

نقش خواص ژئومکانیکی در فرآیند گسترش شکست هیدرولیکی با استفاده از تکنیک شبکه شکستگی‌های مجزای موهومی

روح اله بصیرت، کامران گشتاسبی* و مرتضی احمدی

گروه مهندسی مکانیک سنگ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۶/۲/۲۳ تاریخ پذیرش: ۹۶/۹/۸

چکیده

شکست هیدرولیکی از روش‌های مرسوم و رایج در تحریک چاه‌های هیدروکربوری با نفوذپذیری پایین به منظور بهبود تولید است. این روش جهت ایجاد شکاف‌های مصنوعی و تحریک جریان سیال در چاه‌های نفت و گاز کاربرد گسترده‌ای دارد. در این مقاله با استفاده از تکنیک شبکه شکستگی‌های مجزا، فرآیند گسترش شکستگی در نرم‌افزار اجزای مجزای UDEC شبیه‌سازی شد. این روش کلیدی برای شبیه‌سازی شکست هیدرولیکی است که قابلیت انجام آنالیز هیدرومکانیکی برای مدل‌سازی جریان سیال داخل شبکه شکستگی‌ها را داراست. به دلیل آنکه مدل‌سازی شروع یک شکستگی القایی در روش اجزای مجزا مشکل است، در این مقاله از تکنیک درزه‌های ساختگی برای شبیه‌سازی فرآیند استفاده شده است. در این راستا برای مدل‌سازی فرآیند گسترش شکستگی در محیطی معادل با خواص ماده سنگ، از درزه‌های موهومی استفاده شد. بدین منظور، خواص مقاومتی و مکانیکی ناپیوستگی‌ها معادل با خواص مقاومتی و مکانیکی ماده سنگ در نظر گرفته شد. سپس، نقش پارامترهای مکانیک سنگی شامل مدول الاستیسته، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در فرآیند گسترش شکستگی بررسی شد. نتایج مدل‌سازی‌های عددی نشان دادند که با افزایش مدول الاستیسته و کاهش زاویه اصطکاک، گسترش شکست هیدرولیکی افزایش می‌یابد. همچنین افزایش مقدار چسبندگی تاثیر چشم‌گیری بر طول گسترش شکست ندارد، اما باعث کاهش بازشدگی شکاف هیدرولیکی می‌شود.

کلمات کلیدی: شکست هیدرولیکی، شبکه شکستگی‌های مجزا، خواص ژئومکانیکی، درزه‌های موهومی، گسترش شکست

مقدمه

این عملیات، فرآیندی است که در آن سیال با نرخ تزریقی نسبتاً بالا درون چاه پمپ می‌شود. عملیات پمپاژ تا جایی ادامه می‌یابد که فشار به‌حدی برسد که باعث ایجاد و سپس گسترش شکافی در دیواره چاه شود.

عملیات شکست هیدرولیکی، یکی از روش‌های افزایش بازده چاه‌های نفت و گاز محسوب می‌شود.

*مسئول مکاتبات
آدرس الکترونیکی: Goshtasb@modares.ac.ir
شناسه دیجیتال (DOI: 10.22078/pr.2017.2749.2273)

پاک و صمیمی نیز چارچوب و فرمول‌بندی ریاضی یک مدل سه‌بعدی برای پیش‌بینی شروع و گسترش شکست هیدرولیکی در مخازن نفت و گاز ارائه کردند [۴]. در مدل پیشنهادی رفتارهای الاستیک خطی/ غیرخطی و الاستوپلاستیک مخزن در تحلیل مسئله در نظر گرفته و تأثیر آنها را بر شروع و گسترش ترک در مخزن لحاظ می‌شود. ناگال و همکاران نحوه گسترش شکست هیدرولیکی در مخازن دارای شکستگی‌های طبیعی را با نرم‌افزار 3DEC بررسی کردند [۵]. در کار ایشان، برای شبیه‌سازی رفتار شکستگی‌های طبیعی، ۳۵۰ شکستگی غیر ساختار یافته و تصادفی توسط روش شبکه شکستگی‌های مجزا^۱ ساخته شده و به مدل وارد شده‌اند. در مدل مذکور تأثیر نرخ تزریق و ویسکوزیته سیال تزریق برروی گسترش شکست هیدرولیکی بررسی شده و با توجه به نتایج حاصله مشخص گردید که مدل ساخته شده به تغییرات دو پارامتر مذکور بسیار حساس می‌باشد. همچنین رشد ترک در محیط‌های شکننده و شکل‌پذیر نیز توسط یاو مورد مطالعه قرار گرفت. وی بیان کرد که طول شکست در محیط‌های شکل‌پذیر نسبت به محیط‌های شکننده کوتاه‌تر است که دلیل این اختلاف طول را می‌توان در مقدار انرژی جذب شده در این دو محیط بیان کرد [۶]. ژانگ و جفری نیز با کوپل هیدرومکانیکی به‌روش DDM^۲ نشان دادند که فاکتورهایی مانند تنش‌های برجا، محل و اندازه شکستگی‌ها، ویسکوزیته و نرخ جریان در عملیات شکست هیدرولیکی موثر هستند [۷]. بهنیا و همکاران اندرکنش بین شکست هیدرولیکی و شکستگی‌های طبیعی و مسیر گسترش آن را با استفاده روش عددی DDM بررسی کردند [۸-۱۰].

