

مقاله پژوهشی

بررسی عددی تأثیر ناپیوستگی‌های طبیعی در فرآیند شکست هیدرولیکی با اعمال شبکه شکستگی‌های مجزا

مجید نیکخواه^{۱*}؛ علی کاظمی^۲؛ مجتبی حیدری^۳

۱. استادیار؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد؛ مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود
۳. دانشجوی کارشناسی ارشد؛ شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب ایران

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۲۴ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۱۹

شناسه دیجیتال (DOI): 1022107./JPG.2022.329582.1159

چکیده

با افزایش نیاز به انرژی و با توجه به وابستگی صنایع مختلف به سوخت‌های فسیلی، صنعتگران در حوزه نفت و گاز را بر آن واداشت تا در اندیشه افزایش میزان تولید از میدان‌های فعلی قرار گیرند. روش‌های جدیدی بدین منظور برای مخازن نفت و گاز ارائه شدند، که از جمله مهم‌ترین آن‌ها به کارگیری روش شکست هیدرولیکی است. عوامل متعددی می‌تواند در شرایط ایجاد شکاف و هندسه آن اثرگذار باشند، که می‌توان به وجود شکستگی‌های طبیعی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین موارد مؤثر اشاره کرد. ویژگی‌های هندسی شکستگی‌های طبیعی می‌تواند بر روی نحوه اجرا عملیات و نوع شکاف هیدرولیکی ایجاد شده مؤثر واقع شود؛ از این رو مطالعه آن‌ها پیش از انجام عملیات اجتناب‌ناپذیر است. در این مطالعه شکستگی‌های طبیعی با استفاده از شبکه شکستگی‌های مجزا و فرآیند شکافت هیدرولیکی با استفاده روش عددی اجزا مجزا مورد بررسی قرار گرفته است. در این بررسی ویژگی‌های هندسی شکستگی‌ها از قبیل چگالی، طول شکستگی و جهت‌داری و تأثیر آن بر شکستگی هیدرولیکی مورد مطالعه واقع شده است. نتایج گویای آن است که خصوصیات شبکه شکستگی مجزا و هندسه شکستگی‌ها می‌تواند عملیات شکست هیدرولیکی را تحت تأثیر قرار داده و نتایج را کنترل کرده و در اغلب موارد نتایج امیدبخشی را در تخمین پاسخ مخزن نسبت به تزریق سیال فراهم کند.

واژگان کلیدی

شکست هیدرولیکی،
شکستگی‌های طبیعی،
شبکه شکستگی‌های
مجزا،
روش اجزای مجزا

۱. پیش‌گفتار

فناوری شد (Montgomery et al., 2010). شکست هیدرولیکی در سنگ هنگامی ایجاد می‌شود که فشار سیال درون سنگ از تنش اصلی حداقل به اضافه مقاومت کششی سنگ بیشتر شده که منجر به شکستگی کششی سنگ می‌شود. با ادامه تزریق و افزایش فشار، سازند شکافته شده و شکستگی در جهت حداقل مقاومت گسترش می‌یابد. این حداقل مقاومت در جهت تنش افقی حداکثر و عمود بر تنش افقی حداقل رخ می‌دهد (Fjar et al., 2021). اندازه و جهت شکستگی ایجاد شده و همچنین بزرگی فشار موردنیاز جهت ایجاد آن،

شکست (شکافت) هیدرولیکی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین روش‌های تحریک مخازن نفتی، گازی و هیدروترمال به شمار می‌رود. این روش شامل تزریق سیال با فشارهای به‌اندازه کافی به درون چاه به‌منظور ایجاد شکاف و گسترش آن درون سازند است. پس از این‌که روش شکست هیدرولیکی در سال ۱۹۴۹ توسط کلارک معرفی گردید (Clark et al., 1949). در ۱۹۴۹ شرکت هالیبرتون برای اولین بار دو عملیات شکست هیدرولیکی را در اوکلاهاما و تگزاس با موفقیت اجرا کرد که زمینه‌ساز توسعه این صنعت در ایالات‌متحده آمریکا شد و زمینه‌ساز گسترش این

DDM^1 اندرکنش بین شکست هیدرولیکی و شکستگی طبیعی را مطالعه کردند. آن‌ها توانستند لغزش برشی شکستگی هیدرولیکی را در حضور شکستگی طبیعی با در نظر گرفتن دو شکستگی موازی به‌عنوان شکستگی طبیعی بررسی کرده و نشان دادند که شکستگی هیدرولیکی می‌تواند در محل تقاطع با شکستگی طبیعی از آن عبور کند (Jeffrey et al. 1987). ژانگ و همکاران در سال ۲۰۰۷ از مدل دوبعدی DDM با لحاظ کردن تغییر شکل‌پذیری الاستیک و رفتار توأمان هیدرومکانیکی و در نظر گرفتن لغزش برشی، به بررسی اندرکنش بین شکستگی هیدرولیکی و طبیعی پرداختند. در این مدل مش‌بندی تنها بر روی شکستگی‌ها انجام شده است. به‌منظور کاهش عدم قطعیت نتایج و بالا بردن صحت آن‌ها، مش‌بندی با رشد ترک تغییر کرده و در هر گام به‌روز شده است (Zhang et al. 2007).

طالقانی در سال ۲۰۰۹ با استفاده از $XFEM^2$ گسترش شکستگی بدون وابستگی به مش‌بندی مجدد را مطالعه کردند. در این ارتباط سه حالت ممکن برای اندرکنش بین شکست هیدرولیکی و شکستگی طبیعی در نظر گرفته شده و مدلی جدید بر اساس نرخ انرژی آزاد شده به‌منظور گسترش ترک در $XFEM$ گنجانده شده است. نتایج حاصل از مطالعه رفتار توأمان هیدرولیکی نشان‌گر این بوده که برای رشد ترک در داخل شکستگی طبیعی با بررسی گرادپان فشار در نقطه تقاطع، فشار و انرژی بیشتری نیازمند است. تأثیر جهت‌داری شکستگی طبیعی، محل تزریق، ویسکوزیته سیال و ناهمسانگردی تنش در منطقه مورد مطالعه قرار گرفته و نقش به‌سزای هر یک از این پارامترها نشان داده شد؛ و مشخص شد که ناهمسانگردی تنش بر گسترش ترک نقش پررنگ‌تری را ایفا می‌کند (Taleghani, 2009).

کشاورزی و همکاران در سال ۲۰۱۲ اذعان داشتند که الگوی هندسه شکستگی هیدرولیکی به دلیل وجود شکستگی‌های طبیعی می‌تواند بسیار پیچیده باشد و در مسیر خود منحرف شود. به‌منظور مدل‌سازی از $XFEM$ استفاده کرده و شرایط الاستیک و کرنش صفحه‌ای از جمله فرضیات این مسئله بوده است. نتایج حاصل از مطالعات نشان داد که عواملی چون تنش تفاضلی افقی، فشار شبکه و جهت‌داری شکستگی‌های طبیعی

تحت تأثیر تنش‌های برجای موجود در آن ناحیه است (Nolen-Hoeksema, 2013). هابرت و ویلیس طی مطالعات آزمایشگاهی در خصوص جهت‌یافتگی شکستگی هیدرولیکی به این نتیجه رسیدند که شکستگی ایجاد شده توسط عملیات شکست هیدرولیکی در راستای عمود بر محور تنش حداقل خواهد بود (Hubbert and Willis, 1954). در مخازن شکافدار، مسیر جریان از شکستگی‌های باز عبور کرده و لذا مکانیزم تولید به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای با مخازن بدون شکاف متفاوت است. زمانی که فشار مخزن افت می‌کند، شکستگی‌ها بسته شده و می‌تواند تأثیر شگرفی در نحوه رشد و هندسه ترک در شکست هیدرولیکی داشته باشد؛ بنابراین بررسی خواص این شکستگی‌ها و هندسه آن‌ها برای طراحی عملیات شکست بسیار ضروری است (Gu et al., 2011).

