارگذاری درون حفره و ایجاد ترک هیدرولیکی.

کانالهای جریان هستند و این کانالها در محل اتصالشان بصورت یک مخزن کوچک عمل می کنند که فشار سیال را ذخیره می کنند. همانگونه که در شکل ۱ مشاهده می شود، شبکه جریان بوسیله خطوط متصل کننده مرکزهای تمام دیسک ها شکل می گیرد. به این ترتیب مجموعه ای از محدوده های بسته ایجاد می شود (محدوده های آبی در شکل ۱-الف) که مرکز این محدوده ها مخازن کوچکی هستند که فشار سیال را ذخیره می کنند. خطوط قرمز در شکل ۱-الف بیانگر کانال جریان می باشند. زمانیکه نیروهای مکانیکی و هیدرولیکی در هر اتصال از مقاومت کششی یا برشی غلبه می کند (شکل ۱-ب)، یک ترک در محل تماس دیسکها ایجاد می شود (شکل ۱-ج). اطلاعات بیشتر در زمینه رشد ترک هیدرولیکی در مرجع [۲۳] آورده شده است.



شکل ۱- مدل PFC برای شبیه سازی هیدرومکانیکی. الف) محدوده مخزن (شبکه آبی رنگ)، مرکز محدوده (دایره های آبی رنگ و کانال جریان خطوط قرمز رنگ)، ب) کوپل مکانیکی، پیکان های قرمز بیانگر نیروهای اعمالی از طرف فشار سیال به هر دیسک می باشد که محدوده را احاطه کرده اند. ج) شکست اتصال و تعادل فشار سیال مطابق رابطه در دو طرف محدوده شکسته شده [۲۳].

۲-۱- فرآیند تولید مصالح در PFC 2D

پروسه تولید مصالح دارای پنج مرحله است [۱۹]: الف) فشردگی اولیه ذرات. ب) اعمال تنش ایزوتروپیک. ج) کاهش تعداد ذرات معلق در مدل. د) ایجاد پیوندهای موازی. جدول ۱ میکروخصوصیات بکاربرده شده در ساخت مدل عددی را نشان می دهد.

۲-۲- مدلسازی شکست هیدرولیکی:

مدل عددی و شرایط بارگذاری برای شکست هیدرولیکی در شکل ۶ نشان داده شده است. ابعاد مدل $1000\text{ mm} \times 1000\text{ mm}$ می باشد. تعداد دیسکها ۶۵۰۰ عدد است که شعاع آنها 1 mm می باشد (شکل

افتد که سختی نرمال و برشی مدل بیشتر از $1e6$ و نسبت مقاومت برشی به مقاومت نرمال کوچکتر از 0.7 باشد. در این شرایط، ترک های برشی بصورت خطی در مدل رشد می کند (شکل ۴-د). نوع پنجم شکست زمانی اتفاق می افتد که سختی نرمال و برشی مدل بیشتر از $1e6$ و نسبت مقاومت برشی به مقاومت نرمال برابر ۱ باشد. در این شرایط، ترک های برشی و کششی بصورت خطی در مدل رشد می کند (شکل ۴-ه). نوع ششم شکست زمانی اتفاق می افتد که سختی نرمال و برشی مدل بیشتر از $1e6$ و نسبت مقاومت برشی به مقاومت نرمال بیشتر از ۱ باشد. در این شرایط، ترک های کششی بصورت خطی در مدل رشد می کند (شکل ۴-و). این ترک ها عمود بر مرزهای کلامپ پیشری می کنند.

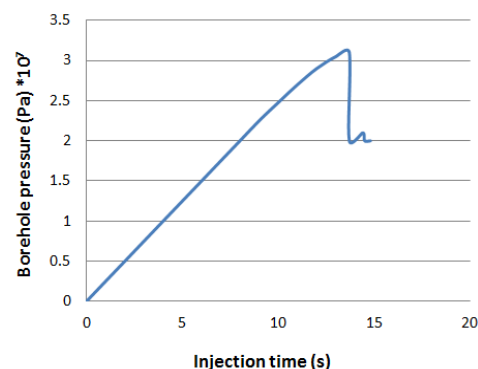
جدول ۲ مقادیر سختی نرمال و برشی و مقاومت نرمال و برشی اتصالها را نشان می دهد.