1. Drainage Area

2. Discrete Fracture Network (DFN)

3. Displacement Discontinuity

شکست کششی القایی ایجاد شده برروی دیواره چاه (یا نوک شکستگی طبیعی موجود در سنگ)، که در نتیجه فشار حاصل از سیال برروی دیواره چاه (یا شکستگی طبیعی) صورت گیرد، را شکست هیدرولیکی می‌گویند. شکست هیدرولیکی در سنگ‌هایی با درزه و شکستگی‌های طبیعی، در حقیقت جدایش کامل دو صفحه شکست از هم در اثر افزایش فشار سیال است [۱].

کاربردهای مختلفی برای عملیات شکست هیدرولیکی وجود دارد که برخی از آنها عبارتند از [۲]:

- افزایش نرخ جریان نفت و یا گاز از مخازن با نفوذپذیری پایین
- افزایش نرخ جریان نفت و یا گاز از چاه‌هایی که دچار آسیب دیدگی شده‌اند.
- متصل کردن شکست‌های طبیعی موجود در اطراف چاه مورد بهره‌برداری
- تعدیل افت فشار برای کمینه کردن مشکلات ناشی از رسوب‌دهی آسفالتین و پارافین
- تعدیل افت فشار اطراف چاه برای کمینه کردن تولید شن
- افزایش ناحیه زه‌کشی^۱ یا افزایش سطح مؤثر چاه
- وصل کردن مخازن عمودی به مخازن فرعی اریب یا چاه‌های افقی
- با توجه به اینکه عملیات شکست هیدرولیکی در واقع یک فرآیند رشد ترک از دیواره چاه به درون لایه نفت‌دار می‌باشد، ضروری است که نحوه و میزان توسعه ترک هیدرولیکی و تعیین مسیر گسترش آن با توجه به شرایط محیط در برگیرنده آن در چاه‌های نفتی با استفاده از دیدگاه ژئومکانیک مورد ارزیابی و تحلیل قرار گیرد. در این راستا، روش‌های عددی متفاوتی به منظور بررسی هندسه و مسیر انتشار ترک هیدرولیکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که قابلیت هر یک از آنها به‌همراه توصیفی از روش، مزایا و معایب آنها در پیش‌بینی شکست هیدرولیکی توسط بصیرت و گشتاسبی بررسی شده است [۳].

برای شبیه‌سازی رشد شکستگی هیدرولیکی در مدل ایجاد شده است. بنابراین در این روش نیازی به تعریف معیارهایی همانند معیار چقرمگی مجاز، تنش و انتگرال J به منظور شبیه‌سازی گسترش شکستگی هیدرولیکی نیست و بنابراین نباید چقرمگی مُد اول یا دوم را محاسبه و برای ترک تعریف کرد. به دو دلیل از شبکه شکستگی‌های مجزا با درزه‌های موهومی استفاده شد:

- ۱- اگر خواص درزه‌ها به‌عنوان درزه‌های موهومی وارد شود، می‌توان چنین تلقی نمود که بلوک با خواص ماده سنگ و بدون هیچ‌گونه درزه و شکستگی بوده و قابلیت مدل‌سازی گسترش شکستگی را دارا است.
- ۲- استفاده از این شبکه باعث می‌شود که جهت خاصی برای گسترش شکاف به مدل تحمیل نشود. بایستی توجه کرد که نحوه تخصیص خواص درزه‌ها در این روش به‌طور کلی متفاوت از درزه‌های طبیعی می‌باشد؛ چرا که توسط تلفیق خواص درزه‌های موهومی با خصوصیات بلوک‌های سنگی، خواص معادل معرف مناسبی برای ماده‌سنگ بدون شکستگی معرفی می‌شود. این خواص به دو بخش خواص مقاومتی و مکانیکی تقسیم می‌شوند. برای نزدیک‌تر شدن رفتار درزه‌های موهومی علاوه بر یکسان در نظر گرفتن مدل رفتاری درزه‌ها با بلوک‌های سنگی، خواص مقاومتی آن‌ها شامل زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی، عیناً برابر خواص مقاومتی بلوک‌های سنگی در نظر گرفته شد. از طرفی دیگر خواص مکانیکی درزه‌ها، که به نوعی معرف رفتار قبل از گسیختگی آن‌ها می‌باشد، به‌علت کمبود داده‌های مربوط به سختی قائم و برشی درزه‌ها، بهتر است مقدار سختی برشی و قائم به مقدار کافی بزرگ (سختی نرمال و برشی به‌ترتیب ۱۰ تا ۱۵ برابر مدول الاستیسیته و مدول برشی سنگ) در نظر گرفته شوند. همچنین نسبت سختی نرمال به برشی برابر نسبت مدول الاستیسیته به برشی پیشنهاد شده است [۱۲].