به‌منظور درک مکانیزم شکست هیدرولیکی و بهبود طرح‌ها، انجام مدل‌سازی برای پیش‌بینی شکستگی‌های تحریک شده بسیار حائز اهمیت است (Chen et al., 2021). در نتیجه شکستگی‌های طبیعی از جمله عواملی است که می‌تواند شرایط انجام شکست هیدرولیکی را با محدودیت مواجه سازند. با توجه به اینکه شرایط هندسی شکستگی‌ها و نحوه قرارگیری آن‌ها در مخزن، می‌تواند رخداد‌های متفاوتی را در فرآیند شکست هیدرولیکی به وجود بیاورند. همچنین شبکه شکستگی مجزا با در نظر گرفتن توابع توزیع آماری مربوط به پارامترهای معرف شکستگی، شکستگی‌ها را به صورت کاملاً تصادفی تولید و در سنگ توزیع می‌کند که می‌تواند شرایطی را نزدیک تر با شرایط طبیعی توده سنگ ایجاد کند. اغلب نرم افزارهای تخصصی شکستگی‌های موجود در توده سنگ به‌طور سیستماتیک تعریف می‌شوند و رویکرد تصادفی بودن تولید شکستگی را نداشته و رفتار و خواص شکستگی‌ها نیز یکسان در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر پارامترهای هندسی شکستگی‌های طبیعی بر شکست هیدرولیکی، از شبکه شکستگی‌های مجزا و روش عددی اجزای مجزا استفاده شده است.

۲. کارهای مرتبط

جفری و همکاران در سال ۱۹۸۷ با استفاده از مدل دوبعدی

¹ displacement discontinuity method

² Extended Finite Element Method

طبیعی پرداختند. اظهار داشتند که شبکه سه بعدی شکستگی می تواند یک بیان واقع گرایانه داشته باشد اما به صورت فرم ساده ای از مدل توأمان هیدرو مکانیکی باشد. خصوصیات شبکه شکستگی ها، نفوذ سیال را زمانی که تحت تأثیر فشار ناشی از تزریق سیال باقی مانده است، کنترل می کند. روش های مدل سازی با استفاده از ابزار شبکه شکستگی مجزا می تواند به امکانات جدیدی برای کارایی های شکست هیدرولیکی با یک طرح مطلوب و منطقی و با توجه به پیچیدگی های موجود زمین شناسی منجر شود. در این مطالعه با بررسی تأثیر اندازه شکستگی نشان دادند که وجود شکستگی های بزرگ می تواند باعث ایجاد محلی سازی جریان و اشکال نامتقارن حجم تحریک شده شود (Katsaga et al. 2015).

بصیرت و همکاران حالت های اندرکنش بین شکست هیدرولیکی و شکستگی طبیعی را با استفاده از المان مجزا شبیه سازی کرده و پارامترهای مؤثر در مکانیزم اندرکنش را مورد مطالعه قرار دادند (Basirat et al., 2019). لی در سال ۲۰۲۰ یک مدل توأمان *DFN-DEM* مبتنی بر شکستگی مجزا را برای شبیه سازی اندرکنش بین شکست هیدرولیکی و سیستم شکستگی طبیعی در شیل ارائه داد. در این مطالعه تحلیل حساسیت شبیه سازی عددی برای بررسی اثرات طول شکستگی هیدرولیکی، فاصله داری شکستگی و زاویه اصطکاک داخلی انجام گرفته است. پیرهوشیاران و نیکخواه اندرکنش شکست هیدرولیکی و درزه های طبیعی را با بهره گیری از هیدرو مکانیک توأمان با استفاده از روش عددی المان مجزا مبتنی بر مدل پیوند ذرات^۳ و روش درزه صاف^۴ توسط نرم افزار *PFC* مورد مطالعه قرار دادند. در این ارتباط تحلیل حساسیت نسبت به زاویه میل درزه نسبت به راستای گسترش شکست هیدرولیکی، مقاومت درزه های طبیعی و نسبت تنش های برجا صورت گرفته است (Pirhooshyaran and Nikkha, 2021).

در سال ۲۰۲۱ هوو و همکاران یک مدل هیدرو مکانیکی توأمان کامل را برای انتشار شبکه شکست هیدرولیکی پیچیده بر اساس روش تحلیل تغییر شکل ناپیوسته (*DDA*) ارائه کردند. در این مدل انتشار شکستگی و تغییر شکل توده سنگ بر اساس *DDA* شبیه سازی شده و شبکه شکستگی طبیعی با استفاده از مدل شبکه شکستگی مجزا (*DFN*) در نظر گرفته شده است. سپس

می تواند انحراف شکستگی هیدرولیکی را کنترل کند. بدین صورت که افزایش فشار شبکه منجر به کاهش انحراف شکستگی هیدرولیکی و کاهش تنش تفاضلی، موجب افزایش میزان انحراف شبکه خواهد شد (Keshavarzi et al. 2012). پیترو و بوجلسدیجک در سال ۲۰۰۵ برای بررسی رفتار توأمان هیدرو مکانیکی اندرکنش بین شکستگی هیدرولیکی و طبیعی از روش اجزا مجزا استفاده کرده و نشان دادند می توان از این روش به منظور بررسی شرایط حاکم بر رفتار آن ها در عملیات شکست هیدرولیکی چند مرحله ای استفاده کرد. در این مطالعه المان ها صلب و نقاط تماس آن ها الاستیک در نظر گرفته شده است (Pater and Beugelsdijk, 2005). بی هاید و همکاران در سال ۲۰۱۲ با استفاده از برنامه سه بعدی اجزا مجزا (*3DEC*) به بررسی هرزروی سیال به هنگام عملیات شکست هیدرولیکی بر روند تغییرات باز شدگی شکستگی در حضور شکستگی های طبیعی پرداختند. در این مدل سازی از دودسته درزه استفاده شده است. نتایج آن ها نشان می دهد که با کاهش میزان هرزروی سیال، فشار شبکه افزایش یافته و در ادامه آن باز شدگی شکستگی های درگیر، بیشتر می شود (Bhide et al., 2012). دونز و همکاران در سال ۲۰۱۶ از مدل *3DEC* استفاده کرده و تأثیر ناشی از تغییرات جهت داری شکستگی طبیعی نسبت به شکستگی هیدرولیکی مطالعه کردند. شیب شکستگی طبیعی به عنوان پارامتری اساسی از جهت داری شکستگی پژوهش آن ها مورد بررسی قرار گرفته است. آن ها بیان داشتند که با افزایش میزان زاویه شیب، جریان سیال تمایل بیشتری به باز کردن شکستگی های طبیعی را داراست (Donze et al., 2016). ریاحی و دومنک در سال ۲۰۱۳ با استفاده از برنامه دو بعدی اجزا مجزا (*UDEC*) و شبکه شکستگی های مجزا به بررسی پارامترهایی چون توزیع اندازه شکستگی، جهت داری تنش های برجا و نرخ تزریق بر فرآیند شکست هیدرولیکی ارزیابی کردند. در این مطالعه نشان داده شده است که موفقیت فرآیند شکست به بسیاری از شرایط موجود، مانند اندازه و جهت گیری تنش های برجا، خصوصیات شبکه شکستگی ها و خواص آن ها وابستگی دارد (Riahi and Damjanac, 2013). کاتساگا و همکاران در سال ۲۰۱۵ با استفاده از نرم افزار *3DEC* و شبکه شکستگی های مجزا به مدل سازی شکست هیدرولیکی در مخازن شکسته

³ Bonded Particle Model

⁴ Smooth joint Method

۱.۳ تولید تصادفی جهت داری

جهت‌داری معمولاً از تابع توزیع فیشر^۵ تبعیت می‌کند. اگر θ زاویه انحراف از میانگین شیب و جهت شیب باشد، تابع توزیع فیشر به شکل زیر است:

$$\theta = \cos^{-1} \left\{ \frac{\ln[e^k - F(e^k - e^{-k})]}{k} \right\}$$

در این تابع توزیع k ثابت فیشر است که انحراف جهت داری از یک مقدار میانگین شیب و جهت شیب دسته درزه‌ها را نشان می‌دهد (Baghbanan and Jing, 2007).