جدول ۱- میکروخصوصیات استفاده شده جهت ساخت مدل ها

میکروخصوصیات	مقادیر	میکروخصوصیات	مقادیر
نوع ذره	دیسکی	افزایش دهنده شعاع اتصال موازی	۱
دانسیته (gr/cm^3)	۲۶۳۰	نسبت تخلخل	۰/۱
مینیم شعاع دیسک	0.25×10^{-3}	ضریب میرایی	۰/۷
نسبت مینیم شعاع به ماکزیم شعاع دیسک	۱/۳۵	ضریب اصطکاک	۰/۵

۳-۲- پاسخ فشار سیال در طی شکست هیدرولیکی

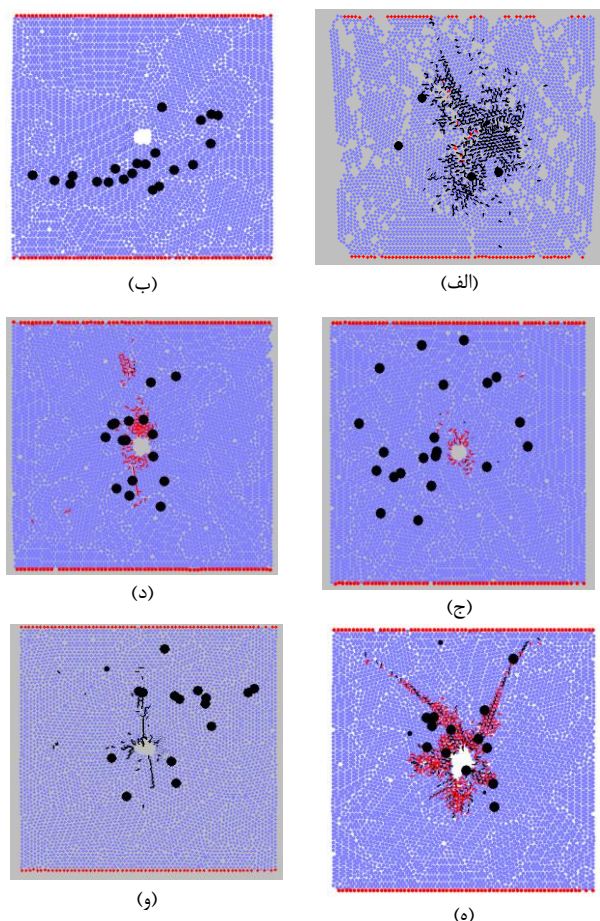
شکل ۳ پاسخ فشار سیال را در طی شکست هیدرولیکی نشان می دهد. قسمت خطی نمودار، نشان دهنده تغییر شکل الاستیک مدل است. نقطه ماکزیمم بیانگر شروع ترک است و بعد از این نقطه فشار سیال افت می کند. این بیانگر رشد ترک ناپایدار و نفوذ سیال درون ترک است. پمپاژ سیال درون ترک منجر به رشد پایدار ترک شده و سطح فشار سیال را ثابت نگه می دارد.



