



## بررسی مکانیسم هرزروی گل حفاری برای چاه قائم در سازند دارای شکستگی با در نظرگیری شرایط تخلخل دوگانه: مطالعه موردی چاه SIE-05 در حوزه نفتی خلیج فارس

محمد کمیلیان<sup>۱\*</sup>، امید سعیدی<sup>۲</sup>، مهدی رهبری<sup>۲</sup>، محسن هدایتی<sup>۳</sup>  
 ۱. دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
 ۲. اداره زمین شناسی، شرکت نفت فلات قاره  
 ۳. شرکت جنرال مکانیک

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۰۸ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۸/۱۷  
 شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/jpg.2019.196351.1101

واژگان کلیدی	چکیده
شکستگی طبیعی هرزروی سیال حفاری روش المان مجزا مدل سازی هیدرومکانیکی تخلخل دوگانه نفوذپذیری وابسته به تنش	حفاری در سازندهای دارای شکستگی و مسئله هرزروی سیال یکی از چالش‌های مهم در صنایع بالادستی نفت است. وقوع ناپایداری در چاه، افزایش زمان‌های غیر مولد (NPT)، هرزروی سیال حفاری و مخاطرات ناشی از آن می‌تواند منجر به افزایش هزینه‌های حفاری شود. کنترل و مدیریت فشار حفاری (MPD) از جمله ابزارهای مؤثر در کاهش هزینه‌های حفاری است. وجود شکستگی‌های طبیعی و پیچیدگی فرآیندهای هیدرومکانیکی در این سازندها، مسئله کنترل فشار ته چاه و تعیین مشخصه‌های بهینه گل حفاری را دشوار می‌کند. بنابراین برای تعیین یک الگوی حفاری بهینه، شناخت مکانیسم‌های هیدرومکانیکی ضروری است. در این مقاله با ایجاد مدل سه‌بعدی هیدرومکانیکی از چاه در سازند دارای شکستگی و با در نظر گرفتن شرایط تخلخل دوگانه، هرزروی سیال در ماتریکس و شکستگی بررسی شده است. نتایج نشان داد با افزایش نرخ تزریق سیال حفاری، جابجایی‌های برشی در امتداد شکستگی افزایش و افت فشار سیال مشاهده شد. برای نرخ تزریق ۱۰ بشکه بر ساعت، سهم ماتریکس تراوا و شکستگی در هرزروی سیال، برابر بدست آمد. در شرایط تنش‌های همسانگرد لغزش‌ها در امتداد شکستگی محدود و در نتیجه فشار سیال افزایش یافت. با افزایش نسبت تنش‌های افقی بیشینه به کمینه، گسترش سیال در امتداد شکستگی‌ها افزایش و سهم تراوش سیال از فصل مشترک صفحات شکستگی و ماتریکس سنگی مجاور آن افزایش می‌یابد.

۱. پیشگفتار  
 پیوسته انجام گرفته است. هرچند بررسی محیط‌های دارای شکستگی و مسائل مرتبط با شناخت مکانیسم‌های ناپایداری در این محیط‌ها، گسترش چندانی نداشته و به تبع پیشرفت‌های ایجاد شده در نوع عملیات حفاری و نیاز به توسعه میدان‌های نفت و گاز، مطالعه بیشتر در این بخش ضروری است. در همین راستا بررسی‌های عددی به منظور تعیین یک الگوی کارآمد حفاری برای حفظ یکپارچگی چاه و جلوگیری از وقوع ناپایداری در سازندهای دارای شکستگی در دستور کار شرکت نفت فلات قاره ایران قرار گرفته است. برخی از

حفظ پایداری چاه‌ها در سازندهای دارای شکستگی همواره از مسائل پیچیده مهندسی حفاری بوده است. مشکلات ناشی از وقوع ناپایداری در چنین شرایطی ممکن است منجر به از دست رفتن بخش و یا تمام چاه گردد. در یک برآورد کلی مقدار تقریبی ۱ میلیارد دلار در سال به هزینه‌های تحمیلی ناشی از وقوع این ناپایداری‌ها اختصاص دارد. از زمان شروع پیشرفت‌های گسترده در فناوری‌های حفاری، مطالعات وسیعی در زمینه‌ی ارزیابی پایداری چاه‌ها در محیط‌های

\* کارشناسی ارشد مکانیک سنگ؛ دانشکده معدن و متالورژی؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ تهران؛ خیابان انقلاب؛ ضلع شمال شرق چهارراه ولیعصر؛ کوچه شهید بالاور؛ مرکز فناوری و توسعه نوآوری دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ پلاک ۷؛ طبقه اول؛ کدپستی: ۱۵۹۱۶۳۹۷۲۳؛ شماره‌ی تلفن: ۰۲۱۶۶۴۸۳۴۰۶؛ رایانه: komaylian@aut.ac.ir

هیدرولیکی (Nagel, 2013)، نفوذپذیری وابسته به تنش (Min, 2004) و ارزیابی پایداری سازه‌های زیرزمینی (Sapigni, 2003) بکار گرفته شده است. این روش اثبات کرده است که یک ابزار حیاتی در فهم مکانیسم‌های شکست در توده‌سنگ‌های درزه‌دار و ارزیابی پایداری چاه در سازندهای دارای شکستگی است (Zhang, 1999). بنابراین در این مقاله به منظور شبیه‌سازی شرایط هیدرومکانیکی چاه در سازند دارای شکستگی از روش المان مجزا (3DEC) استفاده شده است. همان‌طور که بیان شد هدف از این بررسی، ارزیابی پایداری چاه در سازند شکستگی و مسئله هرزروی سیال حفاری است. هرزروی سیال حفاری در محیط‌های دارای شکستگی با شدت بیشتری رخ می‌دهد. هرزروی سیال حفاری و نفوذ سیال به درون سازند مجاور چاه صرفاً مختص به فضای منتسب به بین صفحات ناپیوستگی (نفوذپذیری منتسب به شبکه شکستگی‌ها) نبوده و در کل ماتریکس سنگ رخ می‌دهد. بنابراین به منظور انجام بررسی‌های دقیق‌تر، پیاده‌سازی مدل‌هایی بر پایه محیط‌ها با تخلخل دوگانه<sup>۲</sup> و در نظر گرفتن نفوذپذیری شکستگی و ماتریکس سنگ به‌طور هم‌زمان نیاز است. نفوذپذیری، یک مسئله با مکانیسم منفرد نبوده و بر اساس ویژگی‌های محیطی و مشخصه‌های ژئومکانیکی بر جای میدان، متغیر است. در این بین نفوذپذیری وابسته به تنش<sup>۳</sup> از جمله موارد مهم در ارزیابی مکانیسم‌های هیدرومکانیکی در محیط‌های دارای شکستگی است. مطالعات متعددی به منظور بررسی اثر نرخ تنش‌های برجا بر نفوذپذیری سنگ و جریان سیال درون شکستگی ارائه شده است (Zhang Z. a., 2018)، (Cao, 2019) و (Han, 2003)؛ هرچند اثر نرخ تنش‌های برجا بر مکانیسم‌های هیدرومکانیکی و هرزروی سیال حفاری به‌طور کامل بررسی نشده است.

بر اساس آنچه بیان شد و اهمیت بررسی مدل‌های هیدرومکانیکی در تعیین الگوی حفاری کارآمد، رفع مشکلات ناشی از ناپایداری چاه و تعیین متدولوژی مسدودسازی سازند برای جلوگیری از هرزروی سیال حفاری، در این مقاله شبیه‌سازی شرایط هیدرومکانیکی یک چاه به روش المان مجزا در یکی از میدان‌های نفتی خلیج فارس ارائه شده است.

میدان‌های نفتی حوزه خلیج فارس که در حیطه عملیاتی شرکت نفت فلات قاره ایران قرار دارند، دارای شرایط ژئومکانیکی و ساختاری ویژه‌ای است که منجر به سخت‌تر شدن عملیات حفاری و افزایش هزینه‌های ناشی از ناپایداری چاه می‌شوند. یکی از مشکلات رایج در این میدان‌ها مسئله هرزروی سیال حفاری در سازندهای دارای شکستگی و ناپایداری چاه است. در این حالت مکانیسم‌های متعددی بر رفتار غالب چاه مؤثر است. این مکانیسم‌ها نیز به نحوی به میزان فشار گل حفاری، گرادیان شکست برشی<sup>۱</sup> و گرادیان شکستگی وابسته است (Zhang J., 2013).

بر اساس آنچه بیان شد، به منظور تعیین یک الگوی حفاری پایدار و جلوگیری از هرزروی سیال در سازندهای دارای شکستگی، شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی مکانیسم‌های هیدرومکانیکی منطبق بر مشخصات یک چاه در خلیج فارس ارائه شده است. قابل ذکر است با توجه به پیشرفت روش‌های عددی این امکان فراهم شده که بتوان مدل‌های سه‌بعدی پیچیده‌تری از شرایط برجای چاه در سازندهای دارای شکستگی پیاده‌سازی شود (Taheri, 2018). روش المان محدود، تفاضل محدود و المان مرزی از جمله این روش‌های عددی است. باید توجه داشت که این روش‌ها به‌طور غالب برای شبیه‌سازی محیط‌های پیوسته بوده است (Salehi, 2010). علاوه بر این، فرمولاسیون این روش‌ها در حالتی که مسئله موردنظر شامل ناپیوستگی و سطوح شکستگی متقاطع باشد، محدود است (Itasca, 2016). بنابراین استفاده از روش‌های عددی کارآمدتری نیاز است. در این بین بهره‌گیری از روش المان مجزا در مدل‌سازی محیط‌های دارای ناپیوستگی، برخی از محدودیت‌های روش‌های بر پایه محیط پیوسته را مرتفع می‌کند. در مدل‌سازی به روش المان مجزا، توده‌سنگ به‌صورت مجموعه‌ای متشکل از بلوک‌های صلب و یا تغییر شکل‌پذیر در نظر گرفته می‌شوند. در این روش سطوح ناپیوستگی به مانند مرزهای مجزای اندرکنشی در بین بلوک‌ها فرض می‌شوند (Itasca, 2016). روش المان مجزا در مطالعات متعددی مرتبط با مسئله دفع زباله‌های هسته‌ای (Cappa, 2006)، مدل‌سازی تنش‌های میدانی (Hart, 2003)، شکست

<sup>1</sup> Shear failure gradient (SFG)

<sup>2</sup> Dual- porosity

<sup>3</sup> Stress dependent permeability

مسیر حفاری از (LCM<sup>۶</sup>)، پلاگ‌های سیمانی<sup>۷</sup> و سایر فرآیندهای سیمان‌کاری استفاده می‌شود. هرچند در موارد متعدد عدم کارایی فرآیندهای تزریق (LCM) برای مسدودسازی مجاری هرزروی سیال حفاری در این میدان‌ها گزارش شده است. تعیین و انتخاب مناسب‌ترین مشخصه‌ها برای مواد مسدودکننده دشوار و نیازمند بررسی مدل‌های هیدرومکانیکی دقیقی از شرایط نفوذپذیری سازند چه در فضای شکستگی‌ها و چه در ماتریکس سنگ است. نرخ تزریق و گرانروی گل حفاری نیز از جمله موارد مهم دیگر در تعیین الگوهای هرزروی سیال و ناپایداری‌های احتمالی است. یکی از مشخصه‌های میدان‌های نفتی در خلیج فارس، حضور شکستگی‌ها در عمق‌های مختلف است. تغییر جهت شیب این ناپیوستگی‌ها در مسیر حفاری به علت رژیم تنش‌های تکتونیک پیچیده در این منطقه، شرایط حفاری و تعیین الگوهای کارآمد پایدارسازی را دشوار می‌کند. بر اساس گزارش‌های متعدد از هرزروی و وقوع ناپایداری در مسیر حفاری برای میدان موردنظر، بررسی مدل‌های هیدرومکانیکی دقیق‌تر در دستور کار شرکت نفت فلات قاره ایران است. در همین راستا مدل‌های جامعی از ساختار شکستگی‌های منطقه ایجاد و شبیه‌سازی شرایط هیدرومکانیکی پیچیده در چاه‌های این میدان انجام شده است.

برای میدان موردنظر ۱۰ سازند مشخص و بر اساس نقشه‌های ساختاری از موقعیت شکستگی‌ها در مسیر حفاری، سیستم شکستگی غالب برای عمق مورد بررسی تعیین شده است. سازند کژدمی که به‌عنوان ضعیف‌ترین سازند در مسیر حفاری برای چاه موردنظر است؛ در راستای بررسی مدل‌های هیدرومکانیکی انتخاب شده است. بدین منظور مشخصه‌های ژئومکانیکی، خصوصیات نفوذپذیری، نرخ تنش‌های برجا در عمق متناسب به سازند کژدمی، ویژگی‌های گل حفاری، فشار منفذی، فشار گل و ... منطبق بر داده‌های واقعی برای مدل‌سازی در نظر گرفته شده است. قابل ذکر است یکی از مشخصه‌های اصلی این میدان، اختلاف شدید در مشخصه‌های ژئومکانیکی سازندها (لایه‌های سنگی) است. بنابراین تعیین یک متدولوژی کارآمد در مسیر حفاری نیازمند بررسی‌های

بررسی‌های جامع و پارامتری انجام شده در این مطالعه شامل هرزروی سیال، نفوذپذیری وابسته به تنش برجا، و اثر نرخ تزریق سیال حفاری بر مکانیسم‌های ناپایداری چاه است. نتایج به‌دست آمده با رویکرد شناخت هر چه بیشتر مکانیسم‌های هیدرومکانیکی در محیط دارای شکستگی ارائه شده است. شرایط تزریق سیال حفاری به درون چاه به‌گونه‌ای برآورد شده که بتوان جریان در ماتریکس و شکستگی به‌طور هم‌زمان ایجاد و مکانیسم‌های هیدرومکانیکی منتج از آن بررسی شوند. در این مقاله مشخصات سیستم شکستگی‌های منطقه بر اساس داده‌های میدانی تهیه و با توجه به شیب و جهت شیب غالب، در مجاورت چاه در نظر گرفته شده است. برای پیاده‌سازی شکستگی‌های منطقه در مدل اصلی از روش شبکه شکستگی‌های مجزا (DFN<sup>۴</sup>) استفاده شده است.