نتایج مدل‌سازی‌های عددی آن‌ها نشان داد که در زوایای بالا (زاویه بین مسیر شکست هیدرولیکی و شکستگی‌های طبیعی)، شکست هیدرولیکی تمایل دارد که به‌صورت مستقیم به مسیر خود ادامه دهد، اما با کاهش زاویه، تمایل آن برای انحراف از مسیر اصلی خود بیشتر می‌شود. لازم به ذکر است که با وجود همه تحقیقات انجام شده در این زمینه، هنوز آگاهی از تاثیر پارامترهای مختلف مکانیک سنگی و به خصوص پارامترهای مربوط به ناپیوستگی‌ها ناشناخته مانده است. از طرف دیگر، از آنجایی که عملیات شکست هیدرولیکی بسیار هزینه‌بر و حساس می‌باشد، انجام آن نیازمند یک طراحی دقیق است و لازمه طراحی عملیات، آگاهی از میزان رشد شکاف در شرایط مختلف می‌باشد. بدین منظور مدل‌سازی عددی کمک زیادی به آگاهی یافتن از موارد ذکر شده می‌کند. در این مقاله نیز با استفاده از مفهوم درزه‌های موهومی^۱، فرآیند گسترش شکست هیدرولیکی به‌صورت دوبعدی و با استفاده از شبکه DFN در محیط نرم‌افزار اجزای مجزای UDEC شبیه‌سازی و سپس تاثیر پارامترهای مکانیک سنگی بر این فرآیند بررسی شد.

شبیه‌سازی عددی

مفهوم درزه‌های موهومی

در این مقاله از روش المان مجزا برای شبیه‌سازی دوبعدی گسترش شکاف در اثر تزریق سیال استفاده شده است. روش شبکه شکستگی‌های مجزا یک مدل خاصی است که روند جریان و انتقال سیال را درون توده سنگ شکسته و از میان مجموعه درزه‌های متصل به هم در نظر می‌گیرد [۱۱]. به منظور مدل‌سازی گسترش ترک، از مفهوم باز شدن درزه‌های موهومی تعبیه شده توسط شبکه شکستگی‌های مجزا در سراسر مدل و تنها به‌وسیله فشار سیال تزریقی به مرکز چاه یا گمانه بهره گرفته شد. منظور از درزه‌های موهومی در این مقاله، درزه‌هایی است که در سنگ وجود نداشته و تنها

1. Fictitious Joints

مشخصات مدل عددی

- سیال به صورت تراکم‌ناپذیر و جریان سیال به صورت گذرا است.

- تزریق با دبی ثابت 0.15 L/S انجام می‌شود.

- شکستگی هیدرولیکی فقط در درزه‌های موهومی و با تعبیر بازشدن درزه‌ها در المان‌های تماسی^۲ اتفاق می‌افتد.

در جدول ۱، پارامترهای مربوط به ماده سنگ، ناپیوستگی‌ها و سیال جهت مدل‌سازی ارائه شده است. در پارامترهای انتخابی سعی شده است تا جای امکان، خواص با مخازن کرناته واقعی مطابقت داشته باشد. در شکل ۲، شبکه اجزای ناپیوستگی‌ها به همراه مش‌بندی بلوک‌های تشکیل شده و محل المان‌های تماسی در مدل المان مجزا نشان داده شده است. با توجه به هندسه ناپیوستگی‌ها، تعداد 8035 المان تماسی در بخش DFN ایجاد می‌شود که باز شدن هر کدام از آن‌ها نشان‌دهنده گسترش شکستگی هیدرولیکی است.

اعتبارسنجی مدل عددی

به منظور اطمینان از صحت جواب‌ها در مدل‌سازی عددی، طول شکستگی هیدرولیکی محاسبه شده توسط روش عددی و روش تحلیلی KGD ^۳ با یکدیگر مقایسه شدند.

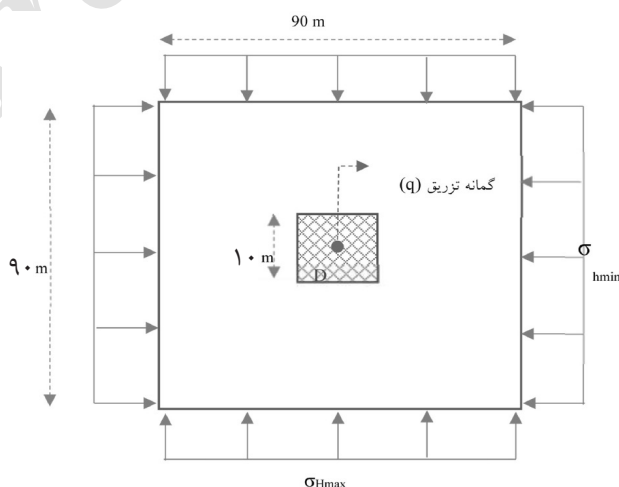
با در نظر گرفتن موارد مطرح شده، مدلی با ابعاد $90 \times 90 \text{ m}$ ساخته شد. با توجه به هزینه محاسباتی بالا در مدل DFN، شبکه شکستگی‌های موهومی تنها در مربعی با اندازه ضلع 10 m و در مرکز مدل ایجاد شد. برای ساخت شبکه DFN از ساختار Voronoi موجود در نرم‌افزار اجزای مجزای UDEC استفاده شد. در این ساختار، شبکه‌ای از شکستگی‌ها به صورت چیدمان موزائیک‌کاری شده^۱ و به صورت تصادفی در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. چاه تزریق نیز با شعاع 15 cm در مرکز مدل در نظر گرفته شد. تنش‌های افقی حداقل و حداکثر به ترتیب برابر 20 و 25 mPa و در جهات x و y به مدل اعمال شدند. شماتیکی از مدل به همراه شرایط مرزی در شکل ۱ نشان داده شده است.