شکل ۳- پاسخ فشار سیال در طی شکست هیدرولیکی

۴-۲- الگوی شکست مدل ها

بطور کلی ۶ الگوی ناپایداری در مدل ها اتفاق می افتد. نوع اول شکست زمانی اتفاق می افتد که سختی نرمال و برشی مدل کمتر از $1e6$ باشد. در این شرایط، در تمام مقادیر مقاومت نرمال و برشی مدل بطور کامل گسیخته می شود (شکل ۴-الف). نوع دوم شکست زمانی اتفاق می افتد که سختی نرمال و برشی مدل بیشتر از $1e6$ باشد ولی سختی نرمال دیسکهای بارگذاری داخل حفره کمتر از سختی مدل باشد. در این شرایط، در تمام مقادیر مقاومت نرمال و برشی مدل هیچگونه شکستی در مدل ایجاد نمی شود (شکل ۴-ب). نوع سوم شکست زمانی اتفاق می افتد که سختی نرمال و برشی مدل بیشتر از $1e6$ و نسبت مقاومت برشی به مقاومت نرمال بین 0.7 و 1 باشد. در این شرایط، ترک های برشی بصورت حلقوی پیرامون حفره ایجاد می شوند (شکل ۴-ج). نوع چهارم شکست زمانی اتفاق می



شکل ۴- الگوی ناپایداری در مدل ها، الف) مدل بطور کامل گسیخته می شود، ب) هیچگونه شکستی در مدل اتفاق نمی افتد، ج) وقوع ترک های برشی بصورت حلقوی پیرامون حفره، د) رشد ترک های برشی بصورت خطی در مدل، ه) رشد ترک های برشی و کششی بصورت خطی در مدل، و) رشد ترک های کششی بصورت خطی در مدل.

از آنجاییکه در تحقیقات انجام شده توسط کای و همکاران [۶] رشد ترک کششی در آزمونهای برجا اتفاق می افتد لذا داده های حاصل از

شکست کششی PFC (شکست نوع ششم) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. به این ترتیب که با مدلسازی آزمایش تک محوره PFC (شکل ۵)، مقاومت فشاری مربوط به میکروپارامترهای حاصل از شکست نوع ششم، تعیین شدند (جدول ۳). سپس با مقایسه مقادیر مقاومت فشاری و تنش شکست هیدرولیکی در هر مدل، رابطه بین مقاومت فشاری σ_c و تنش شکست هیدرولیکی σ_{hf} مطابق رابطه ۹ تعیین شد.