## ۲. مشخصات ساختاری میدان مورد نظر در

### خلیج فارس

خلیج فارس دریای حاشیه‌ای است که طول آن حدود ۱۰۰۰ کیلومتر و عرض آن بین ۱۸۰ تا ۲۵۰ کیلومتر و حدوداً ۲۴۰۰۰۰ کیلومتر مربع مساحت دارد. فاکتورهای زیادی وجود دارد که خلیج فارس را به یکی از غنی‌ترین نواحی جهان از لحاظ تجمع هیدروکربن تبدیل کرده است. در خلیج فارس، در اطراف جزیره سیری و در مجاورت مرز آبی ایران - دبی چندین ساختمان نفتی شامل: سیری (A)، سیری (B)، سیری (C)، سیری (D)، سیری (E)، سیری (F) و سیری (L) و همچنین ساختمان نفتی نصرت (فاتح شمالی) تشخیص داده شده است که از میان آن‌ها، ساختمان‌های سیری (A)، سیری (C)، سیری (D)، سیری (E) و نصرت (فاتح شمالی) میدان نفتی هستند، یعنی تولید و بهره‌برداری نفت از آن‌ها اقتصادی است. حفاری در این میدان همواره با مشکلاتی از قبیل ریزش دیواره، هرزروی سیال حفاری، شکست لوله جداری و ... همراه بوده است. هرزروی سیال حفاری و در مواردی ریزش‌های موضعی شدید، منجر به تغییر مسیر حفاری<sup>۵</sup> در این میدان‌ها شده است. به‌طور معمول در مواجهه با هرزروی‌های سنگین در

<sup>۴</sup> Discrete fracture network (DFN)

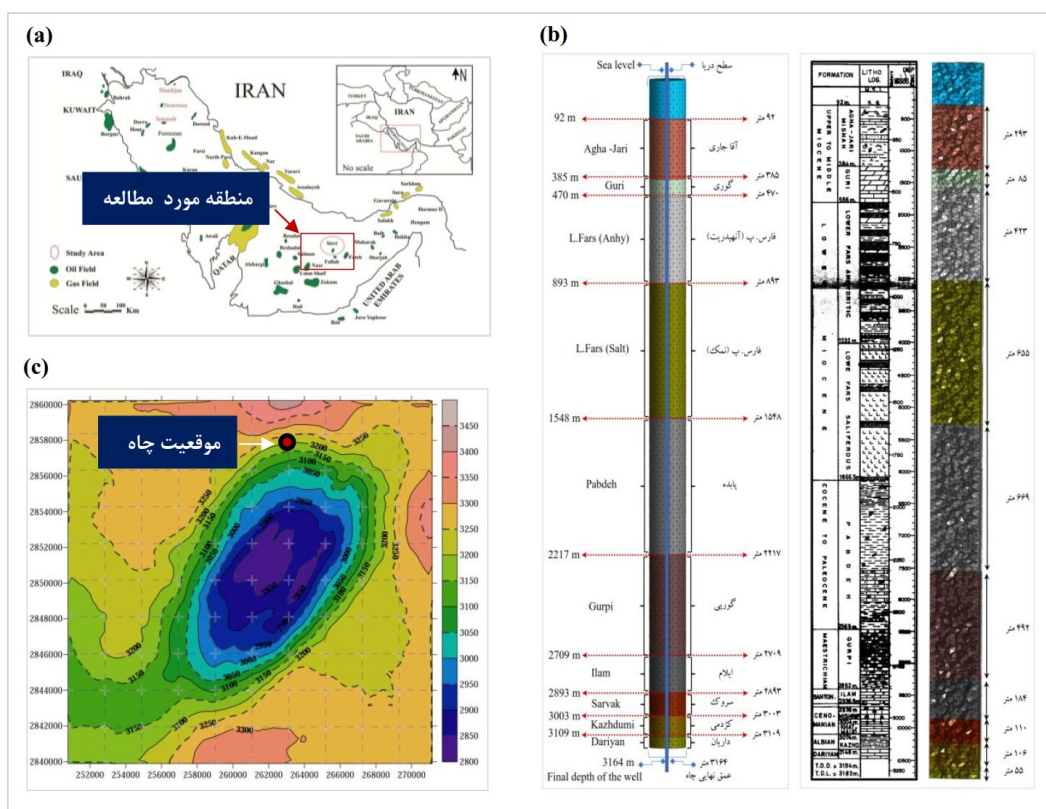
<sup>۵</sup> Sidetrack

<sup>۶</sup> Lost circulation materials (LCM)

<sup>۷</sup> Cement Plug

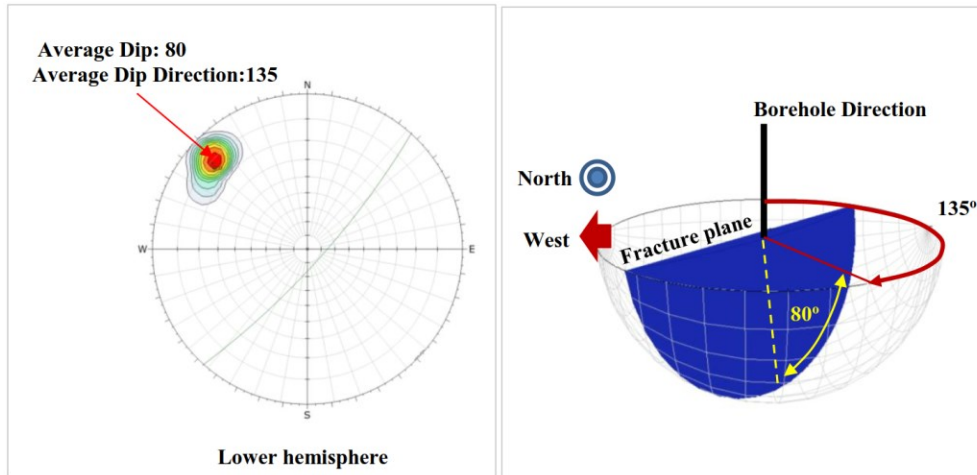
فاکتور مؤثر در هرزروی سیال در نظر گرفته شده است. بنابراین ساخت مدل سه‌بعدی از ساختار شکستگی‌های میدان انجام گرفته است. در واقع با بررسی اثر شبکه شکستگی‌ها در مکانیسم‌های شکست چاه و هرزروی سیال در ساختار این شبکه، تعیین پارامترهای مناسب وزن گل حفاری میسر خواهد شد. بدین منظور مدل‌های سه‌بعدی از ساختار شکستگی‌های میدان بر اساس مشخصه‌های برجا ایجاد و سپس مکانیسم‌های هیدرومکانیکی با در نظر گرفتن حضور شکستگی‌ها بررسی خواهد شد. در این حالت هرزروی سیال در شبکه شکستگی قابل ارزیابی است. در شکل (۲) موقعیت قرارگیری صفحات ناپیوستگی در امتداد چاه و نقشه استریوگرام شکستگی‌ها درج شده است.

جامع‌تر و به‌صورت مجزا برای هر لایه است. در این میدان تفاوت مشخصه‌های ژئومکانیکی لایه‌ها، حضور شکستگی‌ها، رژیم تنش ناهمسانگرد و اختلاف در نرخ نفوذپذیری ماتریکس سنگ برای لایه‌های مختلف، حفاری را دشوار می‌کند. در شکل (b, 1) موقعیت وضخامت لایه‌ها برای چاه موردنظر درج شده است. شکل (c, 1) موقعیت قرارگیری چاه موردنظر در نقشه کانتوردیگرام عمق متناسب به لایه کژدمی نمایش داده شده است. به منظور بررسی فرآیندهای هیدرومکانیکی در چاه و مطالعه مکانیسم‌های هرزروی سیال حفاری در شکستگی‌ها و ماتریکس سنگ، از شیب و جهت شیب واقعی و منطبق بر داده‌های میدانی استفاده شده است. در این مطالعه، نفوذپذیری وابسته به تنش (نرخ تنش‌های برجا) به‌عنوان یک



شکل ۱. (a) منطقه مورد مطالعه در خلیج فارس. (b) موقعیت نسبی لایه‌ها در چاه مورد مطالعه و ضخامت هر سازند. (c) نمایش نقشه کانتوردیگرام نقاط هم عمق برای سازند کژدمی و موقعیت قرارگیری چاه موردنظر.

بررسی مکانیسم هرزروی گل حفاری برای چاه قائم در سازند دارای شکستگی با در نظرگیری شرایط تخلخل دوگانه ...



شکل ۲. نمایش استریوگرام شیب و جهت شیب غالب برای شکستگی‌های منطقه در محدوده حفاری چاه و موقعیت نسبی چاه و امتداد صفحه منتسب به ناپیوستگی‌های اصلی.

مرتبط است (Zhang X. a., 1999). در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرومکانیکی در ساختارهای شکسته به‌طور معمول از تخلخل اولیه چشم‌پوشی می‌شود (Taheri, 2018). هرچند به منظور بررسی دقیق و شناخت مکانیسم‌های پیچیده بررسی محیط با فرض تخلخل دوگانه اهمیت دارد. در این مطالعه با استفاده از روش المان مجزا شبیه‌سازی محیط سنگی در مجاورت چاه با در نظرگیری شرایط تخلخل دوگانه انجام گرفته است. در این روش بلوک‌های تشکیل‌دهنده هندسه چاه به صورت تغییر شکل‌پذیر در نظر گرفته شده است. در این حالت تغییر شکل‌های پلاستیک بر اساس معیار موهر - کولمب شبیه‌سازی می‌شوند. در یک فرآیند هیدرومکانیکی شبیه‌سازی شده با استفاده از روش المان مجزا این امکان وجود دارد که بر اساس تغییر شکل‌های مکانیکی، نفوذپذیری هیدرولیکی<sup>۸</sup> در مدل بررسی شود. بررسی یک مدل هیدرومکانیکی با فرآیندهای توأمان مبتنی بر موارد زیر است (Itasca, 2016):

- ۱- بررسی اثر فشار منفذی بر تغییر شکل‌ها و مقاومت توده سنگ دارای شکستگی.
- ۲- بررسی اثر تغییر شکل‌های مکانیکی بر نفوذپذیری توده سنگ و فشار منفذی سازند.

بر اساس مشخصه‌های سیستم شکستگی در منطقه موردنظر در مجاورت محل حفاری چاه و به‌کارگیری روش شبکه شکستگی‌های مجزا، مدل سه‌بعدی از ساختار شکستگی‌های منطقه ایجاد شده است. با استفاده از این روش امکان ساخت مدل سه‌بعدی از ساختار شکستگی بر اساس داده‌های محدود از مشخصه‌های شکستگی ایجاد خواهد شد. در این روش مدل سه‌بعدی شکستگی منطبق بر پارامترهای آماری و توابع توزیع احتمال ایجاد شده است.

### ۳. مدل‌سازی عددی چاه قائم در سازند دارای شکستگی

در این مطالعه به منظور پیاده‌سازی مدل سه‌بعدی از شرایط هیدرومکانیکی چاه در حضور شکستگی‌ها از روش المان مجزا استفاده شده است. همان‌طور که بیان شد بهره‌گیری از روش المان مجزا در بهبود نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های عددی که شامل شکستگی و شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرومکانیکی باشد، نقش بسزایی دارد (Taheri, 2018). توده سنگ‌های دارای شکستگی طبیعی به‌طور معمول به‌صورت محیط‌های با تخلخل دوگانه شبیه‌سازی می‌شوند. تخلخل اولیه که در فرآیند تشکیل سنگ (دیاژنز<sup>۹</sup>) ایجاد شده و تخلخل ثانویه منتج از مکانیسم‌های گسلس و سایر فرآیندهای تکتونیکی

<sup>8</sup> Diagenesis

<sup>9</sup> Hydraulic conductivity

که در آن ( $\tau_s$ ) تنش برشی است. همان‌طور که بیان شده، مدل اصلی با استفاده از روش المان مجزا تهیه شده است. بهره‌گیری از روش المان مجزا این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان اثر حضور شکستگی‌ها در رفتار نهایی چاه به خوبی در نظر گرفته شود. در واقع در این روش صفحات ناپیوستگی با قابلیت جریان سیال در درون آن‌ها و شبیه‌سازی مکانیسم‌های هیدرومکانیکی به خوبی پیاده‌سازی می‌شود. خصوصیات ژئومکانیکی سازند مورد مطالعه در جدول (۱) درج شده است. این داده‌ها بر اساس آزمایش‌های برجا (سرعت موج برشی و فشاری در سازند) برای چاه مورد نظر تهیه شده است. بر اساس داده‌های حفاری و مدل ژئومکانیکی سازندها (منطبق بر گزارش‌های شرکت نفت فلات قاره ایران) برای چاه مذکور ۹ لایه تا عمق ۳۱۶۴ متر تعیین شده است.

مدل عددی و ارزیابی‌های انجام‌شده بر اساس مشخصات سازند کژدمی است. انتخاب بخش مذکور از چاه مورد نظر، بر اساس گزارش‌های هرزروی و ناپایداری (ریزش‌های مقطعی) برای ساختارهای سنگی مجاور دیواره چاه انجام گرفته است. با ایجاد یک مدل سه‌بعدی هیدرومکانیکی از شرایط چاه در حضور شکستگی‌ها این امکان وجود دارد جریان سیال حفاری در ماتریکس و شکستگی به‌طور هم‌زمان بررسی شود. همچنین جریان متناظر بین سیال درون شکستگی و ماتریکس دربرگیرنده آن بررسی شده است. در این حالت علاوه بر نودهای معرف جریان در شکستگی، شبکه‌های متناظر نود<sup>۱۴</sup> در اتصال بین صفحات ناپیوستگی و ماتریکس تعریف شده است. بنابراین جریان در شکستگی و ماتریکس به هم متصل می‌شود. معادله حاکم بر جریان سیال در ماتریکس بر اساس قانون دارسی<sup>۱۵</sup> تعریف شده است. تخلخل سازند بر اساس داده‌های لاگ نوترون<sup>۱۶</sup> و لاگ چگالی<sup>۱۷</sup> برای چاه مورد نظر به دست می‌آید (رابطه ۳) (Abdideh, 2013).