فرضیات در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی عددی عبارتند از:

- مدل رفتاری ماده سنگ و درزه‌ها به ترتیب مور-کلمب و کلمب است.

- با توجه به مدل‌سازی مقطع افقی زمین، مدل بدون گراویتی است.

- شرایط کرنش صفحه‌ای بر مساله حاکم است.

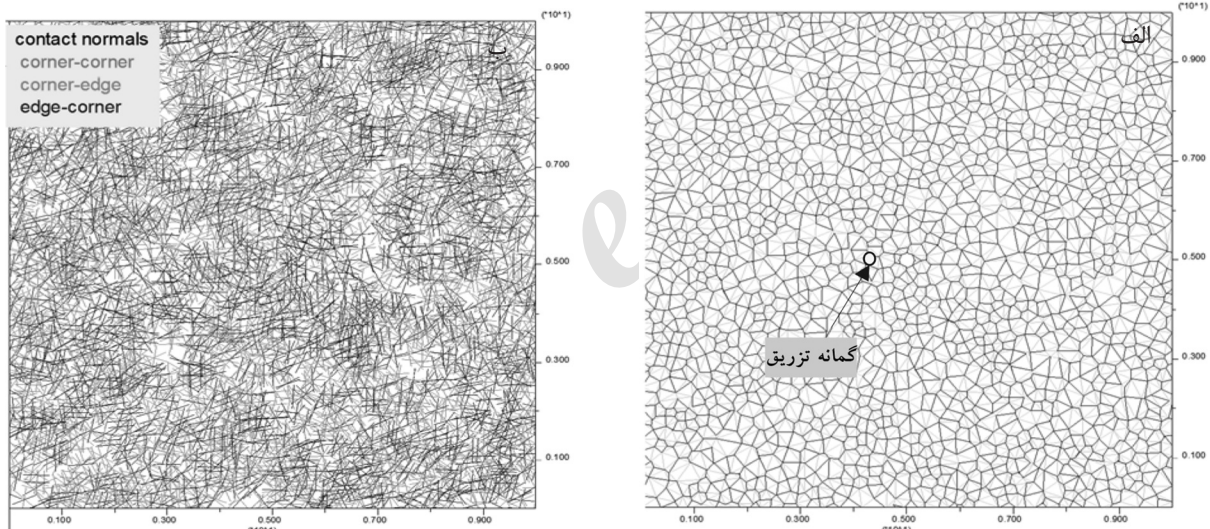


شکل ۱ هندسه مدل عددی

1. Tessellation
2. Contact Element
3. Kristianovich-Geertsma-de Klerk

جدول ۱ پارامترهای در نظر گرفته شده در مدل عددی

مقدار	واحد	پارامتر
۲۵۰۰	kg/m ³	دانسیتة سنگ بکر
۲۰	GPa	مدول الاستیسیتة سنگ بکر
۰/۲۵	-	نسبت پواسن سنگ بکر
۴	MPa	چسبندگی
۴۰	درجه	زاویه اصطکاک داخلی
۳۲۰	GPa/m	سختی نرمال ناپیوستگی‌ها
۱۲۸	GPa/m	سختی برشی ناپیوستگی‌ها
۱۰	μm	بازشدگی اولیه ناپیوستگی‌ها
۱	μm	بازشدگی باقیمانده ناپیوستگی‌ها
۱۰۰۰	kg/m ³	دانسیتة سیال
۲	cP	ویسکوزیتة سیال



شکل ۲ الف) محل‌المان‌های تماسی و ب) شبکه شکستگی‌های مجزا به‌همراه مش‌بندی بلوک‌های مجزا

(L)، توسط رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۱۳]:

$$L = 0.539 \left(\frac{q^3 E'}{\mu h_f^3} \right)^{\frac{1}{6}} t^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

که در آن q دبی جریان، E' مدول الاستیسیتة در حالت کرنش صفحه‌ای، μ ویسکوزیتة دینامیکی سیال، h_f ارتفاع شکستگی و t زمان تزریق می‌باشد. لازم به ذکر است با توجه به مدل‌سازی در دو بعد و به‌صورت کرنش صفحه‌ای، مقدار h_f برابر واحد در نظر گرفته شده است.

1. Pay-zone

در این مدل فرض می‌شود که شکستگی با ارتفاع ثابت در ناحیه تولیدی^۱ با میزان تنش محصورکننده مناسب (یعنی تنش‌ها در بالا و پایین منطقه تأثیر به اندازه کافی بزرگ هستند تا از گسترش شکستگی خارج از منطقه تأثیر جلوگیری به عمل آید)، گسترش می‌یابد [۱]. بنابراین با توجه به در نظر گرفتن مدل به‌صورت کرنش صفحه‌ای، ارتفاع شکستگی ثابت و سرعت تزریق ثابت (پیوستگی جریان) از این مدل جهت اعتبارسنجی نتایج استفاده شده است. مقدار طول گسترش یافته شکستگی

انجام شد. نتایج آنالیزها در شکل ۷ نشان داده شده است. بایستی توجه شود که برای تحلیل حساسیت، هم‌زمان با تغییر خواص ماده سنگ، خاصیت متناظر با آن پارامتر در ناپیوستگی‌ها (سختی نرمال و برشی) نیز تغییر می‌کند؛ چرا که ترکیب خواص ماده سنگ با ناپیوستگی‌ها نشان‌دهنده خواص کل مدل در روش DFN ارائه شده در این مقاله است.