جدول ۲- مقادیر سختی نرمال، برشی، مقاومت نرمال و برشی

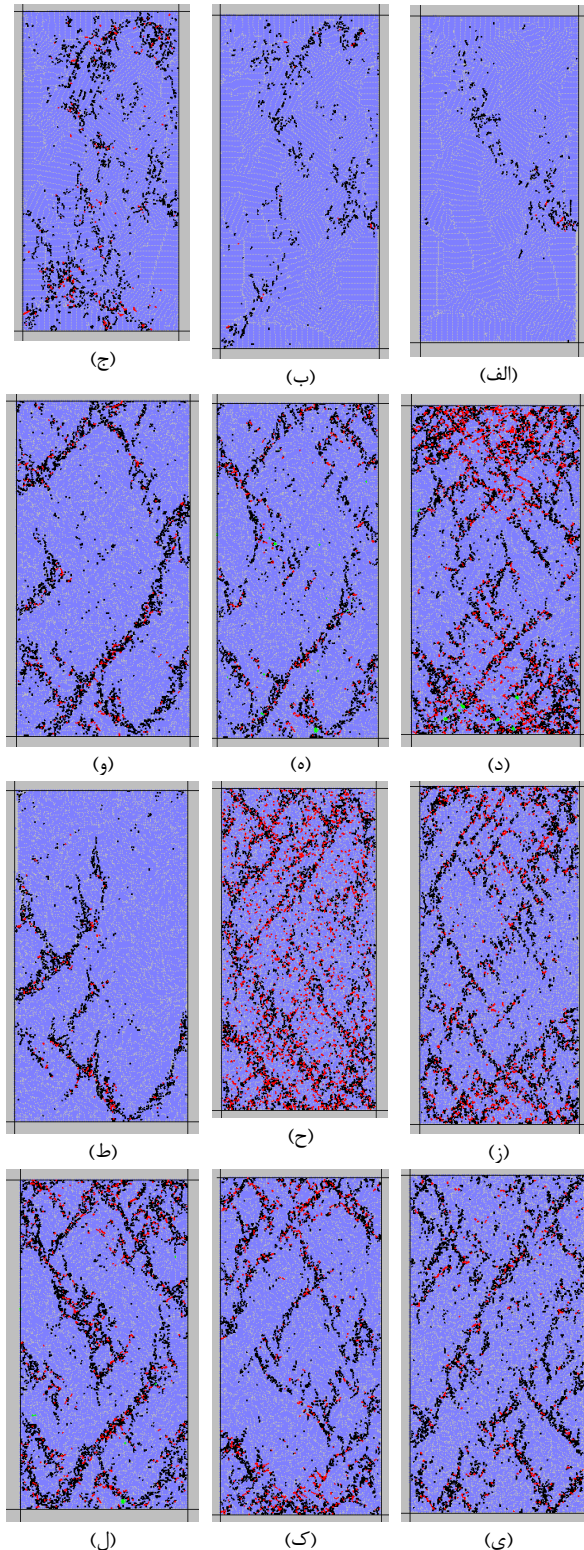
اتصالها و همچنین نوع شکست در مدلها

نوع شکست	τ_c (MPa)	σ_c (MPa)	ks	kn	نوع شکست	τ_c (MPa)	σ_c (MPa)	ks	kn
دوم	6	12	1e8	1e8	اول	0.6	0.6	1e4	1e4
دوم	8	14	1e8	1e8	اول	6	0.6	1e4	1e4
دوم	10	16	1e8	1e8	اول	6	0.06	1e4	1e4
دوم	12	18	1e9	1e8	اول	0.6	0.6	1e5	1e5
دوم	10	20	1e9	1e8	اول	6	0.6	1e5	1e5
دوم	8	0.6	1e9	1e8	اول	6	0.06	1e5	1e5
پنجم	6	6	1e9	1e8	دوم	0.6	0.6	1e6	1e6
پنجم	10	10	1e9	1e8	دوم	6	0.6	1e6	1e6
چهارم	4	8	1e9	1e8	دوم	0.6	6	1e6	1e6
چهارم	5	10	1e9	1e8	چهارم	5	10	1e8	1e6
چهارم	6	12	1e9	1e8	چهارم	6	12	1e8	1e6
ششم	200	100	1e9	1e8	چهارم	7.5	15	1e8	1e6
ششم	220	110	1e9	1e9	سوم	4	5	1e8	1e6
ششم	260	130	1e9	1e9	سوم	5	6	1e8	1e6
ششم	300	150	1e9	1e9	پنجم	5	5	1e8	1e6
سوم	8	10	1e10	1e8	پنجم	6	6	1e8	1e6
سوم	16	20	1e10	1e8	ششم	12	24	1e8	1e6
سوم	7	10	1e10	1e8	ششم	35	70	1e8	1e6
سوم	28	30	1e10	1e8	چهارم	10	5	1e7	1e7
چهارم	6	12	1e10	1e8	چهارم	12	6	1e7	1e7
چهارم	10	20	1e10	1e8	چهارم	15	7	1e7	1e7
چهارم	15	30	1e10	1e8	چهارم	10	5	1e8	1e7
چهارم	10	40	1e10	1e8	چهارم	12	6	1e8	1e7
چهارم	20	50	1e10	1e8	ششم	85	170	1e8	1e7
پنجم	6	6	1e10	1e10	ششم	95	190	1e8	1e7
ششم	360	180	2e8	2e8	ششم	45	90	1e8	1e7
ششم	340	170	2e8	2e8	ششم	60	120	1e8	1e7