باید در نظر داشت که بررسی نفوذپذیری سازند در روش المان مجزا بر اساس تغییرات در بازشدگی شکستگی‌ها<sup>۱۱</sup> است (Itasca, 2016). معادله حاکم بر جریان سیال در شکستگی - ها بر اساس فرم ساده شده معادله ناویر - استوک<sup>۱۱</sup> در نظر گرفته شده است. در حالتی که معادله ناویر - استوک برای جریان سیال بین دو صفحه تقریباً موازی، نفوذناپذیر و فرض سیال غیر تراکم‌پذیر در نظر گرفته شود، به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود. در این حالت به فرم ساده شده معادله ناویر - استوک، معادله رینولد<sup>۱۲</sup> گفته می‌شود (Itasca, 2016).

$$\left(\frac{u^3 \rho g}{12\mu}\right), i = 0 \quad (1)$$

که در آن ( $u = x_i$ ) معرف فاصله بین مرزهای نفوذناپذیر شکستگی‌ها در نقطه ( $x_i (i = 1, 2)$ ) از صفحه (صفحه منتسب به مرزهای ناپیوستگی)، ( $\varphi = z + \frac{p}{\rho g}$ ) هد هیدرولیکی، ( $g$ ) شتاب گرانش، ( $\rho$ ) چگالی سیال حفاری، ( $\mu$ ) گراندروسی سیال و ( $p$ ) فشار سیال است. در این مطالعه به منظور بررسی فرآیندهای هیدرومکانیکی توأمان در حضور شکستگی‌ها، تغییر شکل‌های مکانیکی بلوک بر اساس مدل رفتاری موهر - کولمب و رفتار برشی شکستگی‌ها بر اساس مدل موهر - کولمب لغزشی<sup>۱۳</sup> (رابطه ۲) پیاده‌سازی شده است. همان‌طور که در رابطه (۲) بیان شده است، شکستگی‌های برشی (تغییر شکل‌های لغزشی) در شکستگی‌ها بر اساس تنش نرمال مؤثر ( $\sigma'_n$ )، چسبندگی ( $C$ ) و زاویه اصطکاک ( $\varphi$ ) کنترل می‌شود. در این فرآیند با تغییر تنش نرمال ( $\sigma_n$ ) در اثر جریان سیال در سازند (که منجر به تغییر فشار سیال ( $p$ ) می‌شود)، تنش نرمال مؤثر ( $\sigma'_n$ ) تغییر کرده و منجر به شکست برشی در ناپیوستگی‌ها می‌شود (Itasca, 2016).

$$\tau_s \leq C + \sigma'_n \tan \varphi \quad , \quad \sigma'_n = \sigma_n - p \quad (2)$$

<sup>10</sup> Opening of the fractures

<sup>11</sup> Navier-Stokes

<sup>12</sup> Reynolds

<sup>13</sup> Mohr Coulomb slip model

<sup>14</sup> Coincident gridpoints

<sup>15</sup> Darcy's law

<sup>16</sup> Neutron log

<sup>17</sup> Density log

2002). رابطه بالا ( $\kappa$ ) معرف نفوذپذیری ذاتی<sup>۱۸</sup> سازند است. برای سازند کژدمی نفوذپذیری ذاتی ۱۰۲۰/۳۷ میلی داری تعیین شد. محاسبه ضریب نفوذپذیری<sup>۲۰</sup> همسانگرد ( $K$ ) که برای معرفی شرایط جریان سیال در ماتریکس سنگ (در محیط نرم‌افزار) است، بر اساس رابطه (۵) بیان می‌شود (Itasca, 2016).

$$\kappa \left( \frac{m^2}{s} \right) = \text{intrinsic permeability in millidarcies} \times 9.8 \times 10e - 13 \quad (5)$$

بر اساس گزارش‌های حفاری در چاه موردنظر، سیال حفاری در فضای تخلخل سازند است. مفهوم عبارت ( $S_{wirr}$ ) معرف بخشی از فضای بین منفذی سازند است که در حالت اشباع کامل سازند از هیدروکربن، آب در آن بخش حضور دارد. این آب به سطح فضای داخلی تخلخل متصل است (Valenti, )

$$\phi = \sqrt{\frac{\phi_n^2 + \phi_a^2}{2}} \quad (3)$$

که در آن ( $\phi_n$ ) تخلخل به‌دست‌آمده از لاگ نوترون و ( $\phi_a$ ) تخلخل به‌دست‌آمده از لاگ چگالی است. به منظور محاسبه نفوذپذیری سازند از رابطه (۴) استفاده شده است (Abdideh, 2013).

$$\kappa^{1/2} = 100 \times \frac{\phi^2(1-S_{wirr})}{S_{wirr}} \quad (4)$$

در این رابطه ( $S_{wirr}$ ) معرف درصد اشباع آب غیرقابل تقلیل<sup>۱۸</sup> در فضای تخلخل سازند است. مفهوم عبارت ( $S_{wirr}$ ) معرف بخشی از فضای بین منفذی سازند است که در حالت اشباع کامل سازند از هیدروکربن، آب در آن بخش حضور دارد. این آب به سطح فضای داخلی تخلخل متصل است (Valenti, )

جدول ۱. مشخصات ژئومکانیکی سازند کژدمی (بر اساس گزارش آزمایش‌های برجاس شرکت نفت فلات قاره ایران)

Density	Porosity	Permeability coefficient	Friction	Cohesion	Shear M.	Poisson ratio	Young M.	Bulk M.	پارامتر
g/cm <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	m <sup>2</sup> /(Pa/s)	deg	MPa	GPa	.	GPa	GPa	واحد
۲٫۲۶	۰٫۳۷	۰٫۰۰۰۰۰۰۰۰۰۱	۱۲٫۰۲	۱۱٫۰۰	۶٫۵۸	۰٫۳۰	۱۶٫۰۵	۵٫۰۰	

احتمال معین و بر پایه متغیرهای تصادفی مستقل استنتاج می‌شوند (Baecher, 1983). در این مطالعه بر اساس داده‌های موجود از ساختار شکستگی‌های منطقه یک مدل سه‌بعدی از ناپیوستگی‌ها با استفاده از روش شبکه شکستگی‌های مجزا پیاده‌سازی شده است. این روش تصادفی به روش شبکه شکستگی‌های مجزای پواسن و یا بیچر<sup>۲۱</sup> مرسوم است. روش بیچر به وسیله محققین متعدد برای مطالعات مرتبط با انتقال‌پذیری، تغییرشکل‌پذیری، نفوذ-پذیری و ... طی سه دهه‌ی گذشته بکار گرفته شده است (Lei, 2017). نحوه تعریف چگالی و اندازه شکستگی‌ها در این روش بر اساس توابع توزیع چگالی و طول شکستگی‌ها بصورت یک مدل آماری بر اساس رابطه (۶) بیان می‌شود (Bour, 2002).

### ۱.۳ پیاده‌سازی شکستگی‌ها

به علت مشکلات فراوان در اندازه‌گیری مستقیم مشخصه شکستگی‌های طبیعی در عمق، روش تولید تصادفی آن‌ها توسعه و به صورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. روش تصادفی ایجاد شبکه شکستگی‌ها برای اولین بار در سال ۱۹۸۰ با هدف مطالعه نفوذپذیری و جریان سیال در شکستگی‌ها ظهور پیدا کرد. در این روش، شکستگی‌ها به‌صورت خط مستقیم و یا دیسک‌های صفحه‌ای (چندضلعی) در نظر گرفته می‌شوند. در این روش به منظور پیاده‌سازی یک مدل سه‌بعدی از سیستم شکستگی‌ها، مشخصه‌های متعددی مانند جهت‌گیری، اندازه، فرکانس یا همان چگالی شکستگی‌ها، فاصله‌داری، بازشدگی و موقعیت قرارگیری آن‌ها در نظر گرفته می‌شوند. این مشخصه‌ها منطبق با توابع توزیع

<sup>18</sup> Irreducible water saturation

<sup>19</sup> Intrinsic permeability

<sup>20</sup> Permeability coefficient

<sup>21</sup> Baecher

$$n(l, L)dl = \alpha L^D l^{-\alpha} \quad \text{for } l \in [l_{min}, l_{max}] \quad , \quad (dl \ll l) \quad (6)$$

و کمترین اندازه ناپیوستگی‌ها، چگالی شکستگی‌ها، نسبت توزیع کوچک‌تر به بزرگ‌ترین اندازه و انتخاب تابع یکنواخت برای تعریف موقعیت قرارگیری ناپیوستگی‌ها، از جمله پارامترهای اصلی در تعیین ساختار شکستگی‌ها در این مطالعه است. برای مدل پیشرو بر اساس الگوی (P10) که بر اساس ماهیت تک‌بعدی گمانه‌های برداشت داده‌های هندسی از شکستگی است، اقدام به تعیین الگوی شدت شکستگی‌ها شده است. به منظور بررسی مدل هیدرومکانیکی از چاه در حضور شکستگی، بعد از ایجاد یک مدل سه‌بعدی از شکستگی‌های منطقه، بلوک هندسی منتسب به چاه با ابعاد کوچک‌تری نسبت به فضای ایجاد شکستگی‌ها انتخاب شده است. در واقع با ایجاد یک مدل سه‌بعدی از شکستگی با ابعاد بزرگ‌تر، پیاده‌سازی شکستگی‌های منطقه با مشخصه‌های نزدیک به واقعیت به دست خواهد آمد.

با ایجاد یک بلوک هندسی با ابعاد کوچک‌تر از چاه در مرکز مدل ایجاد شده برای شکستگی‌ها، بخشی از شکستگی‌ها که محدوده بلوک چاه را قطع می‌کنند استخراج می‌شود (شکل ۳.a). بر این اساس یک مدل سه‌بعدی از هندسه چاه با حضور شکستگی‌هایی که دیواره چاه را قطع کرده‌اند، به دست خواهد آمد. بلوک معرف چاه و مرزهای مجاور آن به صورت  $(\frac{1}{4})$  از مدل کامل چاه قائم در نظر گرفته شده است (شکل ۳.b). ابعاد مدل (1×1) متر و شعاع چاه ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است.

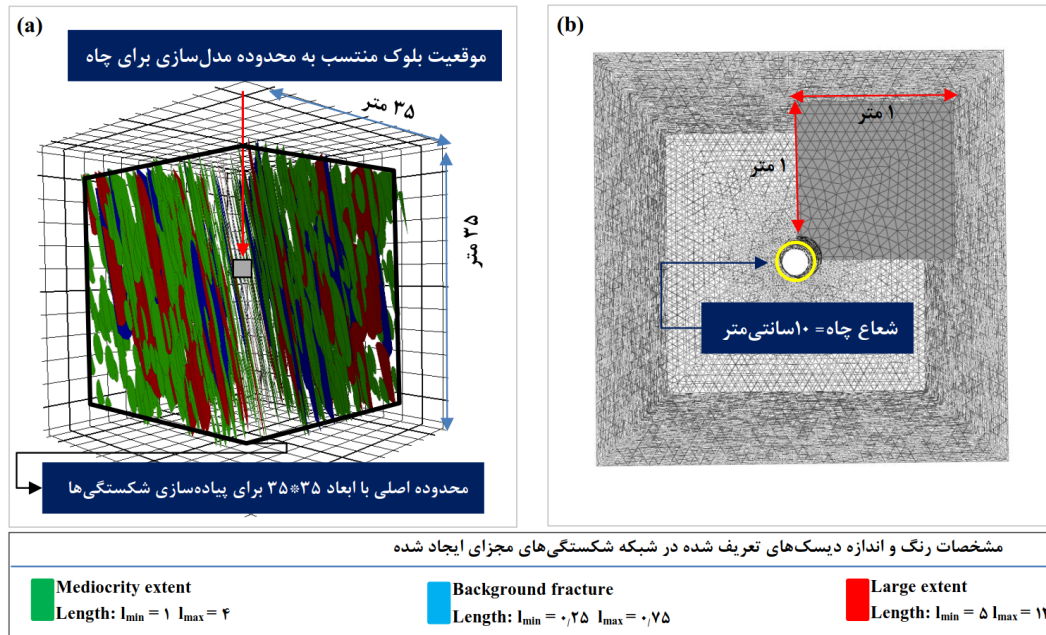
که در آن  $n(l, L)dl$  نماینده تعداد شکستگی‌ها با اندازه معین است و به بازه‌ی  $[l, l + dl]$  تعلق دارد و مربوط به حجم اولیه با اندازه مشخص  $(L)$  است.  $(\alpha)$  چگالی و  $(l_{min}, l_{max})$  بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین اندازه شکستگی است. در این رابطه  $(D)$  بُعد فرکتال<sup>۲۲</sup> است. برخال یا فرکتال، ساختاری هندسی است که با بزرگ کردن هر بخش از این ساختار به نسبت معین، همان ساختار نخستین به دست می‌آید.  $(\alpha)$  توان طول، در تابع‌نمایی قانون توان است. توان  $(\alpha)$  در واقع معرف نسبت‌های مربوط به بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین شکستگی است.

در این مطالعه با استفاده از روش پواسن، مدل سه‌بعدی از سیستم شکستگی‌های منطقه پیاده‌سازی شده است. بدین منظور با ایجاد یک فایل با محتوای مشخصه‌های شیب و جهت شیب واقعی از ساختار شکستگی‌های منطقه و بازخوانی فایل در محیط نرم‌افزار، این امکان ایجاد می‌شود که یک مدل هندسی سه‌بعدی از شبکه شکستگی‌های منطقه بر اساس داده‌های واقعی شیب و جهت شیب ایجاد شود. در واقع مدل سه‌بعدی شکستگی‌های منطقه از نظر توزیع چگالی و اندازه منطبق بر رابطه (۶) و از نظر شیب و جهت شیب به‌طور دقیق منطبق بر داده واقعی خواهند بود. برای ایجاد یک الگوی جامع و نزدیک به واقعیت از سیستم شکستگی‌های منطقه، از ترکیب سه الگوی متفاوت استفاده شده است. بنابراین سه شبکه شکستگی‌های مجزا با عنوان شکستگی‌های پس‌زمینه، طول متوسط و بزرگ‌مقیاس بر اساس مشخصه‌های هندسی و جهت‌گیری ناپیوستگی‌ها ایجاد گردید (شکل ۳). بیشترین

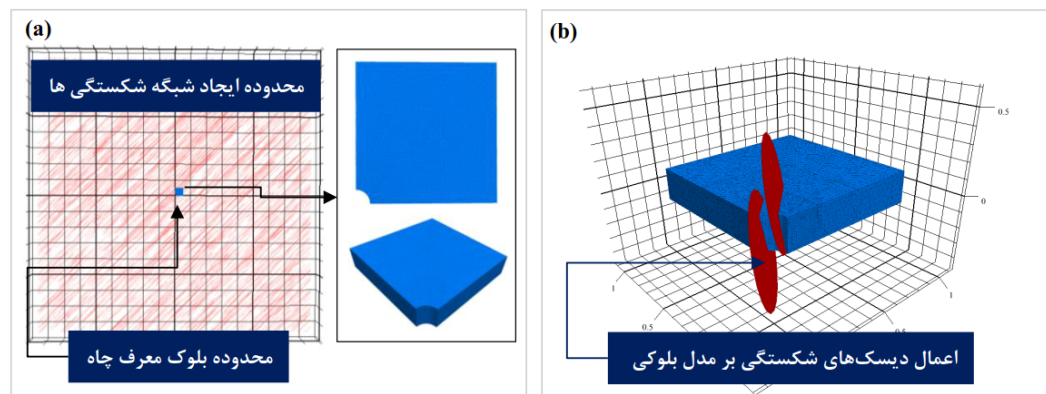
<sup>22</sup> Fractal



بررسی مکانیسم هرزروی گل حفاری برای چاه قائم در سازند دارای شکستگی با در نظرگیری شرایط تخلخل دوگانه ...