۲.۳ تولید تصادفی اندازه شکستگی

طول خط اثر عموماً از تابع توزیع نمایی منفی تبعیت می‌کند که تابع توزیع آن به فرم زیر است:

$$n(l) = \alpha \cdot l^{-\alpha}$$

پارامتر α چگالی شکستگی‌ها را بر اساس محدوده تغییرات اندازه شکستگی نشان می‌دهد. هرچه مقدار این پارامتر بیشتر شود، شکستگی‌های بزرگ مقدار به نسبت شکستگی‌های کوچک بیشتر می‌شوند. به منظور استفاده از این تابع توزیع، حد بالا و پایین شکستگی از لحاظ اندازه اعمال خواهد شد. در این تابع توزیع دو مقدار l_{min} عنوان کوچک‌ترین مقدار شکستگی و l_{max} به عنوان بزرگ‌ترین اندازه شکستگی تعریف می‌شود. (Katsaga et al., 2015)

در این مطالعه برای تولید شکستگی‌ها و به منظور نزدیک شدن هندسه شکستگی‌ها به واقعیت از شبکه شکستگی مجزا استفاده شده است. همان‌طور که پیش از این شرح داده شد، شبکه می‌تواند با استفاده از یک رویکرد تصادفی و بهره‌گیری از توابع توزیع احتمالاتی، شکستگی‌های نزدیک‌تر به شرایط واقعی زمین را تولید کند. پارامترهای آماری که شبکه شکستگی‌های مجزا را تعریف می‌کند شامل تابع توزیع اندازه شکستگی، جهت‌داری و چگالی است. مدل فرضی شامل دو دسته درزه بوده که هر یک با یک نوع جهت‌گیری ثابت شده‌اند که برای تعیین جهت‌داری شکستگی‌ها از تابع توزیع فیشر استفاده شده است. هر یک از دسته درزه‌ها با زاویه شیب ۷۵ درجه و جهت شیب ۴۵ و ۱۳۵ درجه تعریف شده‌اند. توزیع اندازه شکستگی از تابع توزیع نمایی منفی تبعیت می‌کند. به منظور استفاده از این تابع، می‌بایست پارامترهای α ، طول بیشینه و کمینه شکستگی‌ها تعریف شوند.

مدل پیشنهادی برای مدل‌سازی مطالعه موردی شکست هیدرولیکی در مخازن شیل با شکستگی طبیعی به کار گرفته شده است (Hu et al., 2021). نرم افزار PFC مبتنی بر المان مجزاء برای بررسی مکانیزم‌های میکروسکوپی شکست هیدرولیکی مناسب است، در حالی که نرم افزار 3DEC ظرفیت بالایی را برای در نظر گرفتن یک شبکه شکستگی پیچیده دارد (Chen et al., 2021).

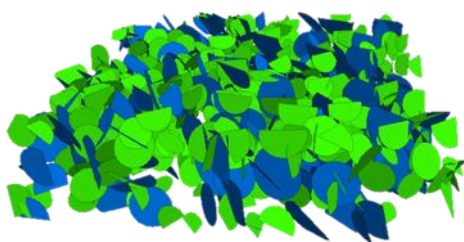
۳. شبکه شکستگی‌های مجزا

در کاربردهای مختلف مهندسی سنگ، شناخت دقیق سیستم‌های شکستگی‌ها در توده سنگ از اهمیت بالایی برخوردار بوده و الزامی است. به دلیل وجود تعداد زیاد شکستگی‌ها و عدم قطعیت در خصوصیات هندسی آن‌ها، برداشت کامل ناپیوستگی‌ها و مدل‌سازی سیستم ناپیوستگی‌های توده سنگ امکان پذیر نیست. بدین منظور مدل هندسی ناپیوستگی‌های توده سنگ با رویکردی تصادفی و استفاده از شبکه شکستگی‌های مجزا تهیه می‌گردد (میرزایی نصیر آباد، ۱۳۹۱). این روش، ابتدا در سال ۱۹۸۰ در دو حالت دو بعدی و سه بعدی معرفی شد (Jing and Stephansson, 2007). شبکه شکستگی‌های مجزاء، ابزاری است که این امکان را می‌دهد که در یک شبکه با شکستگی‌های متصل، فرآیند جریان سیال و انتقال آن نیز بررسی شود. از این رو می‌تواند ابزار مناسبی برای شبیه‌سازی شکستگی‌ها در شبیه‌سازی فرآیند شکست هیدرولیکی باشد (Jing and Stephansson, 2007). ارتباط هیدرولیکی بین شکستگی‌ها بسیار غیر قابل پیش‌بینی بوده و تا حد زیادی به خصوصیات هندسی شکستگی‌ها بستگی دارد. شکستگی‌های زیادی ممکن است در نزدیکی صفحه شکست هیدرولیکی وجود داشته باشند و عملاً هیچ‌گونه ارتباط هیدرولیکی با توجه به همجواری نداشته باشند؛ اما ممکن است شکستگی‌هایی که بسیار فاصله داشته، دارای ارتباط هیدرولیکی قوی باشند. با در نظر گرفتن شبکه شکستگی‌های مجزاء نتایج بهتری در مورد ارتباط هیدرولیکی بین شکستگی‌ها حاصل می‌شود (McClure and Horne, 2013). خصوصیات هندسی شکستگی‌ها از توابع توزیع آماری تبعیت می‌کنند و ابتدایی‌ترین مرحله به منظور ساخت شبکه شکستگی مجزاء، شناخت و تعریف این توابع توزیع مطابق با خصوصیات هندسی شکستگی‌هاست که در ادامه شرح داده می‌شود.

⁵ fisher distribution function

جدول ۳. ویژگی‌های دسته درزه ۲

Joint set 2	
Fisher constant	5
Dip	75
Dip direction	135
Powerlaw distribution exponent	4
Minimum joint tracelength	20
Maximum joint tracelength	30
P32	0.03



شکل ۱. DFN ایجاد شده در 3DEC

۴. مدل‌سازی عددی

روش عددی مورد استفاده المان مجزا (DEM) و با استفاده از نرم‌افزار 3DEC خواهد بود که محیط را از بلوک‌هایی نفوذناپذیر که با استفاده از درزه‌ها و صفحات شکستگی از هم جدا شده‌اند، شبیه‌سازی می‌کند. فرض مدل این است که جریان سیال فقط می‌تواند در شکستگی رخ دهد. بلوک‌ها الاستیک و نفوذناپذیر در نظر گرفته می‌شوند. هندسه مدل از یک هسته مرکزی که شبکه شکستگی مجزا ایجاد شده در مرحله قبل در آن جانمایی شده و یک بلوک در برگیرنده تشکیل شده است. در واقع هسته مرکزی مدل، ناحیه ایجاد سوراخ و مسدودکننده‌ها در مرکز آن بوده که تزریق در آن برای مطالعه شکافت هیدرولیکی انجام می‌شود. ابعاد هسته مرکزی به طول و عرض ۱۵۰ و عمق ۴۰ متر است، ابعاد بلوک بیرونی دو برابر این ابعاد است. مرحله بعد در مدل‌سازی عددی، اختصاص خواص سنگ بکر و شکستگی هاست که در جدول ۴ آورده شده است. لازم به ذکر است، ویژگی‌های خواص بکر و شکستگی‌ها به‌طور فرضی انتخاب شده اند.

