

مطالعه اثر نرخ تنش‌های برجا بر پایداری چاه قائم با استفاده از روش المان مجزا- شبکه شکستگی‌های مجزا: مطالعه موردی یکی از چاه‌های خلیج فارس

محمد کمیلیان^{۱*}، امید سعیدی^۲، مهدی رهبر^۳

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- دکتری ژئومکانیک، اداره زمین شناسی، شرکت نفت فلات قاره، تهران

۳- کارشناس ارشد، اداره زمین شناسی، شرکت نفت فلات قاره، تهران

(دریافت: خرداد ۱۳۹۸، پذیرش: آبان ۱۳۹۸)

چکیده

ناپایداری چاه و هرزروی سیال حفاری در سازندهای دارای شکستگی یکی از مسائل عمده در حفاری‌های عمیق است. بررسی اثر حضور شکستگی‌ها بر مکانیزم‌های ناپایداری چاه و هرزروی سیال حفاری اهمیت ویژه‌ای در تعیین یک الگوی حفاری کارآمد دارد. در این مقاله به منظور ارزیابی پایداری چاه قائم و همچنین بررسی هرزروی سیال حفاری، شبیه‌سازی سه‌بعدی یک چاه در یکی از میدان‌های نفتی خلیج فارس ارائه شده است. شبیه‌سازی شرایط هیدرومکانیکی این چاه و پیاده‌سازی شکستگی‌های منطقه به ترتیب با استفاده از روش المان مجزا و شبکه شکستگی‌های مجزا انجام شده است. به منظور اعتبارسنجی مدل ارزیابی پایداری، از معیار بیشترین جابجایی مجاز، میانگین شعاع زون شکست پلاستیک و لاگ کالیپر، استفاده شده است. ارزیابی پایداری اولیه مدل نشان داد که در عمق متناسب به سازند کژدمی، چاه در یک وضعیت ناپایدار قرار دارد. به منظور بررسی مکانیزم‌های هیدرومکانیکی چاه در سازند دارای شکستگی، تزریق سیال حفاری با گرانروی ۱/۰۸ سانتی‌پوآز و نرخ ۲۵ بشکه بر ساعت انجام شد. لغزش در امتداد شکستگی‌ها، جابجایی برشی و حجم سیال هرزروی به عنوان پارامترهای موردبررسی تعیین شده است. اثر نسبت تنش‌های برجا ($\frac{\sigma_H}{\sigma_h}$) بر وضعیت پایداری و هرزروی سیال حفاری در امتداد شکستگی‌ها برای شش سناریو متفاوت بررسی شد. با افزایش نسبت تنش‌های برجا و در حالت ناهمسانگرد ($\frac{\sigma_H}{\sigma_h}=2$)، جابجایی برشی و لغزش در امتداد ناپیوستگی افزایش یافت. در این حالت برای نرخ تزریق سیال حفاری ۲۵ بشکه بر ساعت، فشار سیال در امتداد شکستگی‌ها کاهش پیدا می‌کند. بررسی پارامتری مدل برای پنج نرخ تزریق متفاوت از ۵ تا ۲۵ بشکه بر ساعت نشان داد که برای نسبت تنش‌های ($\frac{\sigma_H}{\sigma_h}=1/06$)، گسترش سیال در محدوده شکستگی‌ها بیشتر خواهد شد. همچنین شکست‌های کششی و جابجایی برشی در نرخ‌های تزریق پایین، کاهش یافت. برای نرخ تزریق ۵ بشکه بر ساعت، فشار سیال در امتداد شکستگی در مقایسه با سایر نرخ‌های تزریق، بیشتر خواهد بود. این مسئله بر اساس کاهش جابجایی برشی در نرخ‌های تزریق سیال پایین‌تر و گسترش کمتر سیال در فضای بین شکستگی‌ها است.