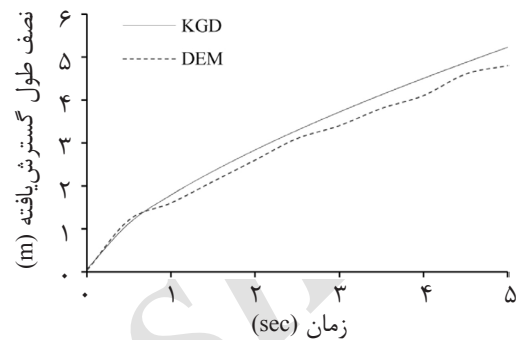
مطابق شکل ۷ چنین برداشت می‌شود که:

- مقدار چسبندگی (سنگ بکر توام با درزه‌های موهومی) تاثیر ناچیزی بر طول شکاف هیدرولیکی از خود نشان می‌دهد. اما از طرفی با مقایسه مقدار بازشدگی شکاف هیدرولیکی در مقادیر چسبندگی متفاوت، مشاهده شد که با افزایش چسبندگی، مقدار بازشدگی شکاف هیدرولیکی کاهش می‌یابد. به عبارتی، تاثیر افزایش مقاومت برشی ناشی از افزایش مقدار چسبندگی در مقدار بازشدگی شکاف هیدرولیکی خود را نشان می‌دهد (شکل ۸).

- با افزایش زاویه اصطکاک داخلی سنگ، مقدار طول شکستگی کاهش می‌یابد و اثر آن برای مقادیر بیشتر از ۴۰ درجه، تقریباً ثابت می‌ماند. در واقع با افزایش زاویه اصطکاک داخلی سنگ و درزه‌های موهومی، مقدار مقاومت برشی افزایش یافته و بنابراین به نیروی برشی بیشتری جهت گسترش شکاف نیاز است. این مطلب نیز به نحوی دیگر برای ورود آب به تونل در محیط‌های ناپیوسته توسط ایوارس ثابت شده است. او نشان داد که با افزایش زاویه اصطکاک داخلی سنگ، میزان بیشینه جابه‌جایی برشی بر روی درزه‌ها کاهش یافته و بنابراین جریان ورودی به داخل تونل، کاهش می‌یابد [۱۴].

- با افزایش مدول الاستیسته سنگ، طول شکست هیدرولیکی افزایش می‌یابد. دلیل این مطلب را می‌توان در ارتباط مدول الاستیسته با تردی سنگ بیان نمود. در واقع با افزایش مدول الاستیسته سنگ، مقدار تردی آن افزایش یافته و از آنجایی که گسترش شکستگی با تردی سنگ در ارتباط است، مقدار طول شکستگی بیشتر می‌شود.

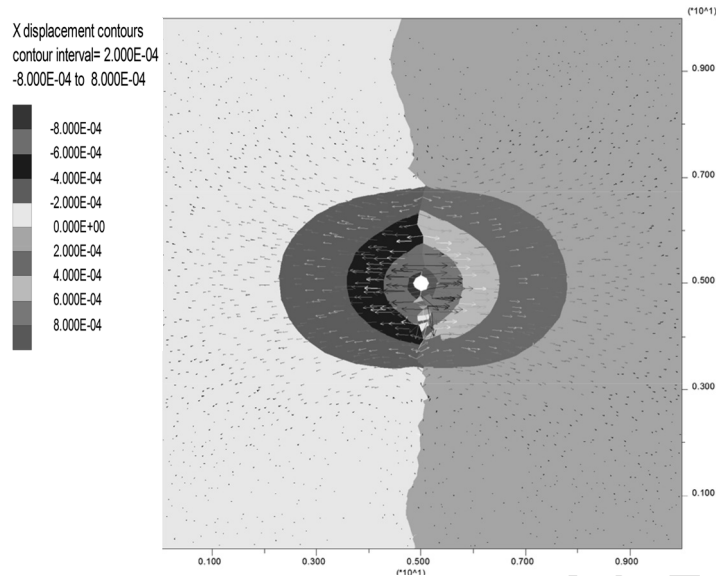
در شکل ۳، مقایسه نتایج مدل تحلیلی و عددی نشان داده شده است. مطابق شکل ۳، نتایج عددی مطابقت خوبی با مدل تحلیلی دارد (کمتر از ۱۰٪ اختلاف) و می‌توان از این روش جهت مدل‌سازی گسترش شکست هیدرولیکی استفاده کرد.