شکل ۳. (a) نمایش مدل سه‌بعدی از فضای ایجاد شکستگی‌ها در روش پوآسن که با ابعاد بلوکی (۳۵×۳۵) متر ایجاد شده است. بلوک منتسب به چاه و مرزهای آن در مرکز این مدل در نظر گرفته شده است. (b) نمایش هندسه و ابعاد چاه که به صورت  $\frac{1}{4}$  از یک بلوک کامل چاه قائم است.



شکل ۴. (a) نمایش مقطع برش قائم از مدل سه‌بعدی شکستگی‌ها و موقعیت بلوک منتسب به چاه در مرکز این مدل. (b) نمایش بلوک منتسب به چاه و محل تقاطع دیسک‌های معرف شکستگی بر دیواره چاه (در واقع دو دیسک از مجموعه دیسک‌های ایجاد شده در مدل اصلی شکستگی‌ها با امتداد چاه و محدوده بلوک کوچک تعریف شده برخوردار است).

تنش نرمال صفر معرف حالت مبنا برای شکستگی است. در اثر وقوع مکانیسم‌های توأمان هیدرومکانیکی در شرایطی که تنش و کرنش‌ها در مدل منجر به بسته شدن شکستگی شود، حد پایین بازشدگی برای شکستگی  $0,000125$  متر تعیین شده است. مشخصه شکستگی‌های مدل شده برای منطقه

در فرآیندهای توأمان هیدرومکانیکی، تغییرات در اندازه بازشدگی شکستگی متأثر از عوامل هیدرولیکی و مکانیکی به‌طور هم‌زمان است. در چنین شرایطی فرض می‌شود که تغییر در اندازه بازشدگی شکستگی‌ها از یک مقدار مشخص (بازشدگی باقی‌مانده) کمتر نخواهد بود. بازشدگی در شرایط

موردنظر در جدول (۲) درج شده است. مشخصه‌های درج شده در جدول (۲) بر اساس گزارش‌های حاصل از نتایج مطالعات

برجا و آزمایشگاهی که در شرکت نفت فلات قاره ایران انجام شده، تهیه شده است.

جدول ۲. مشخصه شکستگی‌های منطقه

Residual aperture	Friction	Cohesion	Normal stiffness	Zero normal stress aperture	Shear stiffness	پارامتر
m	deg	MPa	GPa	m	GPa	واحد
۰٫۰۰۰۱۲۵	۳۲	۰	۹	۰٫۰۰۰۲۵	۶	

رابطه (۷)، این نسبت و مقدار عددی تنش‌های افقی کمینه و بیشینه در ارتباط با تنش قائم بر اساس عمق لایه در هر مرحله از تحلیل عددی به صورت روابط کد شده در محیط نرم‌افزار به دست آمده است. گرادیان فشار منفذی نیز برای مدل به صورت  $10 \text{ MPa/Km}$  تعیین شده است. به منظور ایجاد جریان سیال در محدوده چاه و سازند دارای شکستگی و ارزیابی رفتارهای هیدرومکانیکی به وقوع پیوسته، از اختلاف فشار بین نواحی مرزی (دیواره چاه و سازند مجاور) استفاده شده است. در شکل (۵) مشخصه‌های هندسی مدل، شرایط مرزی، محل قرارگیری نقاط پایش و نودهای تزریق سیال به درون چاه درج شده است. به منظور ایجاد جریان سیال حفاری به درون سازند دارای شکستگی، از مفهوم فشار بالای حد تعادل (فشار گل حفاری بالا و فشار منفذی پایین) که به عنوان  $(\text{HMLP}^{23})$  معرفی می‌گردد، استفاده شده است. با بالاتر در نظر گرفتن فشار سیال حفاری، جریان سیال به درون سازند برقرار خواهد شد. به منظور بررسی نفوذپذیری وابسته به تنش، سناریوها بر اساس ۴ نرخ تنش برجا متفاوت تعریف شده است.

### ۲.۳ شرایط مرزی چاه

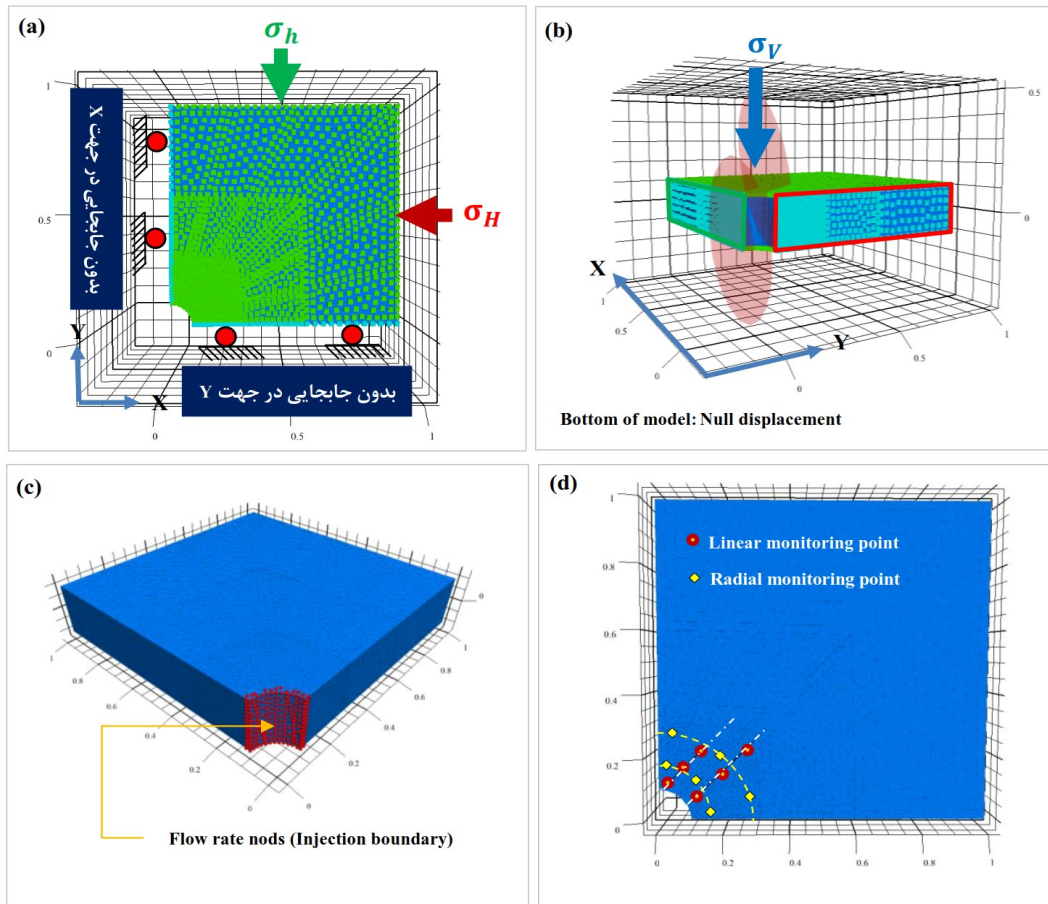
به منظور بررسی رفتار غالب چاه، ۱۲ نقطه پایش در محدوده دیواره چاه و امتداد شکستگی‌ها تعیین شده است. کف مدل به طور ثابت در نظر گرفته شده است. بر اساس داده‌های ژئومکانیکی موجود در منطقه گرادیان تنش قائم به صورت  $25 \text{ MPa/Km}$  تعیین شد. وزن روباره به صورت تنش قائم  $(\sigma_v)$  ثابت بر اساس رابطه (۷) به مدل اعمال گردید.

$$S_v = \int_{Surface}^{TVD} \rho g dz \quad (7)$$

در این رابطه (TVD) عمق قائم واقعی،  $(\rho)$  چگالی لایه‌های بالایی،  $(g)$  شتاب گرانش و  $(dz)$  تغییرات در عمق است. تنش‌های افقی بیشینه  $(\sigma_H)$  و کمینه  $(\sigma_h)$  بر اساس داده‌های ژئومکانیکی از محدوده مورد مطالعه که توسط شرکت نفت فلات قاره تهیه شده‌اند، و با در نظر گرفتن نسبت  $(\sigma_H = R_{xxz} \times \sigma_v)$  که در آن ضریب  $(R_{xxz})$  معرف ارتباط بین مقدار عددی تنش روباره و تنش افقی بیشینه است، تعیین و در محاسبات شرایط مرزی بکار برده شده است. با توجه به

<sup>23</sup> High mud pressure and low pore pressure (HMLP)

بررسی مکانیسم هرزروی گل حفاری برای چاه قائم در سازند دارای شکستگی با در نظرگیری شرایط تخلخل دوگانه ...



شکل ۵. (a) و (b) نمایش شرایط مرزی و امتداد تنش‌های قائم، افقی بیشینه و کمینه در محدوده مدل. (c) محل نودهای تزریق سیال در دیواره چاه. (d) موقعیت نقاط پایش در محدوده شکستگی و مجاورت دیواره چاه.

تنش افقی برجا منطبق با داده‌های ژئومکانیکی متناسب به چاه موردنظر) و منطبق با شرایط برجا در لایه کژدمی و عمق متناسب به این سازند است.

در جدول (۳) نسبت تنش‌های برجا برای ۴ حالت متفاوت درج شده است. مقدار ۱٫۰۶ برای نسبت تنش افقی بیشینه به تنش افقی کمینه ( $\frac{\sigma_H}{\sigma_h}$ ) معرف حالت تنش مبنا (شرایط رژیم

جدول ۳. اطلاعات مربوط به ۴ سناریو تعریف شده برای نرخ تنش‌های برجا

سناریوهای تعریف شده	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳	سناریو ۴
نسبت تنش‌های برجا	$\frac{\sigma_H}{\sigma_h} = 1$	$\frac{\sigma_H}{\sigma_h} = 1.06$	$\frac{\sigma_H}{\sigma_h} = 1.5$	$\frac{\sigma_H}{\sigma_h} = 2$

2018) و ناپایداری در سطوح ناپیوستگی بررسی شد. بر این اساس ۵ سناریو برای نرخ‌های تزریق تعریف شده است. در جدول (۴) مشخصه‌های نرخ تزریق سیال حفاری برحسب بشکه بر ساعت (BPH) درج شده است.

در این بررسی نرخ تنش‌های افقی بیشینه و کمینه برابر با ۱ به‌عنوان رژیم تنش برجا همسانگرد در نظر گرفته می‌شود. جهت تنش‌های افقی بیشینه و کمینه در شکل (a, 5) نمایش داده شده است. در این مطالعه نرخ تزریق سیال حفاری به عنوان یک عامل مهم در ایجاد جابجایی‌های برشی (Taheri،

جدول ۴. اطلاعات مربوط به ۵ سناریو تعریف شده برای نرخ تزریق سیال

سناریوهای تعریف شده	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳	سناریو ۴	سناریو ۵
نرخ تزریق سیال (BPH)	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵

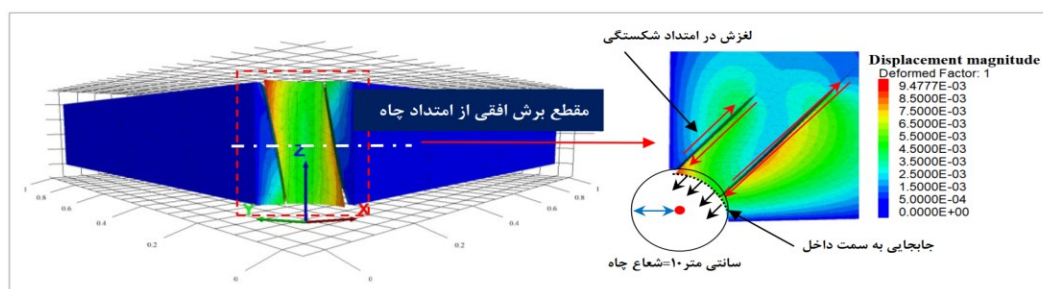
ناحیه‌ای و ... بستگی دارد. بنابراین تعیین یک آستانه مشخص از جابجایی برای یک شرایط خاص عملاً غیرممکن است. هرچند بر اساس فرضیات پذیرفته شده‌ای، بعضی از آشفتنگی‌های ایجاد شده در اثر حفاری در سازندهای دارای شکستگی، مشترک در نظر گرفته می‌شود. بر همین اساس، تغییر شکل‌های کلی در اندازه چاه برای بازه ۱۰٪ به عنوان حد آستانه پایداری چاه در نظر گرفته می‌شود (Karatela, 2016). این معیار به صورت رابطه (۸) بیان می‌شود.

$$\text{Relative displacement (\%)} = \frac{\text{Maximum displacement}}{\text{Borehole diameter}} \times 100 \quad (8)$$

بیشترین جابجایی‌ها در محدوده دیواره چاه تعیین و بر اساس رابطه بالا با تقسیم بر قطر اولیه چاه، نرمال می‌شوند. بیشترین جابجایی در دیواره چاه ۹ میلی‌متر تعیین شده است. بر اساس قطر اولیه چاه، جابجایی نسبی برای دیواره چاه ۵٪ به دست آمد. با توجه به حد آستانه ۱۰٪ برای پایداری دیواره، در مدل پیش رو، دیواره چاه پایدار است (شکل ۶). در این حالت امکان بررسی فرآیندهای هیدرومکانیکی فراهم می‌شود (شکل ۷).