پارامتر α بر اساس شرایط موجود ناحیه تعیین می‌شود. عموماً مقادیر این پارامتر از مقدار ۲ بیشتر است و یک باز شدگی یکنواخت برای هر دسته درزه در نظر گرفته شده است برای تعریف میزان تراکم شکستگی‌ها از پارامتر P_{32} استفاده می‌شود. این پارامتر بیانگر مجموع سطوح شکستگی‌های تعریف شده در حجم بلوک سنگی مورد مطالعه است. شبکه شکستگی مجزا با در نظر گرفتن توابع توزیع آماری مربوط به پارامترهای معرف شکستگی، شکستگی‌ها را به صورت کاملاً تصادفی تولید و در سنگ توزیع شده است تا شرایطی را نزدیک به شرایط طبیعی توده سنگ ایجاد کند. به همین منظور از توابع احتمالاتی، مطابق با جدول ۱ برای تولید شکستگی‌ها استفاده شده است.

جدول ۱. توابع توزیع مورد استفاده در مدل

پارامتر هندسی	تابع توزیع
جهت‌داری	فیشر
اندازه شکستگی	نمایی منفی
مرکز شکستگی	یکنواخت

توزیع پواسون موجب تولید شکستگی‌های کوچک مقیاسی می‌شود که بین فضای دو شکستگی قرار می‌گیرند و ارتباط بین شکستگی‌ها رو مختل می‌کند؛ از این رو از تابع توزیع یکنواخت برای تعیین مرکز شکستگی‌ها استفاده شده است (Katsaga *et al.* 2015). شبکه شکستگی‌های مجزا برای مدل اولیه در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار 3DEC تولید می‌شود. برای تولید شکستگی‌ها از توابع توزیعی که پیش از این در مورد آن توضیح ارائه شده است، استفاده می‌شود. پس از تعریف خواص با استفاده از توابع توزیع با استفاده از شبکه مونت کارلو شبکه شکستگی‌ها تولید می‌شود. این شبکه شامل دو دسته درزه است که مطابق با خواص جداول ۲ و ۳ در محیط نرم‌افزار 3DEC ایجاد شده‌اند. شکل ۱ شبکه شکستگی مجزا ایجاد شده را نشان می‌دهد.

جدول ۲. ویژگی‌های دسته درزه ۱

Joint set 1	
Fisher constant	5
Dip	75
Dip direction	45
Power law distribution exponent	4
Minimum joint trace length	30
Maximum joint trace length	40
P32	0.03

جدول ۴. ویژگی‌های مکانیکی سنگ و درزه‌ها

Property	Intact rock	joint
Density (g/cm ³)	2.6	-
Cohesion (Mpa)	-	0
Friction angle (deg)	-	30
Young modulus (Gpa)	20	-
Poisson's ratio	0.2	-
Joint normal stiffness (Gpa/m)	-	50
Joint shear stiffness (Gpa/m)	-	50

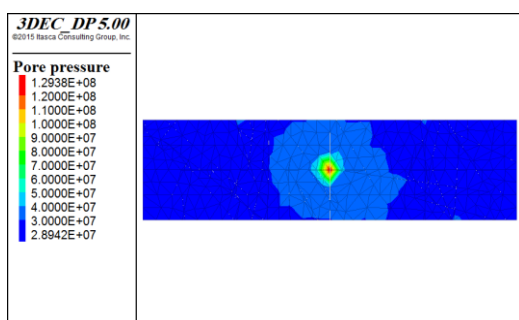
مشخصات هیدرولیکی درزه‌ها مطابق با جدول ۵ در مدل‌سازی اعمال شده است.

جدول ۵. مشخصات هیدرولیکی درزه‌ها

Residual aperture ares (m)	Zero aperture azero (m)	Max aperture amax (m)
10^{-4}	10^{-4}	10^{-3}

است. سیال مورد استفاده پایه آبی خواهد بود. تزریق از مرکز بلوک داخلی آغاز شده و با نرخ ثابت انجام می‌پذیرد و از پروپانت در مدل‌سازی استفاده نشده است. به منظور شبیه‌سازی آغاز تزریق، در مرکز مدل نقطه‌ای به عنوان مبدأ آغاز تزریق تعیین شده است. از این نقطه برداری‌هایی هادی برای جهت‌گیری درست سیال تعریف شده که همانند شرایط واقعی، سیال در همه جهت‌هایی که اجازه ورود دارد، امکان انتقال و تغییر فشار را دارا باشد. سیال با توجه به مسیرهایی که ناشی از حضور شکستگی‌ها است، مسیر خود را انتخاب کرده و پیشروی می‌کند. این پیشروی تا جایی که به بن‌بست خورده یا انرژی لازم برای جابه‌جایی را از دست دهد، ادامه پیدا کرده است.

بر اساس تئوری مساله پس از این که فرآیند تزریق آغاز می‌شود، اگر فشار ایجاد شده از مقدار تنش افقی حداقل بیشتر شود، شکستگی هیدرولیکی در سنگ القا می‌شود. مقدار تنش افقی حداقل در محل تزریق که در عمق ۳۰۰۰ متری قرار دارد، برابر با مقدار ۳۸ مگا پاسکال است. از این رو حد آستانه فشار برای آغاز فرآیند شکست در سازند در نظر گرفته می‌شود. شکل ۲ تغییرات فشار را پس از تزریق در یک مقطع افقی از ناحیه تزریق نشان می‌دهد. همان‌طور که قابل ملاحظه است، بیشینه فشار در صفحه شکست، به مرز ۱۲۹ مگا پاسکال رسیده و با توجه به گذر از مقدار ۳۸ مگا پاسکال، فرآیند شکست منطبق با تئوری مساله انجام پذیرفته است.