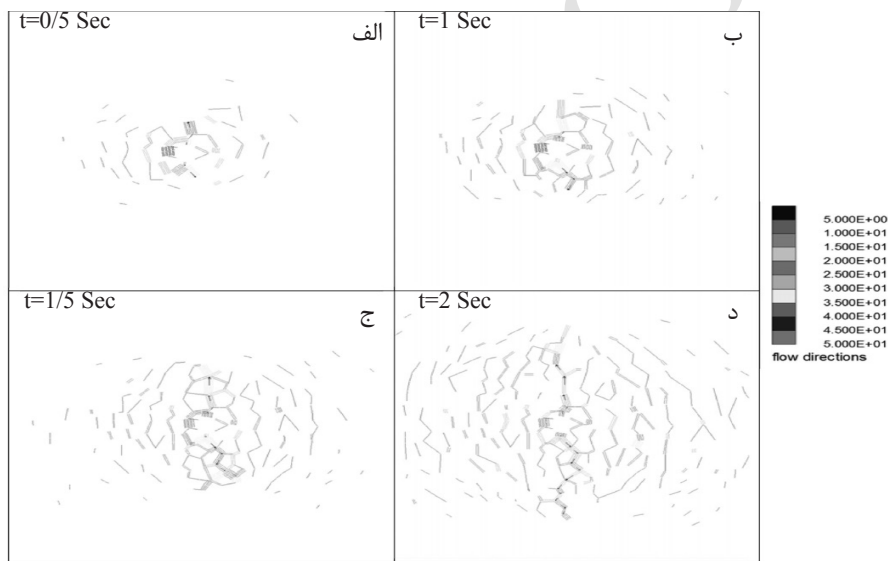
شکل ۳ مقایسه نمودار طول توسعه یافته - زمان در مدل‌های تحلیلی و عددی

بررسی تاثیر پارامترهای مکانیک سنگی در شکست هیدرولیکی

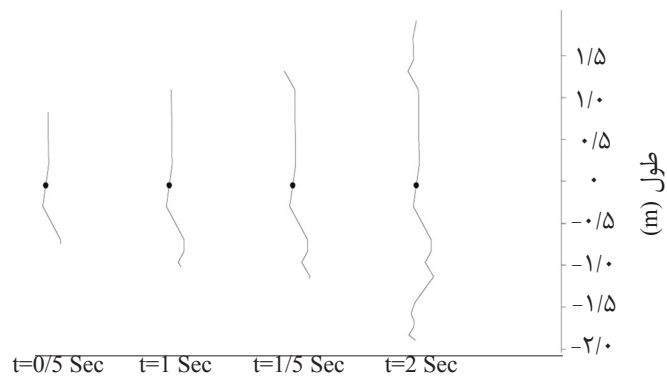
در ابتدا به منظور بررسی پارامترهای مکانیک سنگی بر فرآیند شکست هیدرولیکی، مدل‌های عددی متفاوتی با پارامترهای مختلف ساخته شد. با توجه به زمان محاسباتی بالا و همچنین فرضیات در نظر گرفته شده در روش تحلیلی، تنها ۲ ثانیه اول تزریق مدل‌سازی شد. شکل ۴، روند جابه‌جایی‌های افقی را نشان می‌دهد. مطابق شکل، جابه‌جایی‌ها به صورت متقارن از مرکز چاه اتفاق افتاده است. همچنین بردار جابه‌جایی‌ها در جهت تنش افقی حداقل می‌باشد که نشان‌دهنده رشد ترک در جهت عمود بر آن می‌باشد. به راحتی این مطلب از شکل‌های ۵ و ۶ که نشان‌دهنده گسترش شکاف (بازشدگی درزه‌ها) و توزیع فشار منفذی در شبکه ناپیوستگی‌ها در طول زمان تزریق سیال است، برداشت می‌شود. مطابق این اشکال، گسترش شکست هیدرولیکی در جهت تنش افقی اصلی حداکثر بوده که خود تاکید بر صحت نتایج مدل عددی است. در مرحله بعد، تحلیل حساسیت برای سه خواص مکانیک سنگی شامل چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و مدول الاستیسته



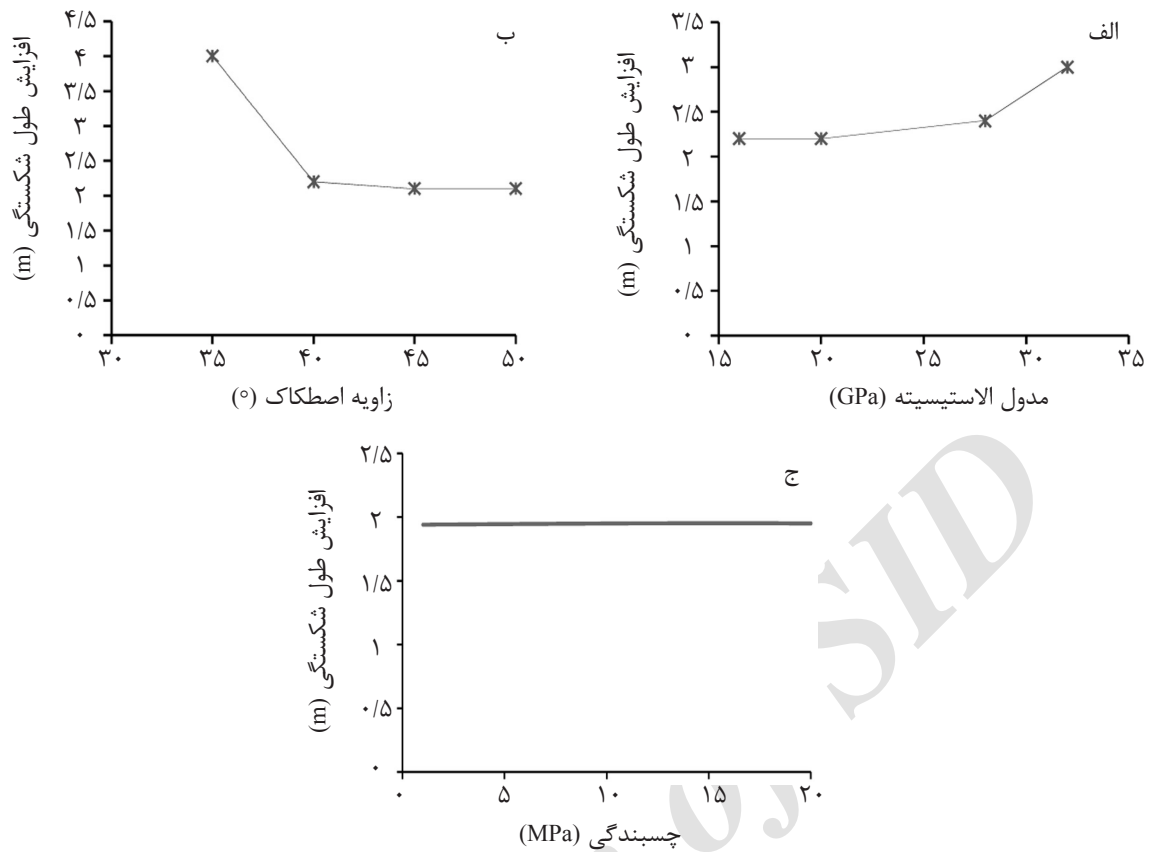
شکل ۴ نمو جابه‌جایی‌های افقی و بردار جابه‌جایی‌ها