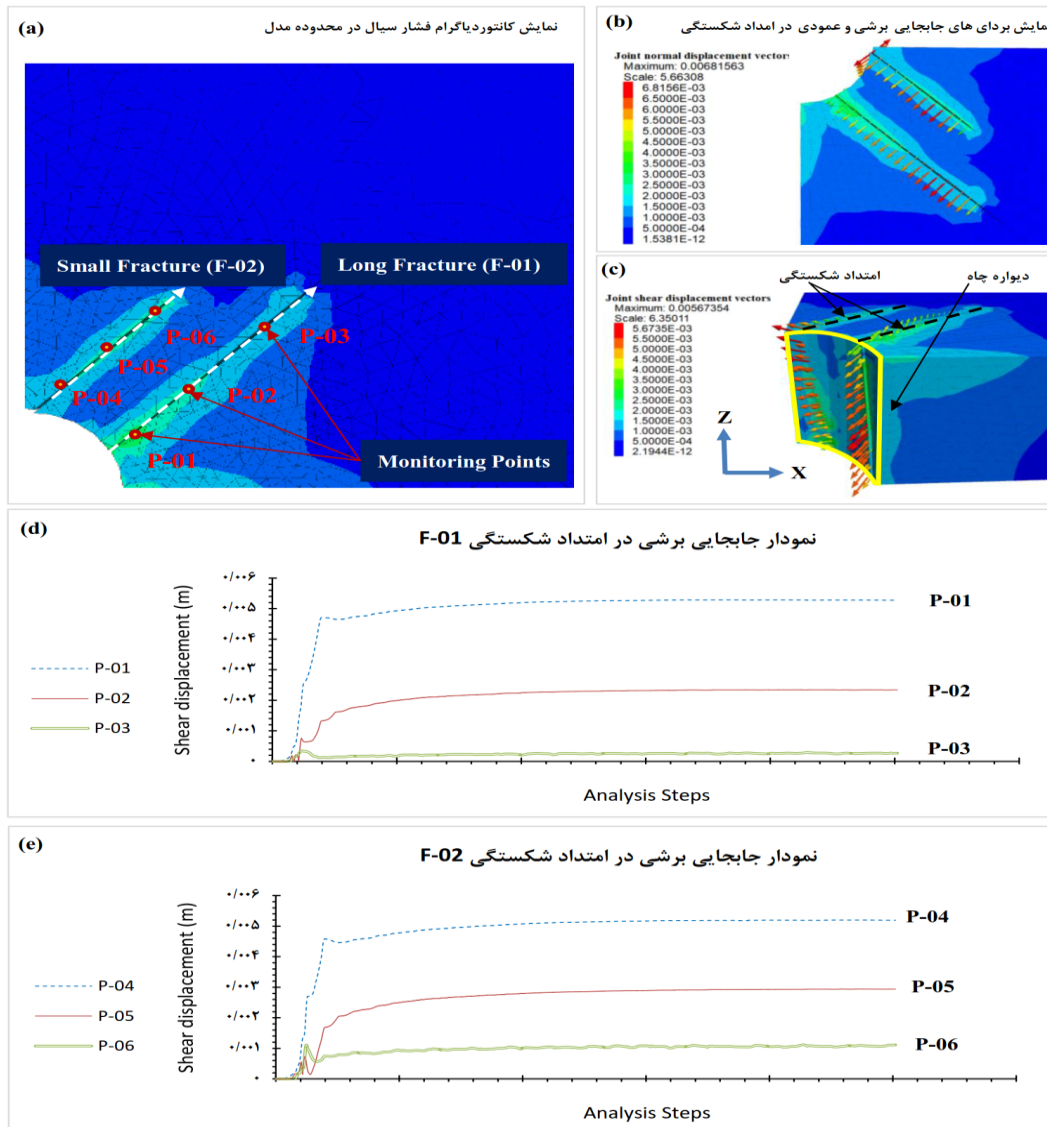
### ۳.۳ ارزیابی مکانیسم‌های هیدرومکانیکی چاه

به منظور بررسی رفتار غالب در امتداد شکستگی‌ها و مکانیسم‌های هیدرومکانیکی در مجاورت چاه، تزریق سیال حفاری با نرخ ۱۰ بشکه بر ساعت انجام شد. فشار منفذی در سازند بر اساس شرایط برجا در عمق موردنظر به صورت  $14.28 \text{ MPa}$  تعیین شده است. با شروع تزریق از دیواره چاه، جریان سیال به درون فضای ماتریکس سنگ و امتداد شکستگی‌ها ایجاد می‌شود. با ادامه فرآیند تزریق، فشار سیال در ماتریکس و شکستگی‌ها افزایش می‌یابد. نرخ تزریق بالاتر منجر به ورود حجم بالاتری از سیال در مدت زمان کوتاه‌تری به درون سازند خواهد شد. در این حالت جابجایی برشی و قائم در امتداد صفحات شکستگی رخ می‌دهد. با افزایش فشار سیال درون شکستگی‌ها، تنش نرمال مؤثر ( $\sigma'_{ff}$ ) بر صفحات ناپیوستگی کاهش می‌یابد (رابطه ۲). در نتیجه جابجایی برشی در امتداد شکستگی رخ خواهد داد. دیواره چاه‌ها ممکن است در اثر تجاوز تنش‌های القایی از حد آستانه مقاومت کششی یا برشی توده سنگ‌های دارای شکستگی، دچار فروشکست و ناپایداری شوند. مکانیسم‌های پاسخ چاه به شرایط پیچیده زمین‌شناسی در حین حفاری، تنش‌های بر جای میان دور و



شکل ۶. نمایش کانتور دیاگرام جابجایی در محدوده دیواره چاه (مقطع برش افقی) و لغزش در امتداد شکستگی مجاور دیواره چاه.

بررسی مکانیسم هرزروی گل حفاری برای چاه قائم در سازند دارای شکستگی با در نظرگیری شرایط تخلخل دوگانه ...



شکل ۷. (a) نمایش کانتوردیگرام فشار سیال در محدوده چاه و نقاط پایش در امتداد شکستگی های (F-01) و (F-02). (b) و (c) بردارهای جابجایی عمودی و برشی در امتداد شکستگی ها. (d) و (e) نمودار جابجایی برشی در امتداد شکستگی ها.

است. نرخ جریان بالا منجر به ورود حجم بیشتری سیال در مدت زمان کمتر خواهد شد در نتیجه در مجاورت محل تزریق سیال، فشار بالاتر خواهد بود. لغزش های به وقوع پیوسته در امتداد شکستگی و میزان جابجایی های برشی در محدوده شکستگی ها در نزدیکی محل تزریق سیال، بیشتر خواهد بود (شکل ۷، d و e). بدین منظور ۶ نقطه پایش در امتداد دو شکستگی ایجاد شده است. در فواصل دور از محل تزریق سیال، جابجایی های برشی کمتری در امتداد شکستگی ها

با شروع جریان و نفوذ به سازند مجاور چاه، فشار سیال در امتداد شکستگی و دیواره چاه به طور پیوسته افزایش می یابد. علاوه بر این، سیال حفاری از امتداد شکستگی به محیط سنگی مجاور ناپیوستگی منتقل خواهد شد. همان طور که بیان شد، با افزایش فشار سیال درون شکستگی، تنش نرمال مؤثر کاهش و در نتیجه جابجایی برشی در امتداد شکستگی رخ خواهد داد (شکل ۷، c). در این فرآیند فشار سیال و گسترش آن در بین فضای بین شکستگی ها در نقاط مختلف متفاوت

(Taheri, 2018). به همین دلیل بازشدگی هیدرولیکی به اندازه کافی بزرگ نیست که اجازه ایجاد یک جریان سیال نامحدود را بدهد و به همین ترتیب نرخ جریان برای ایجاد شکست کششی کم است. در نتیجه‌ی همین اتفاق، پراکندگی و گسترش فشار منفذی کم خواهد شد که منجر به بالا بردن فشار سیال می‌شود. بالا رفتن نرخ جریان منجر به افزایش شکست کششی و در نتیجه بالا رفتن پراکندگی و گسترش بیشتر فشار منفذی می‌شود. این امر منجر به افت فشار سیال و در ادامه ثابت ماندن آن خواهد شد. باید به این نکته توجه نمود که یک افزایش فشار مقطعی در مرحله اولیه و شروع تزریق در مجاورت چاه رخ می‌دهد. این افزایش فشار با عنوان فشار اوج و حد آستانه غلبه بر مقاومت شکست ناپیوستگی بیان می‌شود. در این حالت برای نرخ‌های تزریق بالاتر، در شروع تزریق، فشار سیال دچار یک افزایش ناگهانی می‌شود و در ادامه با گسترش سیال به درون سازند (این نفوذ و گسترش سیال بر اثر غلبه بر حد مقاومت شکستگی است) این فشار افت کرده و ثابت می‌ماند.

به‌طور مشابهی با افزایش گرانیوی سیال، جابجایی‌های برشی و فشار سیال به ترتیب افزایش و کاهش یافت (شکل ۹). در واقع مکانیسم تأثیرپذیری مدل از تغییرات دو پارامتر نرخ تزریق و گرانیوی مشابه است. تغییرات در جابجایی‌های برشی در مقابل افزایش نرخ تزریق سیال و گرانیوی، نشان‌دهنده بروز یک رفتار غالب ناپایداری در مجموعه چاه و سازند بود. افزایش جابجایی‌های برشی در امتداد ناپیوستگی‌ها در نرخ تزریق بالاتر به مفهوم نفوذ بیشتر سیال به درون ساختار شکستگی‌ها و گسترش بیشتر در محدوده مجاور آن است. افزایش گرانیوی سیال منجر به افزایش جابجایی‌های برشی و در نتیجه کاهش پتانسیل خود پایداری چاه حفر شده خواهد شد. تأثیر غالب گرانیوی سیال به‌صورت غلظت بالاتر سیال و افزایش اصطکاک‌های برشی در مسیر عبور از شبکه شکستگی‌ها بیان می‌شود.

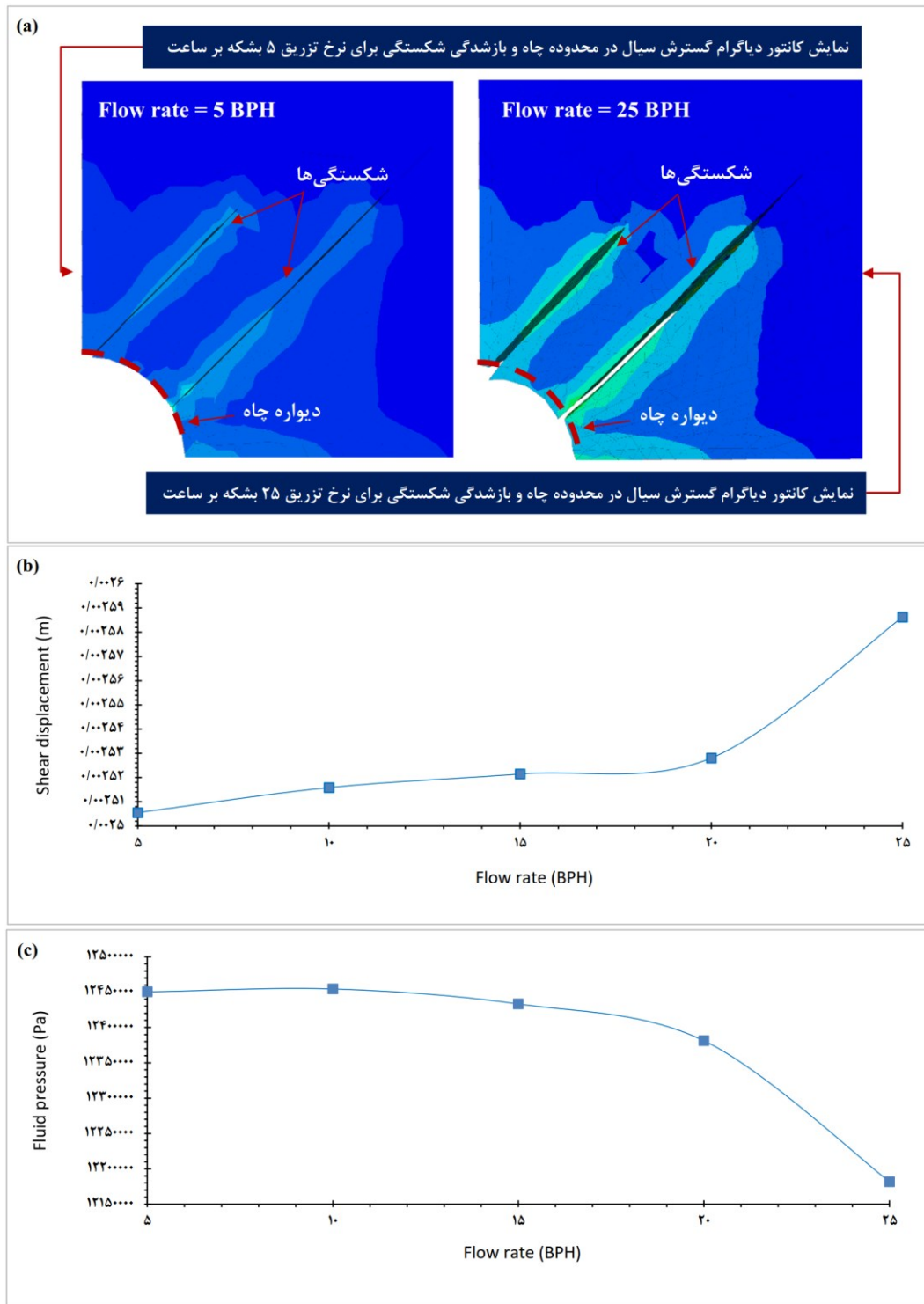
مشاهده شد. نرخ تزریق سیال و تعیین حد آستانه وقوع برش در امتداد شکستگی به هم مرتبط است. در این صورت برای نرخ‌های تزریق مشخص، افزایش فشار سیال و جابجایی قائم (بازشدگی هیدرولیکی) منتج از آن بیشتر خواهد بود. برای نرخ تزریق ۱۰ بشکه بر ساعت، بیشترین جابجایی نرمال و برشی در امتداد شکستگی به ترتیب ۶ و ۵ میلی‌متر به‌دست‌آمده است.