جدول ۳- مقادیر تنش شکست هیدرولیکی و مقاومت فشاری مربوط به میکروپارامترهای مربوطه

تنش شکست هیدرولیکی (MPa)	مقاومت فشاری مربوط به (MPa)	تنش شکست هیدرولیکی (MPa)	مقاومت فشاری مربوط به (MPa)	تنش شکست هیدرولیکی (MPa)	مقاومت فشاری مربوط به (MPa)
۳	۱۵/۶	۱۸	۹۱	۲۹	۱۴۵/۶
۸	۴۰/۳	۲۱	۱۰۸	۳۲	۱۶۰
۱۰	۵۲	۲۲	۱۱۰/۴	۳۵	۱۷۵/۸
۱۳	۶۵/۸	۲۵	۱۲۵/۵	۴۱	۲۰۰

$$\sigma_{hf} = \frac{\sigma_c}{5} \quad (9)$$



شکل ۵- الگوی شکست در مدل‌های با مقاومت فشاری، الف) MPa ۹۱، ب) MPa ۴۰/۳، ج) MPa ۵۲، د) MPa ۶۵/۸، ه) MPa ۱۵/۶، و) MPa ۱۶۰

MPa (ی، ۱۴۵/۶ MPa (ط، ۱۲۵/۵ MPa (ح، ۱۱۰/۴ MPa (ز، ۱۰۸ MPa (ک، ۱۶۰ MPa (ل، ۱۷۵/۸ MPa (۲۰۰ MPa

۳- نتیجه گیری

در این مقاله، با استفاده از نرم افزار PFC2D، تاثیر سختی نرمال و برشی مدل و همچنین مقاومت نرمال و برشی مدل بر الگوی رشد ترک هیدرولیکی مطالعه شده است. برای این منظور ابتدا مدل عددی با ابعاد $1000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ ساخته شد. ذرات شناور در مدل حذف گردید بگونه ای که هر دیسک به سه دیسک مجاور در اتصال است. مدل توسط دو نوار کلامپ از بالا و پایین محصور می شود. این کلامپها مانع حرکت دیسکهای مدل در راستای قائم می شود. بعد از حذف دیسکهای شناور در مدل، یک حفره به قطر 100 mm در مرکز حفره ایجاد شد. تعدادی دیسک بارگذار در درون حفره قرار گرفته که وظیفه اعمال فشار هیدرولیکی به دیواره حفره را برعهده دارند. سپس با تغییر میکروخصوصیاتی نظیر سختی نرمال و برشی و مقاومت نرمال و برشی مدل تاثیر آنها بر الگوی رشد ترک هیدرولیکی آشکار می شود.

۱- تحت آزمایش شکست هیدرولیکی، ۶ الگوی ناپایداری در مدل ها اتفاق می افتد. نوع اول شکست زمانی اتفاق می افتد که سختی نرمال و برشی مدل کمتر از $1e6$ باشد. در این شرایط، در تمام مقادیر مقاومت نرمال و برشی مدل بطور کامل گسیخته می شود. نوع

۴- مراجع:

of Rock Mechanics and Engineering, Vol. 34, Issue 2, 2015, p. 228-237.

[10] Yang, D., Li, Q. and Zhang, L. (2016) 'Propagation of pore pressure diffusion waves in saturated dual-porosity media (II)', Journal of Applied Physics, Vol. 119, No. 15, pp.154901, doi: 10.1063/1.4946832.

[11] Wu, K. and Olson, J.E. (2013) 'Investigation of critical in situ and injection factors in multi-frac treatments: guidelines for controlling fracture complexity', in SPE Hydraulic Fracturing Conference, Paper SPE 163821, Woodlands, Texas, 4-6 February.

[12] McClure, M.W. (2012) Modeling and Characterization of hydraulic Stimulation and Induced Seismicity in Geothermal and Shale Gas Reservoirs, Doctoral dissertation, Stanford University.

[13] Chen, Z. (2012) 'Finite element modelling of viscosity-dominated hydraulic fractures', Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 88, pp.136-144.

[14] Wang, H. (2015) 'Numerical modeling of non-planar hydraulic fracture propagation in brittle and ductile rocks using XFEM with cohesive zone method', Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 135, pp.127-140.

[15] Yan C. Z. A new two-dimensional FDEM-flow method for simulating hydraulic fracturing. Rock and Soil Mechanics, Vol. 38, Issue 6, 2017, p. 1789-1796.