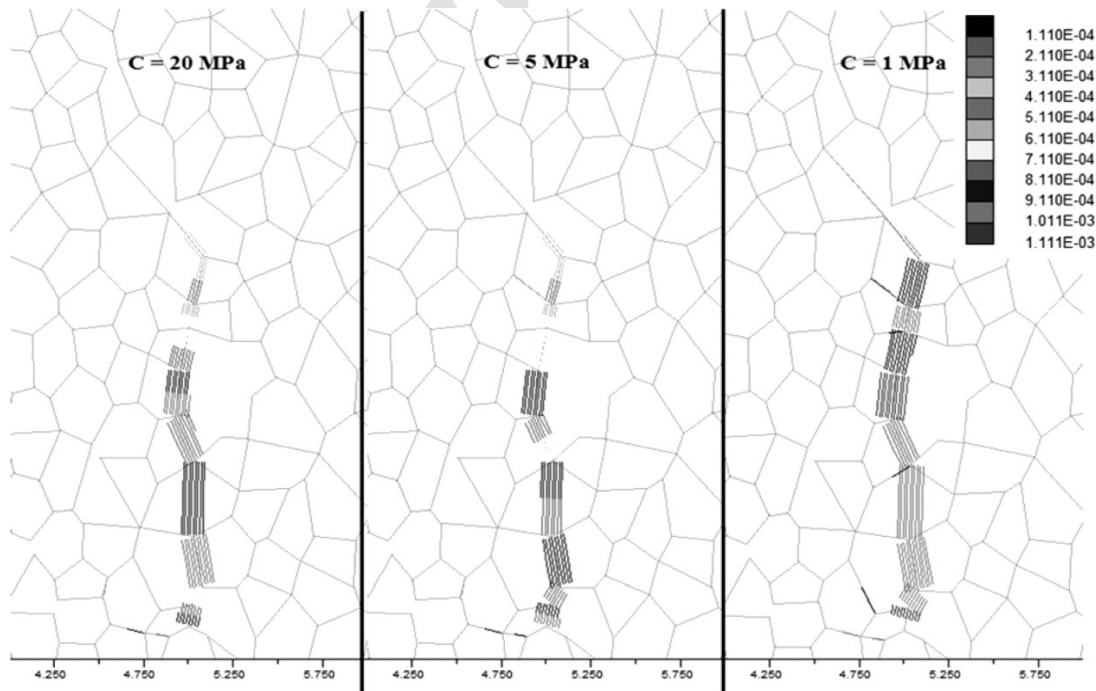
شکل ۵ توزیع فشار منفذی در طول زمان تزریق سیال



شکل ۶ گسترش شکاف (بازشدگی درزه‌ها) در طول زمان تزریق



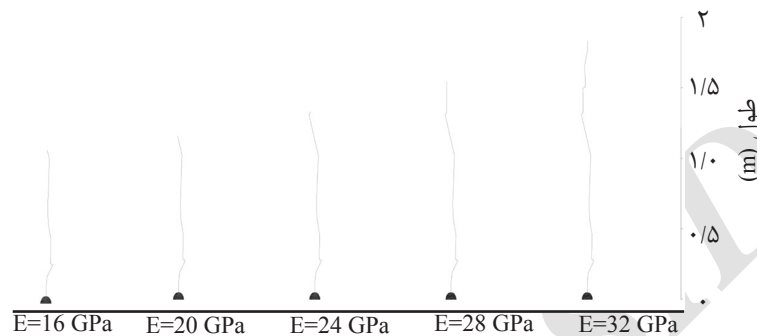
شکل ۷ تحلیل حساسیت پارامترهای مختلف مکانیک سنگی برای افزایش طول نیم شکاف هیدرولیکی



شکل ۸ کاهش مقدار بازشدگی نیم شکاف هیدرولیکی با افزایش چسبندگی

شکستگی القایی در طول شکستگی مخزن راحت تر فرم می گیرد. این مطلب نیز در رابطه تحلیلی (۱) مشخص است. افزایش طول شکستگی هیدرولیکی در شکل ۹ به تصویر کشیده شده است.