### ۴.۳ بررسی اثر نرخ تزریق و گرانیوی سیال حفاری

در این بخش بررسی رفتار هیدرومکانیکی توأمان مجموعه چاه و سازند دارای شکستگی در شرایط نفوذ سیال حفاری به درون شکستگی‌ها با نرخ‌های تزریق و گرانیوی مختلف انجام گرفت. سناریوهای تعریف‌شده برای بررسی اثر نرخ تزریق و گرانیوی سیال بر مکانیسم‌های ناپایداری چاه به صورت ۵ مورد نرخ تزریق و گرانیوی است. تغییرات گرانیوی سیال در محدوده ۱۰۸ تا ۱۰۰ سانتی پوز و نرخ تزریق سیال از ۵ تا ۲۵ بشکه بر ساعت در نظر گرفته شد. تحلیل نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی نشان داد که با افزایش نرخ تزریق سیال، جابجایی‌های برشی (برای میانگین در ۱۲ نقطه پایش)، افزایش و فشار سیال در محدوده فضای شکستگی‌های مجاور چاه، کاهش می‌یابد (شکل ۸). با افزایش نرخ تزریق سیال از محدوده ۵ بشکه بر ساعت تا ۲۵ بشکه بر ساعت جابجایی برشی به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد. به علت افزایش نفوذ سیال به درون ناپیوستگی‌ها به تدریج تنش نرمال اعمالی بر ناپیوستگی کاهش و در نتیجه جابجایی برشی اتفاق می‌افتد. به‌طور مشابه با افزایش فشار سیال درون چاه تنش کششی افزایش یافته و به‌صورت شکست کششی ظاهر می‌شود. فشار بر جای منفذی در نرخ جریان ۵ بشکه بر ساعت در نقاط مختلف پایش در بیشترین مقدار در مقایسه با سایر نرخ‌های جریان هست. علت این مسئله جابجایی برشی کمتر در نرخ جریان پایین است



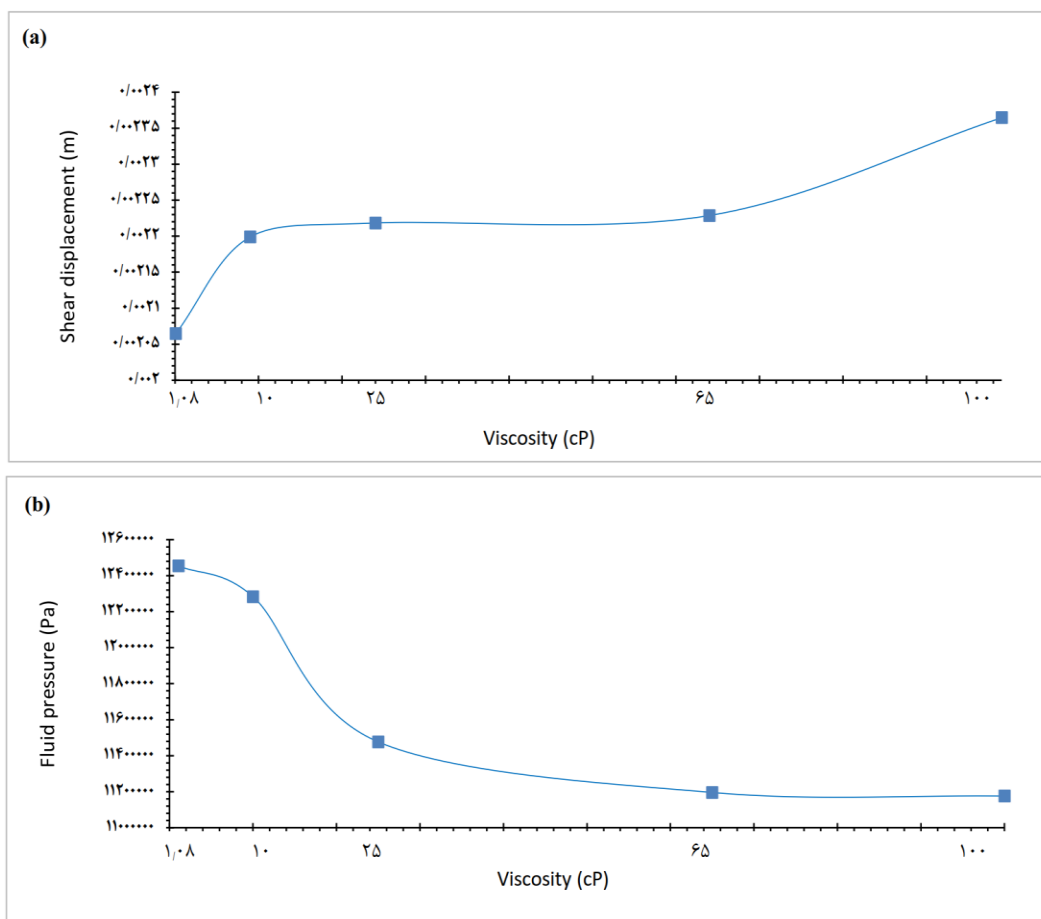
بررسی مکانیسم هرزروی گل حفاری برای چاه قائم در سازند دارای شکستگی با در نظرگیری شرایط تخلخل دوگانه ...



شکل ۸. (a) نمایش کانتور دیاگرام گسترش سیال در محدوده چاه و میزان بازشدگی شکستگی برای نرخ تزریق سیال ۵ و ۲۵ بشکه. (b) نمودار تغییرات جابجایی برشی در مقابل افزایش نرخ تزریق سیال حفاری. (c) نمودار تغییرات فشار سیال در امتداد شکستگی‌ها در مقابل تغییرات نرخ تزریق سیال حفاری.

در حالتی که نرخ تزریق و گرانیروی سیال به‌طور صحیحی تعیین نشده باشد)، می‌تواند به کاهش پدیده هرزروی سیال و ناپایداری چاه کمک کند. کاهش فشار سیال در سازند مجاور چاه (سازند دارای شکستگی‌های چگال) در نرخ‌های تزریق بالاتر نشان‌دهنده نفوذ بیشتر سیال به درون سازند است. درحالی‌که در نرخ تزریق پایین، سیال گسترش کمتری در ساختار شکستگی‌ها داشته و در اثر تجمع (متمرکز شدن سیال در محدوده مجاورت چاه) سیال در فضای شکستگی‌های مجاور چاه، فشار سیال افزایش خواهد یافت. این افزایش فشار منجر به بروز ناپایداری در مجاور دیواره چاه بر اثر غلبه بر فشار محصورکننده صفحات ناپیوستگی می‌شود.

درک رفتار هیدرومکانیکی چاه‌های حفرشده در سازندهای شکافدار بسیار پیچیده و استخراج نتایج رفتاری غالب دشوار خواهد بود. بهینه کردن خصوصیات گل حفاری با در نظرگیری شرایط نرخ تزریق ایمن و گرانیروی مناسب می‌تواند منجر به کاهش جابجایی‌های برشی و شکستگی‌های کششی شود. نرخ بالای تزریق سیال در حالتی که گرانیروی گل زیاد است، شکستگی‌های برشی در امتداد ناپیوستگی‌ها را افزایش و منجر به هرزروی سیال خواهد شد. در یک الگوی بهینه برای حفر چاه، تعیین گرادیان شکستگی ضروری است. تعیین مشخصه-های بهینه برای گل حفاری (نرخ تزریق و گرانیروی) با در نظرگیری حد آستانه غلبه بر گرادیان شکستگی و جلوگیری از نفوذ سیال به درون سازند (بر اثر افزایش فرآیندهای برشی



شکل ۹. (a) نمایش نمودار تغییرات جابجایی برشی در مقابل تغییرات گرانیروی سیال حفاری. (b) نمودار تغییرات فشار سیال در امتداد شکستگی‌ها در مقابل تغییرات نرخ تزریق سیال.



اثر خواهد داشت. بدین صورت که در یک شرایط خاص از نظر رژیم تنش‌های برجا و گرانیروی مشخص گل حفاری، نسبت حجم سیال نفوذ کرده در فضای شکستگی‌ها به حجم سیال تراوشی به سازند تراوا در نرخ‌های تزریق متفاوت، متغیر است. برای بررسی این موضوع در مدل هیدرومکانیکی ایجاد شده، تغییرات حجم سیال هرزروی تعیین شده است. بدین منظور بخشی از سیال که به درون شکستگی جریان می‌یابد بر اساس اختلاف ایجاد شده در حجم فضای بین شکستگی در قبل و بعد تزریق سیال، تعیین می‌شود. با توجه به مقدار اولیه سیال حفاری تزریق شده و تعیین اختلاف بین حجم کل ورودی سیال به چاه و حجم سیال ورودی به فضای شکستگی‌ها، حجم سیال تراوش یافته به سازند مجاور چاه به دست خواهد آمد. همان‌طور که در شکل (۱۰، a) مشاهده می‌شود، بردارهای تخلیه که معرف حضور و جریان سیال در محدوده سازند و شکستگی‌ها است در مجاورت شکستگی از چگالی تجمعی بیشتری برخوردار است. این مسئله به علت نشت سیال از شکستگی به سازند مجاور آن است. در یک فرآیند کلی، با افزایش نرخ تزریق سیال حفاری، حجم بیشتری سیال به محتوای سنگی مجاور چاه (شامل ماتریکس و شکستگی) وارد خواهد شد.

این مسئله منطبق بر مکانیسم تزریق سیال در نرخ‌های بالاتر است که منجر به ورود حجم بیشتری سیال در مدت‌زمان کوتاه‌تری می‌شود. بر اساس نتایج نشان داده شده در شکل (۱۰، b)، با افزایش نرخ تزریق حجم هرزروی سیال در شکستگی‌ها افزایش می‌یابد. در حین فرآیند حفاری و تزریق سیال، بخشی از سیال به درون شکستگی‌ها نفوذ خواهد کرد. با افزایش نرخ تزریق جابجایی برشی در امتداد شکستگی بیشتر و گسترش سیال در بین صفحات ناپیوستگی افزایش می‌یابد (شکل ۸). همان‌طور که در بخش قبل بیان شد، با گسترش بیشتر سیال در شکستگی‌ها، فشار سیال کاهش خواهد یافت. بنابراین در شرایطی که نرخ تزریق سیال بالا است، سیال حفاری در صفحه گستره بزرگ‌تری با ماتریکس

هرزروی سیال حفاری در حضور شکستگی‌ها به طور معمول در فرآیندهای حفاری رخ می‌دهد. سیال حفاری از طریق فضای بین شکستگی‌ها جریان پیدا می‌کند؛ در این صورت بخشی از حجم سیال تزریق شده به درون شکستگی‌ها هرز خواهد رفت. در محیط‌هایی که سازند مجاور چاه از تخلخل نسبی برخوردار باشد، بخشی از سیال به سازند سنگی بکر مجاور چاه نفوذ خواهد کرد. گرچه سیالات حفاری مزایای زیادی برای فرآیند حفاری دارند، اما فشار بالای سیالات حفاری امکان هجوم این سیالات را به درون سازندهای سنگی تراوا فراهم می‌کند. این تراوایی مطلوب نیست چراکه موجب نفوذ سیال حفاری به درون سازند شده و کاهش تولید را به دنبال خواهد داشت. بدین منظور اغلب، به سیالات حفاری موادی افزوده می‌شود تا بتوان فیلتر کیکی<sup>۲۴</sup> ناتراوا - نسبت به سیال حفاری - منافذ سازند را مسدود سازد (Tour, 2012). فیلتر کیک‌ها در واقع باقیمانده ته‌نشین شده گل حفاری روی سطح سازند هستند.

معمولاً افزودنی‌هایی چون بنتونیت<sup>۲۵</sup>، سلولز، پلیمرها، آسفالت، کربنات کلسیم و برخی مواد دانه‌ای<sup>۲۶</sup> برای بهبود خواص فیلتر کیک به گل حفاری اضافه می‌شود. اجزای تشکیل‌دهنده مواد کنترل‌کننده هرزروی سیال (LCM - FLC)، بر گرانیروی سیال و وزن نهایی گل تأثیر دارد. هرچند حذف اثرگذاری این مواد بر خصوصیات رئولوژیکی گل امکان‌پذیر است (Almagro, 2014). آزمایش‌های برجا متعدد در مسیر حفاری چاه نتایج مشخصی از خصوصیات یکپارچگی سازند و حد آستانه بهینه برای وزن (فشار سیال) گل حفاری به دست خواهد داد. برخی از آزمایش‌های مرتبط مانند (FIT<sup>۲۷</sup>) و (LOT<sup>۲۸</sup>) است که با عنوان آزمایش‌های پیشگیرانه انجام<sup>۲۹</sup> می‌شوند. هرچند با حضور شکستگی در مسیر حفاری تعیین یک متدولوژی کارآمد چه در تعیین مشخصه‌های فرآیند حفاری و چه در خصوصیات گل حفاری و مواد افزودنی آن دشوار است. نرخ تزریق سیال حفاری در نحوه هرزروی و میزان نسبی نفوذ آن در شکستگی و سازند تراوای مجاور چاه

<sup>24</sup> Filter Cake

<sup>25</sup> Bentonite

<sup>26</sup> Granular

<sup>27</sup> Leakoff test

<sup>28</sup> Formation integrity test

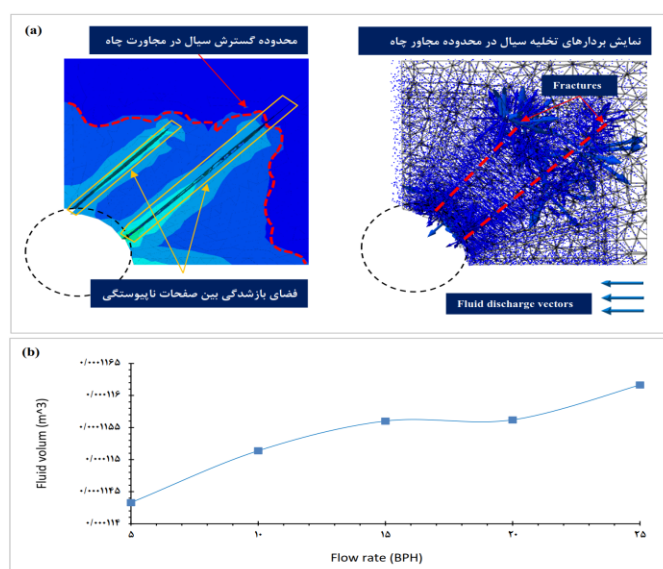
<sup>29</sup> Preventive tests

دیواره چاه، فضای جدید ایجاد شده در امتداد شکستگی را برای تراوش در اختیار خواهد داشت. بر این اساس بیشترین حجم سیال در ماتریکس سنگ از دست خواهد رفت. بر اساس نتایج مدل‌سازی انجام شده برای سازند کژدمی، در نرخ تزریق ۱۰ بشکه بر ساعت، حجم سیال نفوذی به درون شکستگی‌ها با حجم سیال تراوش کرده به ماتریکس تقریباً برابر است. در نرخ‌های پایین تزریق سیال حفاری، گسترش در امتداد شکستگی کمتر (جابجایی برشی کمتر) و در نتیجه سطح تماس سیال با سازند در امتداد شکستگی‌ها کمتر خواهد بود. در نرخ‌های تزریق پایین فشار سیال در امتداد شکستگی‌ها بیشتر است (Taheri, 2018). این مسئله در نمودار شکل (۸)، (c) ارائه شده است.

در واقع در این حالت حجم بیشتری سیال در فضای کمتری حضور خواهد داشت. بنابراین در نرخ‌های پایین تزریق مسدودسازی شکستگی‌ها از اهمیت بیشتری برخوردار است. در یک محیط دارای شکستگی افزایش نرخ تزریق منجر به افزایش جابجایی‌های برشی خواهد شد. در یک فرآیند کارآمد حفاری در شرایط حضور شکستگی با تعیین یک نرخ بهینه تزریق (نرخ پایین) و استفاده از (LCM) متناسب با شرایط حفاری در محل، مسئله هرزروی سیال تا حدی کنترل خواهد شد.

سنگ در تماس خواهد بود (شکل ۱۱). بنابراین در نرخ‌های بالای تزریق علاوه بر تراوش سیال از دیواره چاه به سازند مجاور، بخشی از سیال از طریق سطح تماس مشترک در امتداد شکستگی‌ها به درون سازند تراوا جریان پیدا می‌کند (شکل ۱۰، a). بر این اساس در یک فرآیند تزریق با نرخ بالا باید به این مسئله توجه داشت که با گسترش بیشتر سیال در امتداد شکستگی‌ها (در اثر افزایش جابجایی برشی) سطح بیشتری برای نفوذ سیال به درون سازند ایجاد خواهد شد؛ هرچند مسئله وقوع ناپایداری و شکست چاه در اثر جابجایی‌های برشی در امتداد شکستگی‌ها بر پیچیدگی این فرآیند می‌افزاید.