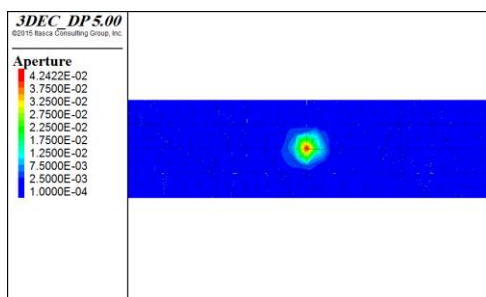
شکل ۲. تغییرات فشار در مقطع افقی شکستگی هیدرولیکی

از طرفی با توجه به جهت‌های تنش‌های اصلی، شکستگی تمایل دارد، عمود بر تنش افقی حداقل و در راستای تنش افقی حداکثر ادامه یابد. تغییرات فشار در صفحه افقی گذرنده از محل تزریق و با توجه به جهات تنش‌های افقی در شکل ۳ نشان داده شده است، همان‌طوریکه در شکل مشاهده می‌شود، مسیر شکستگی

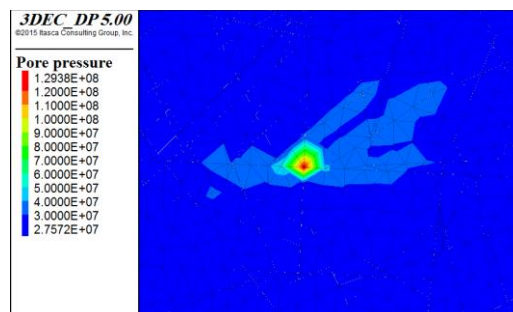
تنش افقی حداکثر (S_H) در راستای محور x و تنش افقی حداقل (S_h) در راستای محور y اعمال می‌شود. تنش معادل با روباره نیز (S_v) در راستای محور z تعریف شده و در نهایت فشار منفذی بر مدل افزوده می‌شود. اغلب تنش قائم یا تنش معادل با روباره، به تناسب عمق محاسبه می‌شود که به دلیل اینکه عمده مخازن نفتی ایران در اعماق زیاد قرار دارند، مرکز مدل برابر با عمق ۳۰۰۰ متر به‌طور فرضی در نظر گرفته شده است. بدیهی است که هندسه شکستگی هیدرولیکی تحت تأثیر شرایط تنش قرار می‌گیرد، به‌طوری‌که در صورتی که بزرگ‌ترین مقدار تنش منطقه تنش قائم باشد، سیال تمایل دارد در راستای تنش قائم حرکت کند. از این رو به منظور اینکه سیال بتواند تعداد بیشتری از شکستگی‌های طبیعی را در نتیجه مدل‌سازی به منظور ارزشیابی بهتر دخیل کند، مقادیر تنش قائم و تنش افقی حداکثر برابر در نظر گرفته شده و تنش افقی حداقل نیمی از این مقدار است. مقادیر تنش ذاتی اعمال شده در مدل برای تنش‌های S_h و S_H به ترتیب برابر ۳۸،۲۲ و ۷۶،۴۴ مگا پاسکال شده است. فشار منفذی نیز برای عمق ۳۰۰۰ متری برابر ۲۹،۴۳ مگا پاسکال در نظر گرفته شده است.

نرخ تزریق سیال برابر با $0.06 \text{ m}^3/\text{sec}$ یا 60 kg/s به کار گرفته شده است. این نرخ تقریباً برابر با 21 bbp (گالن بر دقیقه) برابر

هیدرولیکی و هدایت جریان هیدرولیکی تابع شرایط رژیم تنش و شکستگی‌های موجود در توده سنگ است.



شکل ۴. بازشدگی شبکه درزه‌های مدل



شکل ۳. تغییرات فشار در برش افقی از بلوک مرکزی در محل تزریق

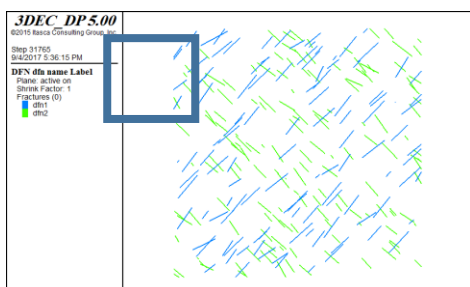
۵. تحلیل پارامتری

یکی از راه‌های بررسی نقش هریک از عوامل مؤثر در ایجاد تغییر در روند فرآیند شکست، تحلیل حساسیت و انجام مطالعات پارامتری است. از جمله پارامترهایی که می‌تواند در فرآیند شکست هیدرولیکی در ارتباط با شکستگی‌های طبیعی اثر گذار باشد، پارامترهایی است که هندسه شکستگی‌های طبیعی توده سنگ را تعریف می‌کنند. چنانچه پیشتر بیان گردید، هندسه شکستگی‌های طبیعی با استفاده از شبکه شکستگی‌های مجزا تولید شده که هریک از پارامترها از یک توزیع احتمالاتی مناسب برای آن پارامتر تبعیت می‌کنند. در ادامه فاکتورهایی که در توابع توزیع شرکت داشته و در نهایت در تشکیل هندسه شکستگی‌ها و توزیع آن‌ها نقش دارند، مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. تراکم شکستگی‌ها (p_{32}) معیاری است سطح شکستگی‌ها در دامنه مدل را تعیین می‌کند. از این رو افزایش این مقدار می‌تواند تعداد شکستگی‌ها را در دامنه مدل افزوده و موجب بیشتر شدن اتصالات شبکه شود. بنابراین بررسی تأثیر این پارامتر مهم تلقی می‌شود. به همین منظور تحلیل پارامتری هریک از مشخصه‌های هندسی شکستگی، در سه حالت تراکم پایین، متوسط و بالا ارزیابی شده است. به منظور تغییر در حالت تراکم در شکستگی‌ها مقدار چگالی شکستگی‌ها (p_{32}) با مقادیر ۰،۰۱، ۰،۰۳ و ۰،۰۵ تغییر می‌کند. برای انجام این کار از یک مدل مرجع استفاده می‌شود و پارامترهایی که قرار است مورد بررسی قرار گیرند، تغییر پیدا می‌کنند. پارامترهای ورودی مدل مرجع شامل خواص سنگ بکر و شکستگی‌های توده سنگ هستند. در ادامه به بررسی پارامتری تأثیر پارامترهای هندسی جهت‌داری، طول خط اثر و چگالی شکستگی‌ها پرداخته می‌شود.

۵.۱ جهت‌داری

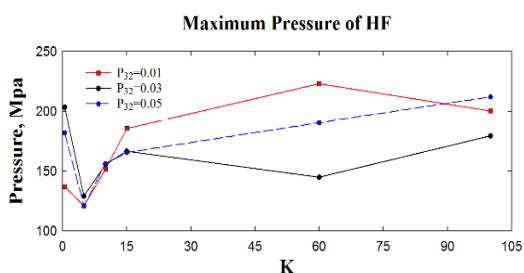
در تعریف و اعمال جهت‌داری شکستگی‌های مدل از تابع توزیع

به گونه‌ای که با افزایش زمان تزریق، شکستگی‌های بیشتری درگیر شده و فشار شبکه برای عبور در مراحل بعدی را کاهش می‌دهد. انرژی مورد نیاز برای ادامه عملیات شکست و باز کردن شکستگی‌های طبیعی کاهش یافته و موجب افت قابل توجه فشار تزریق می‌شود. در تحلیل و تفسیر فرآیند شکست هیدرولیکی، از جمله پارامترهای اساسی مورد توجه، بازشدگی شکستگی است که نقش بسزایی در افزایش تولید خواهد داشت. شکل ۴ تغییرات بازشدگی شبکه درزه‌های مدل در مسیر احتمالی شکست هیدرولیکی را نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود، در نزدیکی محل اعمال تزریق، ابتدای مسیر درزه‌ها از بازشدگی بیشتری برخوردار بوده و با فاصله گرفتن از محل تزریق به واسطه کاهش و افت فشار هیدرولیکی از بازشدگی درزه‌ها کاسته می‌شود. جهت یافتگی بازشدگی درزه‌ها نیز در تعامل با شرایط تنش‌های برجای حاکم بر مدل است. تغییرات بازشدگی از ۲،۵ میلی‌متر تا ۴،۲ سانتی‌متر متغیر است. از مقایسه شرایط بازشدگی در صفحه احتمالی وقوع شکستگی هیدرولیکی و فشار حاکم، می‌توان به ارتباط نزدیک تغییرات آن‌ها نسبت به هم اشاره کرد. به گونه‌ای که افت و خیز فشار تزریق اثر مستقیم بر مقدار بازشدگی شکستگی‌ها داشته و با مطالعه شرایط فشار ایجاد شده در داخل سازند می‌توان به مقدار دلخواه طراحی شده تا حدی دست یافت.