ارتباط بین اندیس تردی با گسترش ترک توسط آزمایش های صورت گرفته توسط لیو و همکاران ثابت شده است [۱۵]. به عبارتی دیگر، هر چه تردی سنگ بیشتر باشد، گسترش شکست هیدرولیکی راحت انجام می شود. بنابراین شبکه



شکل ۹ گسترش نیم شکاف با افزایش مدول الاستیسیته سنگ (E)

به علت ارتباط مستقیم آن با تردی سنگ باعث افزایش طول شکستگی هیدرولیکی و افزایش زاویه اصطکاک باعث کاهش طول شکستگی هیدرولیکی در عملیات شکست هیدرولیکی می شود. همچنین چسبندگی تاثیر ناچیزی بر طول گسترش یافته شکست هیدرولیکی دارد. بایستی توجه شود که این نتایج همگی مربوط به بررسی نقش خواص ژئومکانیکی در عملیات شکست هیدرولیکی است و این امر می تواند با عملیات شکست مکانیکی متفاوت باشد.

نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از مدل اجزای مجزای DFN و با در نظر گرفتن خواص ناپیوستگی ها به صورت خواص معادل با ماده سنگ، مدل سازی دو بعدی عددی گسترش شکستگی در عملیات شکست هیدرولیکی انجام شد. پس از اعتبارسنجی نتایج مدل عددی با یک مدل تحلیلی، نقش خواص ژئومکانیکی سنگ در فرآیند گسترش شکست هیدرولیکی بررسی شد. نتایج مدل سازی های عددی نشان دادند که افزایش مدول الاستیسته

مراجع

- [1]. Guo B., Lyons C. W., Ghalambor A., "Petroleum production engineering," Louisiana: Elsevier Science & Technology Book, pp. 507-514, 2007.
- [2]. Economides M., "Evaluation of impacts to underground sources of drinking water by hydraulic fracturing of coalbed methane reservoirs", Department of Energy," pp. 2-24, 2004.
- [3]. Basirat R. and Goshtasbi K., "The capabilities of different numerical methods to predict the crack propagation by hydraulic fracturing in hydrocarbon reservoirs," 2nd National Conference on Petroleum Geomechanics, Tehran, Iran [in Farsi], 2017.

- [۴]. پاک ع. و صمیمی س.، "ارزیابی رویکردهای مختلف در پیش‌بینی الگوی ترک در عملیات ایجاد شکاف هیدرولیکی در مخازن نفتی و ارائه یک رویکرد جدید"، پژوهش نفت، شماره ۷۲، صفحه ۷۳-۵۸، ۱۳۹۱.
- [5]. Nagel N., Gill I., Sanches Nagel M. and Damjanac B., "Simulating hydraulic fracturing in real fractured rock overcoming the limits of pseudoo3D models," Paper SPE 140480 Presented at SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, Woodlands, Texas, USA, 2011.
- [6]. Yao Y., "Linear elastic and cohesive fracture analysis to model hydraulic fracture in brittle and ductile rocks," Rock Mechanics and Rock Engineering Journal, Vol. 45, No. 3, pp. 375-387, 2012.
- [7]. Zhang, X. and Jeffrey, R.G. "Fluid-driven multiple fracture growth from a permeable bedding plane intersected by an ascending hydraulic fracture," Journal of Geophysical Research, Vol. 117, B12402, doi:10.1029/JB009609, 2012.
- [8]. Behnia M., Goshtasbi K., Fatehi Marji M. and Golshani A., "On the crack propagation modeling of hydraulic fracturing by a hybridized displacement discontinuity/boundary collocation method," Journal of Mining and Environment, Vol. 2, No.1, pp. 1-16, 2011.
- [9]. Behnia M., Goshtasbi K., Fatehi Marji M. and Golshani A., "Numerical simulation of interaction between hydraulic and natural fractures in discontinuous media," Acta Geotechnica, DOI 10.1007/s11440-014-0332-1, 2014.
- [10]. Behnia M., Goshtasbi K., Zhang G. and Mirzeinaly Yazdi S. H., "Numerical modeling of hydraulic fracture propagation and reorientation," European Journal of Environmental and Civil Engineering, Vol. 19, No. 2, pp. 152-167, DOI: 10.1080/19648189.2014.939306, 2015.
- [11]. Jing L. and Stephansson O., "Fundamentals of discrete element methods for rock engineering: Theory and applications (developments in geotechnical engineering)," Amsterdam: Elsevier, 2007.
- [12]. Wang S., "Fundamental studies of the deformability and strength of jointed rock masses at three dimensional level," PhD Dissertation, University of Arizona, Tucson, 1992.
- [13]. Economides M. J., Valkó J. P., Oligney R. E., "Unified fracture design: bridging the gap between theory and practice," Orsa Press, 2002.
- [14]. Ivars D. M., "Water inflow into excavations in fractured rock-a three-dimensional hydro-mechanical numerical study," International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. Vol. 43, pp. 705-725, 2006.
- [15]. Liu G., Zhang J., Lu H., Li S., Wu T. and Meng Z., "Evaluation of rock mechanical properties to assist hydraulic fracturing in a tight oil reservoir," Materials Research Innovations, Vol. 19, sup. 8, S8-260-S8-267, 2015.