[16] Choi, S.O. Interpretation of shut-in pressure in hydrofracturing pressure-time records using numerical modeling. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 2012, 50, 29-37.

[17] Zangeneh, N.; Eberhardt, E.; Bustin, R.M. Investigation of the influence of natural fractures and in situ stress on hydraulic fracture

[1] Spence, D.A.; Turcotte, D.L. Magma-driven propagation of cracks. J. Geophys. Res. Solid Earth 1985, 575-580.

[2] Fisher, K.; Warpinski, N. Hydraulic fracture height growth: Real data. SPE Prod. Oper. 2012, 27, 8-19. [CrossRef]

[3] Zhang, B.; Li, X.; Zhang, Z.; Wu, Y.; Wu, Y.; Wang, Y. Numerical investigation of influence of in-situ stress ratio, injection rate and fluid viscosity on hydraulic fracture propagation using a distinct element approach. Energies 2016, 9, 140.

[4] Warpinski, N.R., Kramm, R.C., Heinze, J.R. and Waltman, C.K. (2005) 'Comparison of single- and dual-array microseismic mapping techniques in the Barnett shale', in SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Paper SPE 95568, Dallas, Texas, 9-12 October.

[5] King, G.E. Thirty years of gas shale fracturing: What have we learned? In Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Florence, Italy, 19-22 September 2010.

[6] Cai, M., Chen, C., Peng, H., Ji, H., Qao, L., Tan, Z., 2006. In-situ stress measurement by hydraulic fracturing technique in deep position of Wangfu coal mine. Chin. J. Rock Mech. Eng. 5, 1069-1074.

[7] Guo, T., Zhang, S. et al. (2014) 'Experimental study of hydraulic fracturing for shale by stimulated reservoir volume', Fuel, Vol. 128, pp.373-380.

[8] Stanchits, S., Burghardt, J. and Surdi, A. (2015) 'Hydraulic fracturing of heterogeneous rock monitored by acoustic emission', Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 48, No. 6, pp.2513-2527.

[9] Heng S., Yang C. H., Guo Y. T., et al. Influence of bedding planes on hydraulic fracture propagation in shale formations. Chinese Journal

- [22] Zhou J., Zhang L., Braun A., et al. Numerical modeling and investigation of fluid-driven fracture propagation in reservoirs based on a modified fluid-mechanically coupled model in two-dimensional particle flow code. *Energies*, Vol. 9, Issue 9, 2016, p. 699
- [23] Zhou J, (2017) Hydraulic fracturing process by using a modified two-dimensional particle flow code – method and validation, *Progress in Computational Fluid Dynamics*, Vol. 17, No. 1, 52-62.
- [24] Shimizu, H., Murata, S. and Ishida, T. (2011) 'The distinct element analysis for hydraulic fracturing in hard rock considering fluid viscosity and particle size distribution', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 48, No. 5, pp.712–727.
- [25] Eshiet, K.I., Sheng, Y. and Ye, J. (2013) 'Microscopic modelling of the hydraulic fracturing process', *Environmental Earth Sciences*, Vol. 68, No. 4, pp.1169–1186.
- propagation using a distinct-element approach. *Can. Geotech. J.* 2015, 52, 926–946.
- [18] Hamidi, F.; Mortazavi, A. A new three dimensional approach to numerically model hydraulic fracturing process. *J. Pet. Sci. Eng.* 2014, 124, 451–467.
- [19] Potyondy D. O., Cundall P. A. A bonded-particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 41, Issue 8, 2004, p. 1329-1364.
- [20] Xia L., Zeng Y. W., Jin L., et al. Research on influence of initial horizontal principle stress on stress shadow. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, Vol. S1, 2016, p. 2819-2825.
- [21] Wang T., Hu W., Elsworth D., et al. The effect of natural fractures on hydraulic fracturing propagation in coal seams. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 150, 2017, p. 180-190