شکل ۶. توزیع شکستگی‌ها در مقطع صفحه افقی از محل تزریق برای ثابت فیشر $k=60$

شکل ۷ تغییرات فشار بیشینه در صفحه شکست هیدرولیکی را نشان می‌دهد. چنانچه از نمودارهای شکل ۷ پیداست، با رسیدن مقدار ثابت فیشر به عدد ۵، مقادیر فشار بیشینه کاهش می‌یابد. پس از آن با افزایش این مقدار و رسیدن به عدد ۱۵ سیر صعودی خود را پیش گرفته و به مقدار ثابتی می‌رسد و نشان می‌دهد عمده ناهمگونی در مقادیر فشار، در بازه کوچک‌تر از ۱۵ رخ می‌دهد. همان طور که پیشتر گفته شد، هرچه مقادیر ثابت فیشر کوچک‌تر می‌شود، تمایل شکستگی‌ها برای موازی شدن در راستای یک شیب و جهت شیب معین، کاسته شده و دچار یک بی‌نظمی می‌شود. این بی‌نظمی می‌تواند دلیل عمده تغییرات در مقادیر کوچک ثابت فیشر باشد. از طرفی دیگر تأثیرات افزایش تراکم شکستگی‌ها نیز بررسی شده و نشان داده شده است که با افزایش تراکم شکستگی‌ها در عمده نقاط اندازه‌گیری شده، فشار افزایش خواهد یافت. دلیل آن می‌تواند حبس شدن سیال در انبوهی از شکستگی‌ها و بالا رفتن فشار سیال باشد.

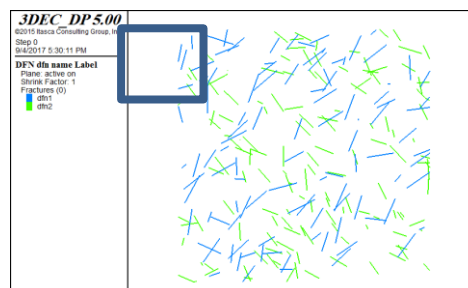


شکل ۷. فشار بیشینه شکستگی هیدرولیکی با تغییرات ثابت فیشر در سه حالت تراکم بالا، متوسط و پایین

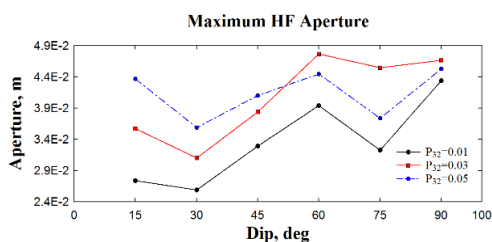
بیشینه بازشدگی شکستگی هیدرولیکی نیز به تبعیت از تغییرات فشار عمل کرده است. به نحوی که در شکل ۸ دیده می‌شود،

فیشر استفاده شده است. در این تابع توزیع، k ثابت فیشر است که انحراف جهت‌داری از یک مقدار میانگین شیب و جهت شیب دسته درزه‌ها را نشان می‌دهد. مقدار بزرگتر این ضریب نشان می‌دهد که پراکندگی داده‌ها کمتر بوده و شکستگی‌ها تمایل دارند در راستای میانگین شیب و جهت شیب قرار گرفته و موازی شوند. اتصالات ایجاد شده توسط شکستگی‌ها و کیفیت آن‌ها می‌تواند در میزان آبگذری آن‌ها اثر گذار بوده و در نهایت در شکستگی هیدرولیکی موثر واقع شوند (Zimmerman, 2012). به عنوان نمونه شبکه شکستگی‌های مجزا در دو حالت k با مقادیر ۵ و ۶۰ مورد مقایسه قرار گرفته است. صفحه افقی عبوری از مرکز بلوک (محل تزریق پیش بینی شده) در شکل‌های ۵ و ۶ زیر آورده شده است. از مقایسه این دو شکل و نحوه توزیع شکستگی‌ها می‌توان تأثیر افزایش ثابت فیشر در توزیع شکستگی‌ها را از نقطه نظر جهت‌داری شکستگی‌ها را بررسی کرد. همان طور که در شکل‌های زیر مشاهده می‌شود، شکستگی‌های موجود در بخش مشخص شده در شکل ۵ که دارای ثابت فیشر پایین‌تر است، جهت‌گیری نامنظم‌تری دیده شده و در شکل ۶ شکستگی‌ها منظم‌تر و نسبت به شکستگی‌های شکل ۵ موازی‌تر هستند.

با افزایش میزان ثابت فیشر شکستگی‌ها تمایل پیدا کرده به صورت موازی قرار گیرند در اینصورت از تعداد تقاطع بین شکستگی‌ها کاسته شده و در نتیجه آن توانایی آبگذری شبکه کاهش می‌یابد. با کاهش میزان این آبگذری، سیال درون شکستگی‌ها کمتر ورود کرده و در مسیر مورد انتظار حرکت کرده و با افزایش فشار موجب افزایش میزان بازشدگی می‌شود. برای تحلیل پارامتری ثابت فیشر، مقادیر آن از ۵ تا ۱۰۰ متغیر بوده و فرآیند تزریق در هر کدام از حالت‌ها انجام شده است که نتایج بدست آمده از مدل‌سازی در ادامه آورده شده است.



شکل ۸. توزیع شکستگی‌ها در مقطع صفحه افقی از محل تزریق برای ثابت فیشر $k=5$

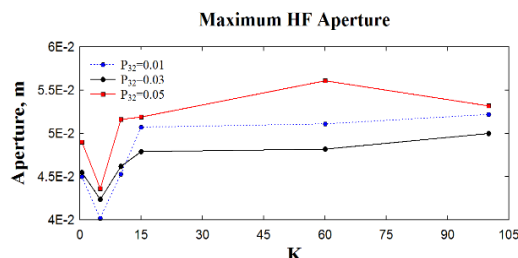


شکل ۱۰. بیشینه بازشدگی شکستگی هیدرولیکی با تغییرات شیب در سه حالت تراکم بالا، متوسط و پایین

۵.۲ اندازه شکستگی

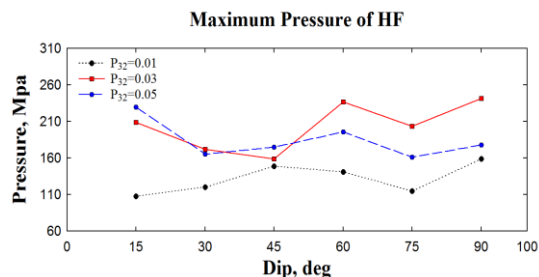
همان طور که قبلاً توضیح داده شد، اندازه شکستگی عموماً از تابع توزیع نمایی منفی تبعیت می‌کند. در این تابع پارامتر α به همراه بیشینه و کمینه اندازه شکستگی تعریف می‌شوند. پارامتر α چگالی شکستگی‌ها را بر اساس محدوده تغییرات اندازه شکستگی نشان می‌دهد. هرچه مقدار این پارامتر بیشتر شود، شکستگی‌های بزرگ مقیاس به نسبت شکستگی‌های کوچک بیشتر می‌شوند. به منظور تحلیل پارامتری و مشاهده تاثیر اندازه شکستگی‌ها، خروجی مدل عددی بر اساس تغییر پارامتر α و کمینه اندازه شکستگی‌ها بررسی شده است. در این بخش پارامتر α در بازه ۲ تا ۵ و کمینه اندازه شکستگی، در بازه ۵ تا ۳۵ متر متغیر است. شکل ۱۱ تغییرات فشار متناسب با تغییرات پارامتر α را نشان می‌دهد. همان طور که نشان داده شده است، در مقادیر ۲ تا ۳ شاهد افزایش فشار بوده و پس از با کاهش فشار، تقریباً به مقدار ثابتی رسیده است. با افزایش مقدار α تعداد شکستگی‌های با طول زیاد بیشتر شده و سیال برخورد کمتری با پل‌های سنگی دارد. در نتیجه امکان حبس آن کمتر شده و مقدار فشار کاهش می‌یابد. با توجه به نمودار می‌توان استنباط کرد که در مقادیر ۲/۵ و ۳ نقاط بحرانی بوده و افزایش یا کاهش مقادیر α ، تغییرات چشمگیری را به همراه دارد. با توجه با این تغییرات فشاری که در اثر تغییر پارامتر α آمده است. در اندازه بازشدگی درزه‌ها اثر مستقیم دارد، همان طوریکه در شکل ۱۲ نیز مشاهده می‌شود، تغییرات بازشدگی نیز با تغییرات فشار دارای روند تغییر یکسانی است.