کلمات کلیدی

تنش‌های برجا، هرزروی سیال، پایداری چاه، روش المان مجزا، شبکه ناپیوستگی‌های مجزا، مدل‌سازی هیدرومکانیکی

*عهده‌دار مکاتبات: komaylian@aut.ac.ir

۱- مقدمه

به صورت هم‌زمان [۱۱] نیز جایگاه ویژه‌ای در این بخش از مطالعات چاه دارند. از آنجایی که مکانیزم‌های ناپایداری چاه در سازندهای دارای شکستگی بسیار پیچیده و شناخت آنها دشوار است، این مسئله نیازمند انجام مطالعات جامع‌تری است. در این بین با توجه به گسترش روزافزون روش‌های عددی و افزایش قابلیت‌های نرم‌افزاری در شبیه‌سازی شرایط پیچیده هیدرومکانیکی، امکان انجام مطالعات دقیق‌تر فراهم شده است. مطالعات عددی انجام شده در راستای بررسی مکانیزم‌های هیدرومکانیکی در سازندهای دارای شکستگی اغلب به منظور توصیف خصوصیات اختصاصی توده سنگ‌ها بوده است و کمتر به بررسی مکانیزم‌های هیدرومکانیکی مؤثر در پایداری چاه پرداخته شده است [۱۰]. باید به این نکته اشاره کرد که در این مطالعات شکستگی‌ها اغلب به صورت صریح و با تعریف خصوصیات آنها به صورت مستقیم در مدل‌های عددی بررسی شده است. این در حالی است که پیچیدگی سیستم شکستگی‌ها و عدم وجود اطلاعات کافی از ماهیت هندسی این ناپیوستگی‌ها در لایه‌های زیرسطحی از جمله موارد دشوار در این بخش از مطالعات عددی است. هر چند روش‌های جدیدی مانند شبکه شکستگی‌های مجزا^۱ (DFN) با قابلیت ایجاد یک مدل سه‌بعدی از سیستم شکستگی‌ها به صورت تصادفی و بر اساس پارامترهای آماری و توابع توزیع احتمال مشخص، برخی از این دشواری‌ها را تسهیل نموده است [۱۲]. در ارزیابی پایداری چاه‌ها روش‌های عددی مختلفی به کار رفته است. روش المان محدود، تفاضل محدود و المان مرزی از این جمله است. باید توجه داشت که این روش‌ها به طور غالب برای شبیه‌سازی محیط‌های پیوسته بوده است [۱۳]. علاوه بر این، فرمولاسیون این روش‌ها در حالتی که مسئله مورد نظر شامل ناپیوستگی و سطوح شکستگی متقاطع باشد، محدود است [۱۴]. بهره‌گیری از روش المان مجزا^۲ (DEM) در مدلسازی محیط‌های دارای ناپیوستگی برخی از محدودیت‌های روش‌های بر پایه محیط پیوسته را مرتفع می‌کند. در مدلسازی به روش المان مجزا، توده سنگ به صورت 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 این بلوک‌ها فرض می‌شوند [۱۴]. روش المان مجزا در مطالعات متعددی مرتبط با مسئله دفع زباله‌های هسته‌ای [۱۵]،

حفظ یکپارچگی چاه و جلوگیری از وقوع ناپایداری به منظور کاهش زمان غیر مولد (NPT) یکی از مهم‌ترین مسائل در حفاری چاه‌های نفت و گاز است. تغییر شکل‌ها، بازشدگی دهانه چاه و شکست‌های القایی ناشی از حفاری، پیامدهای بسیاری را به دنبال داشته و در مواردی می‌تواند منجر به فروشکست چاه و حتی خارج کردن چاه از چرخه بهره‌برداری شود. همچنین عدم وجود یک ارزیابی دقیق و کامل از فرآیندهای منتج به وقوع ناپایداری در چاه، می‌تواند باعث ایجاد مشکلاتی از قبیل گیرکردن میله حفاری، شسته شدن دیواره^۳ چاه، افزایش بیش از حد قطر دهانه چاه در عمق زیاد، بسته‌شدگی در اثر فشار بالاتر از حد تعادل^۴ چاه و در مواردی هرزروی سیال به صورت جزئی و یا از دست رفتن کل چرخه گردش گل حفاری^۵ شود [۱]. به طور میانگین ۱۰ درصد از زمان حفاری یک چاه صرف رفع مشکلات ناشی از وقوع ناپایداری چاه می‌شود [۲]. خصوصیت‌های ویژه برخی سازندهای سنگی از جمله حضور شبکه شکستگی‌های طبیعی و اختلاف کم بین فشار منفذی^۶ (PP) و گرادیان شکستگی^۷ (FG) بر پیچیدگی حفاری می‌افزاید [۳]. حضور شکستگی‌ها به ویژه در سازندهای با نفوذپذیری پایین^۸ یکی از عوامل رایج و مشترک در ناپایداری چاه‌ها است [۳]. در این حالت (حضور شکستگی در سازند) مکانیزم‌های ناپایداری پیچیده و شناخت رفتار غالب بر چاه دشوار است. شرکت‌های بزرگ فعال در زمینه حفاری و بهره‌برداری، همواره به دنبال راه‌کارهای نوین و فناوری‌های پیشرفته به منظور کاهش زمان‌های غیر مولد خود و به تبع آن کاهش هزینه‌های بهره‌برداری از مخازن بوده‌اند. تاکنون مطالعات متعددی در زمینه ارزیابی پایداری چاه‌ها انجام شده است. از جمله چالش‌های مطالعاتی جدید در این زمینه شامل ارزیابی پایداری چاه در سازندهای غیر تحکیمی [۵]، توده سنگ-های شدیداً درزه‌دار [۶] و ارزیابی پایداری چاه‌های حفر شده در سازندهای بسیار عمیق [۷] است. روش‌های مختلفی در ارزیابی پایداری چاه‌ها وجود دارد. برخی از این روش‌ها بر پایه مطالعات تجربی [۸]، تحلیلی [۹] عددی [۱۰] است. هر چند ارزیابی پایداری و بررسی رفتار چاه با استفاده از روش‌های ترکیبی تجربی و عددی برای مثال بهره‌گیری از داده‌های مغزه‌گیری و نتایج مدلسازی عددی