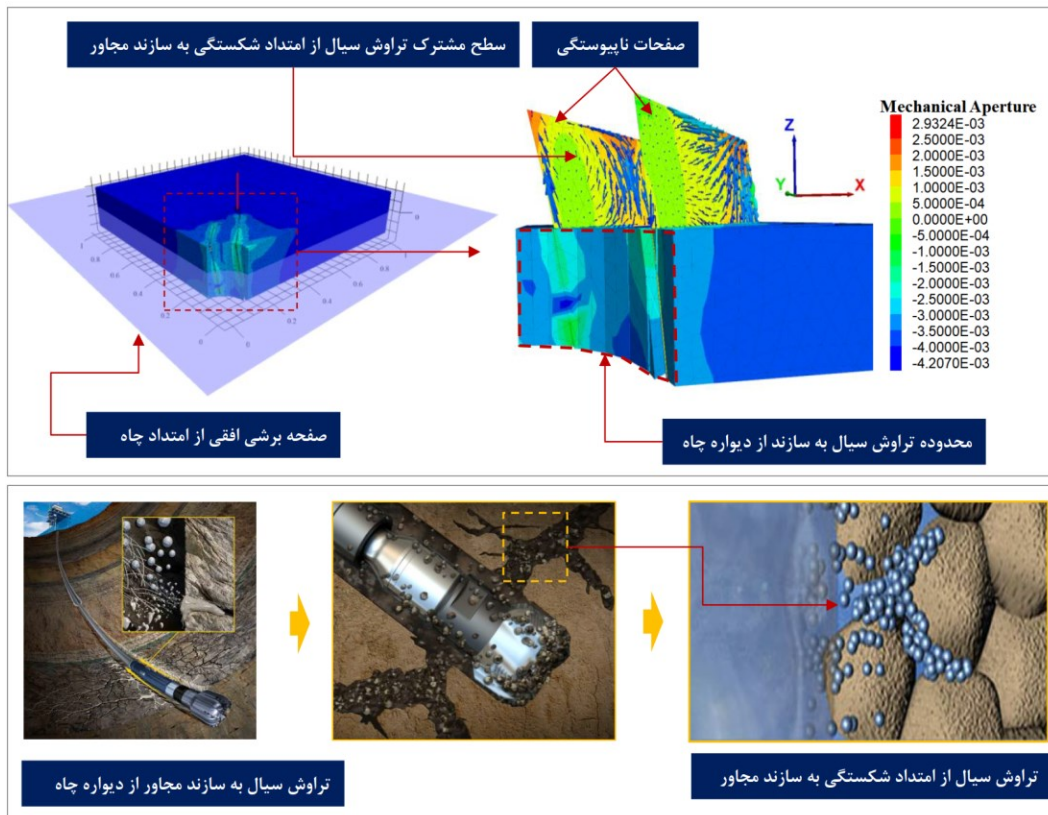
به منظور بررسی هرزروی سیال، در نرخ‌های تزریق متفاوت، حجم هرزروی سیال در ماتریکس و شکستگی به طور هم‌زمان تعیین شد. برای تعیین رابطه بین حجم سیال تراوش کرده به سازند و میزان هرزروی سیال در شکستگی‌ها برای نرخ‌های تزریق متفاوت، نمودارهای هر یک بر حسب درصد هرزروی برای هر بخش به دست آمد (شکل ۱۲). با افزایش نرخ تزریق سیال، حجم سیال وارد شده به شکستگی‌ها افزایش می‌یابد. این مسئله به علت افزایش جابجایی‌های برشی و گسترش بیشتر فضای بین شکستگی‌ها است. در این حالت سطح تماس مشترک در امتداد صفحات ناپیوستگی با سازند مجاور نیز افزایش می‌یابد. بنابراین سیال علاوه بر محدوده



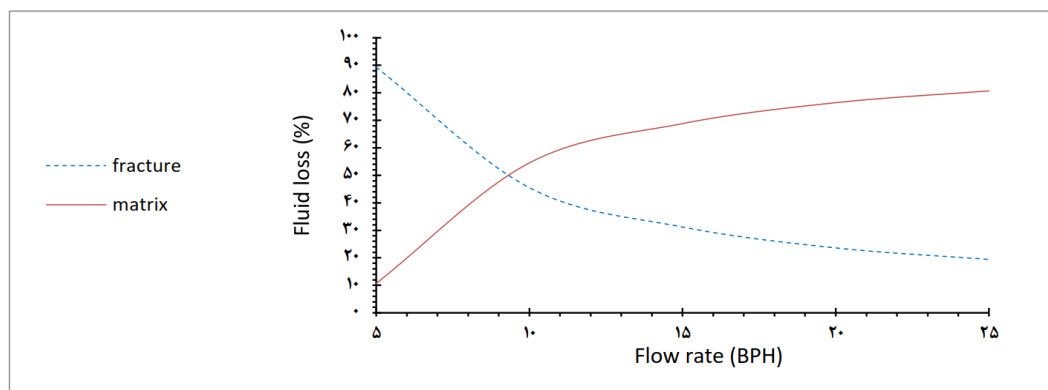
شکل ۱۰. (a) نمایش بردارهای تخلیه سیال در مجاورت چاه و امتداد شکستگی‌ها. (b) نمودار تغییرات حجم هرزروی سیال

بررسی مکانیسم هرزروی گل حفاری برای چاه قائم در سازند دارای شکستگی با در نظرگیری شرایط تخلخل دوگانه ...

(در شکستگی) در مقابل تغییرات نرخ تزریق.



شکل ۱۱. (a) نمایش بردارهای تخلیه سیال در مجاورت چاه و امتداد شکستگی‌ها. (b) نمودار تغییرات حجم هرزروی سیال (در شکستگی) در مقابل تغییرات نرخ تزریق.



شکل ۱۲. نمایش نمودارهای میزان تراوش سیال در ماتریکس و حجم سیال نفوذی به درون شکستگی‌ها برحسب درصد برای نرخ‌های تزریق متفاوت.

علاوه بر تراوش سیال از دیواره چاه به سازند مجاور، تراوش در سطح تماس مشترک شکستگی و ماتریکس مجاور آن نیز

با توجه به نمودار (۱۲) با افزایش نرخ تزریق درصد بیشتری از سیال به ماتریکس سنگ تراوش خواهد کرد. در این حالت

رخ خواهد داد. همان‌طور که بیان شد با افزایش نرخ تزریق گسترش شکستگی و سیال درون آن بیشتر خواهد بود. نتایج بررسی هرزروی سیال در ماتریکس سنگ و شکستگی‌ها نشان می‌دهد که نقش اصلی در هرزروی سیال توسط ماتریکس سنگ ایفا می‌شود. در واقع با افزایش مکانیسم‌های برشی و گسترش سیال در امتداد صفحات ناپیوستگی، فصل مشترک بیشتری برای جریان سیال به درون سازند سنگی (ماتریکس سنگ) به وجود خواهد آمد. هرچند در یک نرخ تزریق مشخص سهم سیال نفوذ کرده به ماتریکس و شکستگی برابر است. این بدین علت است که در یک نرخ تزریق مشخص سیال به آرامی در فضای چاه (دیواره و شکستگی) جریان می‌یابد و جابجایی‌های برشی و لغزش در امتداد شکستگی افزایش چندانی نداشته در نتیجه امکان ایجاد یک جریان وسیع (گسترش بیشتر سیال در فضای شکستگی) در محدوده چاه و شکستگی‌ها وجود نخواهد داشت. در این حالت سیال با نرخ جریان آرامی به درون شکستگی وارد شده و اثر چندانی برافزایش جابجایی‌ها در امتداد ناپیوستگی نداشته و در نتیجه گسترش جریان (پخش بیشتر سیال) کمتر خواهد بود. با افزایش نرخ تزریق جابجایی‌های برشی در امتداد شکستگی افزایش و در نتیجه سطح مشترک تماسی بیشتری بین ماتریکس و سیال به وجود خواهد آمد و در نهایت سیال از این فصل مشترک به ماتریکس سنگی نفوذ خواهد کرد.

### ۵.۳ نفوذپذیری وابسته به تنش در مجاورت چاه قائم

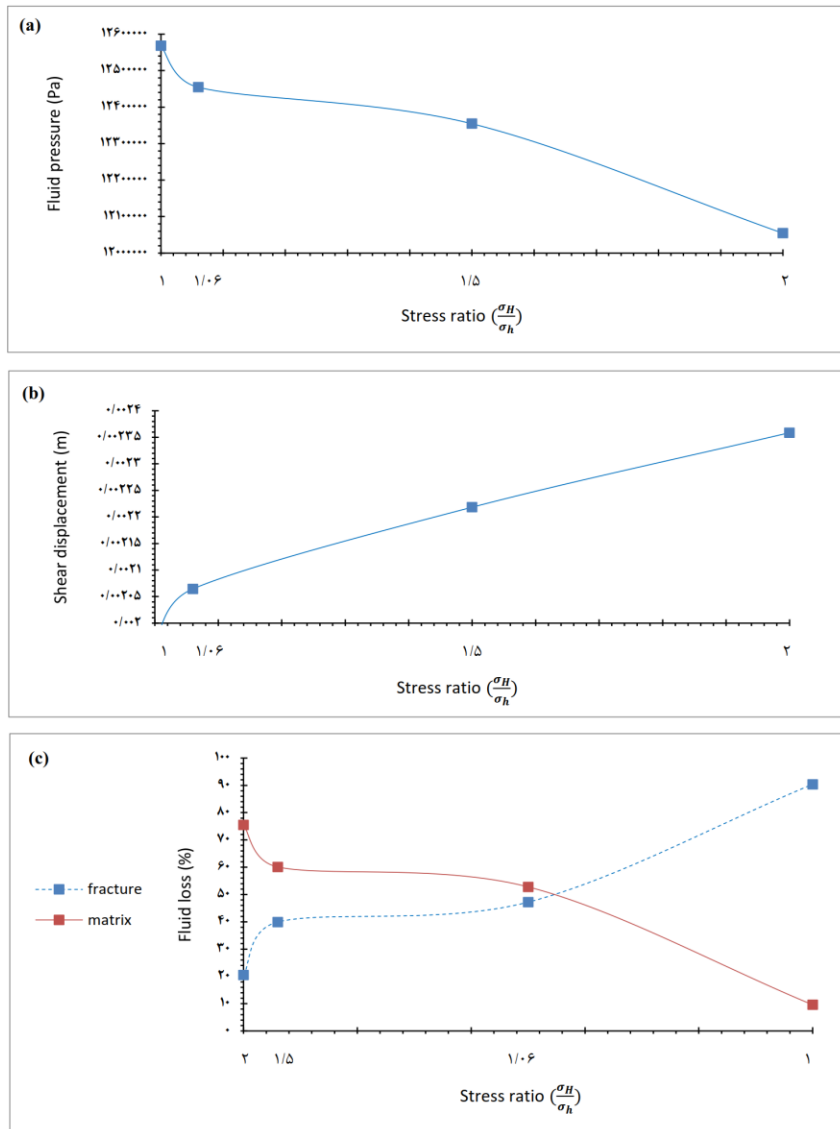
وضعیت تنش همسانگرد معرف یک حالت پایدار در محدوده چاه است. در واقع در شرایطی که نرخ تنش‌های برجا نزدیک به ۱ باشد، جابجایی‌های برشی و لغزش در امتداد شکستگی‌ها محدود خواهد شد (Karatela, 2016). به منظور بررسی اثر نرخ تنش‌های برجا در هرزروی و وقوع مکانیسم‌های ناپایداری در امتداد چاه، ۴ سناریو متفاوت از نرخ تنش‌های برجا مورد بررسی قرار گرفت. نرخ تنش‌های برجا ۱ معرف وضعیت همسانگرد در محدوده چاه است. در این حالت وقوع لغزش و جابجایی‌های برشی در امتداد شکستگی‌ها محدود شده و در نتیجه در نرخ تزریق مشخص (۱۰ بشکه بر ساعت)، گسترش سیال در صفحات ناپیوستگی کمتر خواهد بود. در حالتی که نرخ تنش‌های برجا ۲ در نظر گرفته شده است، افت

فشار سیال در محدوده شکستگی‌ها مشاهده می‌شود (شکل ۱۳). با افزایش نسبت تنش‌های افقی بیشینه به کمینه ( $\frac{\sigma_{Hh}}{\sigma_{Vh}}$ )، مکانیسم‌های برشی در امتداد شکستگی تشدید خواهد شد. در واقع در یک حالت ناهمسانگرد تنش برجا، برش و لغزش در امتداد شکستگی بیشتر خواهد بود. در نتیجه گسترش سیال در محدوده فضای بین شکستگی‌ها نیز افزایش خواهد یافت. این امر موجب افت فشار سیال در شکستگی‌ها خواهد شد. در مقابل با افزایش سطح تماس مشترک سیال و ماتریکس مجاور شکستگی‌ها، امکان تراوش سیال از شکستگی‌ها به سازند مجاور افزایش می‌یابد. در نتیجه درصد حجمی از سیال که در اثر نفوذپذیری ماتریکس هرز خواهد رفت بیشتر می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱۳، a) مشاهده می‌شود، فشار سیال در محدوده شکستگی‌ها با نزدیک شدن به وضعیت تنش ناهمسانگردی ( $\frac{\sigma_{Hh}}{\sigma_{Vh}} = 2$ )، کاهش می‌یابد. به همین ترتیب با افزایش نرخ تنش‌های برجا (رسیدن به وضعیت تنش ناهمسانگرد) جابجایی‌های برشی در محدوده شکستگی‌ها افزایش می‌یابد (شکل ۱۳، b). همان‌طور که در شکل (۱۳، c) مشاهده می‌شود، با گرایش مدل به سمت فضای تنش همسانگرد، درصد بیشتری از سیال در فضای شکستگی‌ها حضور خواهد داشت. در واقع در وضعیت تنش همسانگرد و محدود بودن جابجایی‌های برشی و لغزش در امتداد شکستگی‌ها، گسترش سیال در محدوده شکستگی‌ها کمتر خواهد بود. در نتیجه تراوش سیال به ماتریکس سنگ، به‌طور غالب از دیواره چاه رخ خواهد داد و سطح مشترک بین صفحات شکستگی و ماتریکس مجاور آن نقش کمتری در هرزروی سیال ایفا می‌کند. در حالتی که رژیم تنش برجا در محل حفاری در وضعیت ناهمسانگرد برآورد شود، مکانیسم‌های برشی و احتمال لغزش در امتداد شکستگی تشدید خواهد شد. در این حالت سیال در امتداد شکستگی‌ها گسترش بیشتری خواهد داشت. هرچند باید به این موضوع توجه کرد که در نرخ‌های تزریق بالا مکانیسم‌های برشی نیز تشدید خواهد شد. هرچند شدت لغزش‌ها و گسترش سیال در این نرخ‌های تزریق بالا بیشتر خواهد بود. در واقع نقش نرخ تزریق سیال در بروز لغزش و برش در امتداد شکستگی در وضعیت رژیم تنش ناهمسانگرد تشدید خواهد شد. در یک برآورد کلی برای بررسی هرزروی سیال در امتداد شکستگی‌ها و ماتریکس سنگ باید بیان کرد که علت اصلی در حجم سیال

بررسی مکانیسم هرزروی گل حفاری برای چاه قائم در سازند دارای شکستگی با در نظرگیری شرایط تخلخل دوگانه ...