تغییرات نمودار، کاملاً مانند نمودار تغییرات فشار بوده و تحت تاثیر آن قرار گرفته است.

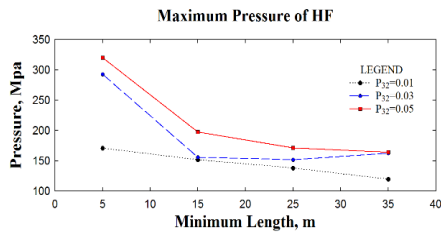


شکل ۸. بیشینه بازشدگی در صفحه احتمالی شکستگی هیدرولیکی با تغییرات ثابت فیشر در سه حالت تراکم بالا، متوسط و پایین

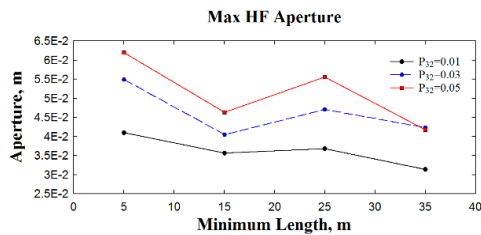
پارامترهای دیگری که در جهت‌داری شکستگی‌ها بررسی شده است، جهت شیب است. برای تحلیل پارامتر جهت شیب، خواص دسته درزه‌ها مطابق با مدل مرجع بوده با این تفاوت که ثابت فیشر ثابت بوده و جهت شیب تغییر کرده و مقادیر جهت شیب در بازه ۱۵ تا ۹۰ درجه متغیر است. در این ارتباط، شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب تغییرات فشار و بازشدگی را نشان می‌دهند. هنگامی که این مقدار کم است، بدین معنی است که شکستگی طبیعی عمده‌تاً در جهت تنش افقی حداکثر قرار گرفته و با افزایش آن این شکستگی‌ها، هم جهت تنش افقی حداقل شده و تمایل برای باز شدن شکستگی کمتر می‌شود. در نتیجه شکستگی‌هایی با جهت شیب کم، چندان تاثیر نمی‌پذیرند. با افزایش مقدار جهت شیب شکستگی‌ها، سیال موجود در این شکستگی‌ها موجب بالا رفتن بیشتر فشار شده و در نتیجه آن تمایل شکستگی‌ها برای باز شدن افزایش یافته و مقدار بازشدگی شکستگی‌ها بیشتر می‌شود.



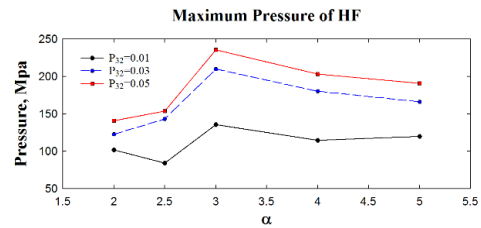
شکل ۹. فشار بیشینه شکستگی هیدرولیکی با تغییرات شیب در سه حالت تراکم بالا، متوسط و پایین



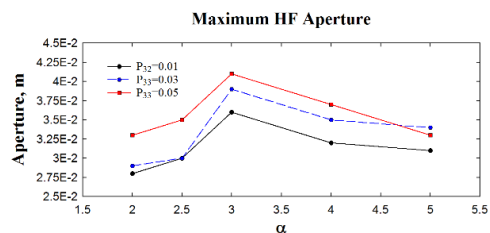
شکل ۱۳. فشار بیشینه شکستگی هیدرولیکی با تغییرات اندازه طول کمینه در سه حالت تراکم بالا، متوسط و پایین



شکل ۱۴. بیشینه بازشدگی در صفحه احتمالی شکستگی هیدرولیکی با تغییرات اندازه طول کمینه در سه حالت تراکم بالا، متوسط و پایین



شکل ۱۱. فشار بیشینه در صفحه احتمالی شکستگی هیدرولیکی با تغییرات پارامتر α در سه حالت تراکم بالا، متوسط و پایین



شکل ۱۲. بیشینه بازشدگی در صفحه احتمالی شکستگی هیدرولیکی با تغییرات پارامتر α در سه حالت تراکم بالا، متوسط و پایین

۶. نتیجه گیری

در این مقاله، با استفاده از شبکه شکستگی مجزا و مدل اجزا مجزا به بررسی نقش شکستگی‌های طبیعی در فرآیند شکست هیدرولیکی داخل یک چاه پرداخته شد. پارامترهای معرف هندسه شکستگی نظیر جهت‌داری، طول شکستگی و چگالی با تغییر در پارامترهای توابع توزیع حاکم بر آن‌ها مورد بررسی و تحلیل حساسیت قرار گرفتند. با توجه به بررسی‌های انجام شده اهم نتایج زیر قابل ذکر است:

- در تحلیل پارامتری، نتایج نشان می‌دهند ثابت فیشر در مقادیر پایین خود به دلیل ایجاد یک بی‌نظمی در توزیع مقادیر شیب و جهت شیب شکستگی‌ها در حوالی یک مقدار میانگین، مقادیر بازشدگی شکستگی هیدرولیکی دارای نوسان بوده و در مقدار برابر ۵ دارای کمینه است.
- با تغییر جهت‌داری شکستگی، موقعیت شکستگی طبیعی نسبت به جهت تنش‌های افقی تغییر می‌کند. به گونه‌ای که با قرار گرفتن شکستگی در جهت تنش افقی حداقل، احتمال بازشدن آن بسیار کم می‌شود. این تغییرات می‌تواند موجب تأثیر در شرایط شکستگی هیدرولیکی شود.
- وجود شکستگی‌های بزرگ مقیاس می‌تواند باعث محلی شدن جریان و کاهش فشار به منظور ایجاد شکست

طول کمینه اندازه شکستگی‌ها نیز پارامتر دیگری که مورد بررسی قرار گرفته است. تغییرات اندازه شکستگی می‌تواند تأثیر بسزایی در روند فرآیند شکافت هیدرولیکی داشته باشد. به گونه‌ای که وجود شکستگی‌های بزرگ مقیاس موجب کانالیزه شدن جریان در این نوع شکستگی‌ها شده و فرایند هدایت جریان سیال تحت تأثیر وجود این نوع شکستگی‌ها در شبکه قرار دهد. به منظور تحلیل پارامتری تأثیر این مولفه هندسی شکستگی‌ها، مقدار کمینه شکستگی‌ها از ۵-۳۵ متر متغیر در نظر گرفته شده است. چنانچه در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار کمینه اندازه شکستگی و بزرگ‌تر شدن ابعاد شکستگی‌های شبکه، مقادیر فشار در به سرعت کاهش یافته است. این تغییر فشار نشان می‌دهد که جریان سیال در یکی از شکستگی‌های بزرگ مقیاس وارد شده و فشار در صفحه احتمالی عبوری شکستگی هیدرولیکی را کاهش داده است، به تناسب این کاهش فشار، شکستگی‌های موجود در مسیر کمتر تحت تأثیر قرار گرفته و مقدار بازشدگی کاهش یافته است (شکل ۱۴).