نرخ تنش‌های برجا وابستگی بسیار بیشتری خواهد داشت. چراکه در حالت رژیم تنش ناهمسانگرد گسترش شکستگی و لغزش‌های امتدادی افزایش خواهد یافت. برای سازند مورد بررسی (کژدمی) نرخ تنش‌های برجا نسبتاً پایین و وضعیت تقریباً به‌صورت یک رژیم تنش همسانگرد برآورد شده است.

نفوذ کرده به ماتریکس مجاور چاه، سطح تماس بین سیال حفاری و محیط سنگی است. بنابراین گسترش این سطح تبادل جریانی به منظره افزایش حجم هرزروی است. بررسی وابستگی نفوذپذیری ماتریکس و شکستگی‌ها در مجاور چاه به نرخ تنش‌های برجا نشان داد که نفوذپذیری شکستگی به



شکل ۱۳. (a) نمودار تغییرات فشار سیال در امتداد شکستگی در مقابل نرخ تنش‌های برجا متفاوت. (b) نمودار تغییرات جابجایی برشی در امتداد شکستگی در مقابل نرخ تنش‌های برجا متفاوت. (c) نمایش نمودار مقایسه‌ای بین سهم ماتریکس و شکستگی در هرزروی سیال در مقابل نرخ تنش‌های برجا متفاوت.

در نتیجه در تعیین مشخصات بهینه برای نرخ تزریق، گرلروی و سایر خصوصیات گل حفاری، می‌بایست اثر نرخ‌های بالای تزریق و گرلروی برای وقوع برش و لغزش در امتداد شکستگی با درجه اهمیت بالاتری در نظر گرفته شود. هر چند در تمام موارد بررسی شده برای مدل هیدرومکانیکی چاه مذکور در سازند کزدمی، مکانیسم‌های برشی بیشتر متأثر از خصوصیات پایین ژئومکانیکی این سازند است. در واقع در یک شرایط خاص حفاری چاه، خصوصیات ژئومکانیکی فاکتور کلیدی در رفتار ناپایداری چاه است (Taheri, 2018).

#### ۴. نتیجه‌گیری

فرآیندهای هیدرومکانیکی در محدوده چاه در حالت حضور شکستگی بسیار پیچیده و نیازمند بررسی پارامترهای رفتاری متعددی است. در این مقاله با استفاده از روش المان مجزا مدل سه‌بعدی هیدرومکانیکی چاه در سازند دارای شکستگی بررسی شد. هرزروی سیال با در نظر گرفتن شرایط تخلخل دوگانه (ماتریکس و شکستگی) در محدوده چاه برای رژیم‌های تنش مختلف و نرخ‌های تزریق سیال متفاوت بررسی شد. شکستگی‌های منطقه بر اساس روش شبکه شکستگی‌های مجزا (DFN) و منطبق بر مشخصه‌های ساختاری ناپیوستگی در مجاورت چاه ایجاد شد. به منظور ارزیابی اولیه چاه، بر اساس معیار بیشترین جابجایی مجاز در دیواره چاه انجام شده است. با توجه به حد آستانه ۰/۱٪ مجاز برای جابجایی دیواره، چاه مورد نظر در وضعیت پایداری نسبی قرار دارد. با تزریق سیال به چاه مکانیسم‌های هیدرومکانیکی در محدوده چاه منجر به وقوع جابجایی‌های برشی و تغییر فشار سیال در امتداد شکستگی‌ها خواهد شد. نتایج حاصل از بررسی پارامترهای متغیر برای نرخ‌های تزریق متفاوت به شرح زیر است.

۱- با شروع فرآیند تزریق، فشار در مجاورت چاه و در امتداد شکستگی‌ها افزایش می‌یابد و این فشار در امتداد طول شکستگی رو به کاهش است. در واقع فشار سیال در ابتدا و انتهای فاصله طولی از محل تزریق به ترتیب در بالاترین و پایین‌ترین حد خود است.

۲- برای نرخ‌های تزریق بالاتر، جابجایی‌های برشی و لغزش در امتداد شکستگی افزایش می‌یابد. این مسئله بر اثر کاهش تنش نرمال مؤثر و وقوع لغزش در صفحات ناپیوستگی است.

۳- فشار سیال در امتداد شکستگی‌ها برای نرخ‌های پایین تزریق در بالاترین حد خود به دست آمد. این مسئله در اثر گسترش کمتر سیال در فضای بین شکستگی‌ها و تمرکز حجم بالاتری از سیال در فضای کوچک‌تر است.

۴- با افزایش نرخ تزریق سیال، فشار سیال در امتداد شکستگی‌ها کاهش می‌یابد. در نرخ‌های بالای تزریق سیال، جابجایی‌های برشی و لغزش‌های امتدادی بیشتر خواهد بود. در نتیجه سیال در فضای بیشتری گسترش خواهد یافت و در نتیجه افت فشار سیال مشاهده خواهد شد (Taheri, 2018).

در وضعیت تنش‌های همسانگرد برای محدوده چاه، جابجایی برشی و مکانیسم‌های لغزشی محدود خواهد شد. با افزایش نرخ‌های تنش‌های بر جای افقی بیشینه به کمینه، ناپایداری در محدوده مجاور چاه افزایش خواهد یافت. در نتیجه گسترش سیال در امتداد شکستگی‌ها افزایش می‌یابد. افت فشار در حالت تنش‌های ناهمسانگرد نیز به همین علت مشاهده خواهد شد. بررسی تراوش سیال به ماتریکس سنگ و شکستگی‌های مجاور چاه بر اساس حجم سیال اولیه تزریق شده و اختلاف آن با بخشی از سیال که در شکستگی‌ها وارد می‌شود انجام شد. در واقع با تعیین حجم سیال نفوذی به درون فضای شکستگی و در اختیار داشتن حجم اولیه تزریق، امکان تخمین بخشی از سیال که به ماتریکس سنگ تراوش کرده وجود دارد. بر اساس بررسی‌های انجام شده نتایج به شرح زیر بیان می‌شود.

۱- با افزایش نرخ تزریق سیال، حجم هرزروی سیال افزایش خواهد یافت. بخشی از این سیال به شبکه شکستگی‌ها نفوذ می‌کند و بخش دیگر در ماتریکس سنگ جریان می‌یابد.

۲- در نرخ‌های تزریق پایین‌تر، سهم ماتریکس سنگ در هرزروی سیال بیشتر است. در این حالت

در یک بررسی کلی نتایج به شرح زیر بیان می‌شود.

- ۱- در شرایط حضور شکستگی در مجاورت چاه، بکار بردن نرخ‌های تزریق پایین سیال حفاری با در نظر گرفتن (LCM) مناسب امکان کنترل هرزروی سیال را بهبود خواهد بخشید.
- ۲- مسئله تراوش سیال از سطح مشترک صفحات ناپیوستگی و سازند تراوای مجاور آن بسیار مهم و باید به‌عنوان یک عامل تأثیرگذار در حجم نهایی هرزروی مورد بررسی قرار گیرد.
- ۳- استفاده از روش‌های حفاری با فشار مدیریت شده (MPD) بر اساس مکانیسم‌های برشی و لغزشی در امتداد شکستگی‌ها که بر اساس افزایش فشار سیال در امتداد آن‌ها رخ می‌دهد، می‌تواند در کاهش هزینه‌های ناشی از هرزروی سیال مؤثر باشد.
- ۴- در یک سازند پیچیده با شکستگی‌های چگال، تعیین نرخ تزریق و خصوصیات گل حفاری با در نظر گرفتن نرخ تنش‌های برجا ضروری است. نقش نرخ تنش‌های افقی بیشینه و کمینه در میزان هرزروی و مکانیسم‌های برشی در امتداد شکستگی‌ها اجتناب‌ناپذیر است.

به منظور شناخت رفتار غالب یک چاه در حضور شکستگی‌ها بررسی نقش توأمان ماتریکس و شکستگی در هرزروی سیال و وقوع شکست‌های احتمالی ضروری است. در بررسی مدل‌های شبیه‌سازی نرم‌افزاری بهره‌گیری از روش‌های پیشرفته و کارآمد در ایجاد ساختار سه‌بعدی شکستگی‌ها به بهبود نتایج مدل‌سازی کمک خواهد کرد. توصیه می‌شود در ایجاد مدل‌های سه‌بعدی هیدرومکانیکی شرایط دمایی و بارگذاری‌های دینامیکی لحاظ گردد. در نهایت در یک مدل عددی کارآمد بررسی مجموعه‌ای از فرآیندهای توأمان با در نظرگیری پارامترهای متعدد و وابسته ضروری است.

گسترش شکستگی‌ها کمتر و بخش عمده سیال از محدوده دیواره چاه و فضای متخلخل ماتریکس مجاور آن از دست خواهد رفت.

- ۳- با افزایش نرخ تزریق سیال فضای گسترش‌یافته بیشتری برای حضور سیال در امتداد شکستگی‌ها ایجاد خواهد شد. این مسئله بر اثر افزایش جابجایی‌های برشی و لغزش در امتداد شکستگی‌ها است. در این حالت فشار سیال در امتداد شکستگی‌ها افت خواهد کرد. هر چند مسئله تراوش سیال حفاری از فصل مشترک صفحات شکستگی و ماتریکس سنگی مجاور آن منجر به افزایش سهم ماتریکس در هرزروی سیال خواهد شد. در این حالت نودهای اشتراکی جریان سیال در امتداد شکستگی و پوسته مجاور سنگی آن، مجرای تراوش گسترده‌تری برای سیال ایجاد خواهد کرد.

نفوذپذیری وابسته به تنش بخش دیگر این بررسی است. در این حالت برای ۴ نرخ تنش بر جای متفاوت، هرزروی و مکانیسم‌های برشی در امتداد شکستگی‌ها بررسی شده است. نتایج به شرح زیر است.

- ۱- در وضعیت تنش‌های همسانگرد (نرخ‌های پایین‌تر تنش‌های برجا) جابجایی برشی در امتداد شکستگی‌های محدود و در نتیجه گسترش سیال در امتداد آن‌ها کمتر خواهد بود. در این حالت سهم فصل مشترک صفحات شکستگی و ماتریکس سنگی مجاور آن در نشت سیال کمتر خواهد بود. در این حالت بخش عمده سیال در محدوده دیواره سنگی چاه جریان خواهد داشت.
- ۲- فشار سیال در امتداد شکستگی‌ها در رژیم تنش‌های ناهمسانگرد کاهش خواهد یافت و سهم ماتریکس سنگ در هرزروی سیال افزایش می‌یابد.

## منابع

- Abdideh, M. a. (2013). Estimating the reservoir permeability and fracture density using petrophysical logs in Marun oil field (SW Iran). *Petroleum Science and Technology*, 1048-1056.
- Almagro, S. P. (2014). Sealing fractures: Advances in lost circulation control treatments. *Oilfield Review*, 4-13. Retrieved from Schlumberger .
- Baecher, G. B. (1983). Statistical analysis of rock mass fracturing. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 329-348.
- Bour, O. a. (2002). A statistical scaling model for fracture network geometry, with validation on a multiscale mapping of a joint network (Homelen Basin, Norway). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, ETG-4.
- Cao, N. a. (2019). Stress-Dependent Permeability of Fractures in Tight Reservoirs. *Energies*, 117.
- Cappa, F. a.-F. (2006). Hydromechanical modelling of pulse tests that measure fluid pressure and fracture normal displacement at the Coaraze Laboratory site, France. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1062-1082.
- Halliburton . (2018). Retrieved from Halliburton : <https://www.halliburton.com/en-US/default.html>
- Han, G. a. (2003). Description of fluid flow around a wellbore with stress-dependent porosity and permeability. *Journal of Petroleum science and engineering*, 1-16.
- Hart, R. (2003). Enhancing rock stress understanding through numerical analysis. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 1089-1097.
- Itasca. (2016). 3DEC User Manual Version 5.2. Minneapolis: Itasca Consulting Group.
- Karatela, E. a. (2016). Study on effect of in-situ stress ratio and discontinuities orientation on borehole stability in heavily fractured rocks using discrete element method. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 139, 94-103.
- Labenski, F. a. (2003). Drilling Fluids Approaches for Control of Wellbore Instability in Fractured Formations. *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition*. Abu Dhabi: Society of Petroleum Engineers.
- Lei, Q. a.-P.-F. (2017). The use of discrete fracture networks for modelling coupled geomechanical and hydrological behaviour of fractured rocks. *Computers and Geotechnics*, 151-176.
- Li, S. a. (2012). Pore-pressure and wellbore-stability prediction to increase drilling efficiency. *Journal of Petroleum Technology*, 64, 98-101.
- Mansour, A. a. (2019). Smart lost circulation materials for productive zones. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 281-296.
- Meng, M. a. (2019). Wellbore stability in naturally fractured formations featuring dual-porosity/single-permeability and finite radial fluid discharge. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 790-803.



بررسی مکانیسم هرزروی گل حفاری برای چاه قائم در سازند دارای شکستگی با در نظرگیری شرایط تخلخل دوگانه ...

- Min, K.-B. a.-F. (2004). Stress-dependent permeability of fractured rock masses: a numerical study. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1191-1210.
- Nagel, N. a.-N. (2013). Coupled numerical evaluations of the geomechanical interactions between a hydraulic fracture stimulation and a natural fracture system in shale formations. *Rock mechanics and rock engineering*, 581-609.
- Salehi, S. a. (2010). Numerical simulations of wellbore stability in under-balanced-drilling wells. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 229-235.
- Sapigni, M. a. (2003). Engineering geological characterization and comparison of predicted and measured performance of a cavern in the Italian Alps. *Engineering geology*, 47-62.
- Taheri, A. (2018). Three-dimensional hydro-mechanical model of borehole in fractured rock mass using discrete element method. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 53 , 263–275.
- Tour, J. M. (2012). Graphene compositions and drilling fluids derived therefrom. United States Patent and Trademark Office.
- Valenti, N. P. (2002). A unified theory on residual oil saturation and irreducible water saturation. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- Zhang, J. (2013). Borehole stability analysis accounting for anisotropies in drilling to weak bedding planes. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 160-170.
- Zhang, X. a. (1999). Numerical modelling of wellbore behaviour in fractured rock masses. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 95-115.
- Zhang, Z. a. (2018). Effects of stress-dependent permeability on well performance of ultra-low permeability oil reservoir in China. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 565-575.