- بزرگ مقیاس نسبت به شکستگی‌های کوچک مقیاس) مقدار بازشدگی شکستگی هیدرولیکی به یک مقدار بیبیشینه رسیده و سپس کاهش می‌یابد. بیشینه مقدار بازشدگی شکستگی هیدرولیکی در نقطه برابر با ۳ به وقوع می‌پیوندد.
- هیدرولیکی شود. همین امر موجب می‌شود مقادیر بازشدگی شکستگی هیدرولیکی دستخوش تغییر شده و با افزایش طول شکستگی‌های طبیعی، از مقدار بازشدگی شکستگی هیدرولیکی کاسته می‌شود.
- با افزایش پارامتر α (بیانگر نسبت حضور شکستگی‌های

۷. نمادها

جدول ۶. سیاهه‌ی نمادها

شرح	واحد	نماد
زوایه انحراف از میانگین شیب	<i>degree</i>	θ
ثابت فیشر	-	k
چگالی شکستگی‌ها	-	α
طول خط اثر	-	l

۸. مراجع

- Baghbanan, A. and Jing, L. (2007) 'Hydraulic properties of fractured rock masses with correlated fracture length and aperture', International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Elsevier, 44(5), pp. 704–719. doi: 10.1016/j.ijrmms.2006.11.001.
- Basirat, R., Goshtasbi, K. and Ahmadi, M. (2019) 'Discrete Element Simulation of Interaction between Hydraulic Fracturing and a Single Natural Fracture', Fluids, 4, 76; doi:10.3390/fluids4020076
- Bhide, R. J. et al. (2012) 'Modeling hydraulic fracture propagation in low permeability reservoirs', in 46th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association.
- Chen, B. et al. (2021) A Review of Hydraulic Fracturing Simulation, Archives of Computational Methods in Engineering. .doi: 10.1007/s11831-021-09653-z
- Clark, J. B. et al. (1949) 'A hydraulic process for increasing the productivity of wells', Journal of Petroleum Technology. Society of Petroleum Engineers, 1(01), pp. 1–8. doi: https://doi.org/10.2118/949001-G.
- Donze, F. V. et al. (2016) 'Discrete Element Modeling of the Role of In Situ Stress on the Interactions Between Hydraulic and Natural Fractures BT - New Frontiers in Oil and Gas Exploration', in Jin, C. and Cusatis, G. (eds) New Frontiers in Oil and Gas Exploration. pp. 113–136. doi: 10.1007/978-3-319-40124-9_3.
- Fjar, E. et al. (2021) Petroleum related rock mechanics. 3rd edition. Elsevier.
- Gu, H. et al. (2011) 'Hydraulic Fracture Crossing Natural Fracture at Non-Orthogonal Angles, a Criterion, Its Validation and Applications. SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, Texas, 24–26 January', Soc. of Pet. Eng., doi: https://doi.org/10.2118/139984-PA.
- Hu, Y. et al. (2021) 'Numerical modeling of complex hydraulic fracture networks based on the discontinuous deformation analysis (DDA) method', Energy Exploration & Exploitation, 39(5) 1640–1665. doi: 10.1177/0144598720981532

- Hubbert, M. K. and Willis, D. G. (1954) 'Mechanics Of Hydraulic Fracturing', Transaction of the AIME. Society of Petroleum Engineers. doi: <https://doi.org/10.2118/686-G>.
- Jeffrey, R. G., Vandamme, L. and Roegiers, J.-C. (1987) 'Mechanical Interactions in Branched or Subparallel Hydraulic Fractures'. Society of Petroleum Engineers, (1). doi: <https://doi.org/10.2118/16422-MS>.
- Jing, L. and Stephansson, O. (2007) 'Discrete Fracture Network (DFN) Method', Developments in Geotechnical Engineering, 85, pp. 365–398. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0165-1250\(07\)85010-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0165-1250(07)85010-3).
- Katsaga, T., Riahi, A. and Damjanac, B. (2015) 'Three-Dimensional Investigation of Hydraulic Treatment in Naturally Fractured Reservoirs', pp. 1–10.
- Keshavarzi, R., Club, Y. R. and Mohammadi, S. (2012) 'A new approach for numerical modeling of hydraulic fracture propagation in naturally fractured reservoirs', in SPE/EAGE European Unconventional Resources Conference & Exhibition-From Potential to Production. doi: <https://doi.org/10.2118/152509-MS>.
- Leung, C. T. O. and Zimmerman, R. W. (2012) 'Estimating the hydraulic conductivity of two-dimensional fracture networks using network geometric properties', Transport in porous media. Springer, 93(3), pp. 777–797. doi: 10.1007/s11242-012-9982-3.
- Li, Y. (2020) 'Simulation of the interactions between multiple hydraulic fractures and natural fracture network based on Discrete Element Method numerical modeling', Energy Sci Eng. 8:2922–2937. doi: 10.1002/ese3.712
- McClure, M. W. and Horne, R. N. (2013) Discrete fracture network modeling of hydraulic stimulation: Coupling flow and geomechanics. 1st edn. Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-00383-2.
- Montgomery, C. T. et al. (2010) 'Hydraulic fracturing: history of an enduring technology', Journal of Petroleum Technology. Society of Petroleum Engineers, 62(12), pp. 26–40. doi: <https://doi.org/10.2118/1210-0026-JPT>.
- Nolen-hoeksema, R. (2013) 'Defining Hydraulic Fracturing: Elements of Hydraulic Fracturing', Oilfield Review Schlumberger, (2), pp. 51–52.
- Pater, C. J. and Beugelsdijk, L. J. L. (2005) 'Experiments and numerical simulation of hydraulic fracturing in naturally fractured rock'. American Rock Mechanics Association.
- Pirhooshyaran, M, R. Nikkhah, M (2021) 'Hydraulic fracture patterns in fractured rock mass using coupled hydromechanical modeling in the bonded particle model', Modeling Earth Systems and Environmen, 10.1007/s40808-021-01218-0
- Riahi, A. and Damjanac, B. (2013) 'Numerical study of hydro-shearing in geothermal reservoirs with a pre-existing discrete fracture network', in Proceedings of the 38th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, CA, pp. 11–13.
- Taleghani, A. D. (2009) Analysis of hydraulic fracture propagation in fractured reservoirs: an improved model for the interaction between induced and natural fractures. The University of Texas at Austin.
- Zhang, X., Jeffrey, R. G. and Thiercelin, M. (2007) 'Deflection and propagation of fluid-driven fractures

at frictional bedding interfaces: a numerical investigation', Journal of Structural Geology. Elsevier, 29(3), pp. 396–410. doi: 10.1016/j.jsg.2006.09.013.

میرزایی نصیر آباد، حسین (۱۳۹۱) 'تهیه برنامه کامپیوتری تولید شبکه شکستگی مجزای توده سنگ درزه دار، کرمان: اولین همایش زمین شناسی فلات ایران.