فشار منفذی و در نهایت کاهش تنش مؤثر نرمال می‌شود. این مسئله منجر به رهایی برشی^{۱۲} و در نتیجه وقوع جابجایی‌های جانبی در صفحات شکستگی می‌شود [۱۰]. مطالعات بسیار محدودی در زمینه ارزیابی پایداری چاه در سازند دارای شکستگی انجام شده است که در آن فشار منفذی و سیال حفاری در نظر گرفته شده باشد [۱۰]. علاوه بر این، حضور شکستگی‌ها در مجاورت چاه مسئله هرزروی سیال حفاری را تشدید خواهد کرد. بنابراین ایجاد یک مدل سه‌بعدی از سیستم شکستگی‌ها و بهبود تطبیق نسبی این مدل با واقعیت برجا، برای شناخت رفتارهای توأمان و پیچیده هیدرومکانیکی در چاه ضروری است. شبیه‌سازی این سیستم سه‌بعدی از شبکه شکستگی‌های زیرسطحی نیازمند حجم بالایی از اطلاعات برجا است. دشواری و ضعف روش‌های اکتساب داده از لایه‌های زیرسطحی و کمبود این اطلاعات در مطالعات عددی اجتناب‌ناپذیر است. به همین منظور در این مطالعه روش شبکه شکستگی‌های مجزا (DFN) معرفی شده است. در این روش، ایجاد یک مدل سه‌بعدی از شکستگی‌های منطقه، بر اساس داده‌های آماری، توابع توزیع احتمال و به صورت تولید تصادفی انجام می‌شود [۱۲]. برتری این روش، تولید تصادفی سیستم شکستگی‌ها است. در این روش با استفاده از داده‌های محدودی که از مشخصه‌های ناپیوستگی‌های منطقه در اختیار است، یک مدل هندسی سه‌بعدی از شکستگی‌ها ایجاد می‌شود. این مدل که منطبق بر توابع توزیع احتمال و برخی پارامترها از خصوصیات برجا شکستگی‌ها است، تا حد خوبی با واقعیت برجا همخوانی دارد [۱۲]. یکی دیگر از مسائل مهم در ارزیابی پایداری چاه به روش عددی، انتخاب یک معیار مناسب برای اعتبارسنجی مدل و تعیین آستانه ناپایداری چاه است. اعتبارسنجی، به ایجاد یک مدل پایه با پاسخ نزدیک به واقعیت برجا کمک می‌کند [۱۰]. در این مقاله مدلسازی عددی سه‌بعدی یک چاه در یکی از میدان‌های نفتی خلیج فارس به روش المان مجزا (DEM) و شبکه شکستگی‌های مجزا (DFN) انجام شده است. مدل به منظور شبیه‌سازی شرایط هیدرومکانیکی چاه تنظیم شده است. بنابراین فشار منفذی در سازند مجاور چاه و همچنین جریان سیال حفاری، در نظر گرفته شده است. سیال حفاری به صورت تراکم‌ناپذیر فرض شده است. از نفوذپذیری ماتریکس سنگ چشم‌پوشی شده و سیال صرفاً در شکستگی‌ها جریان دارد. در این مدلسازی، تغییر

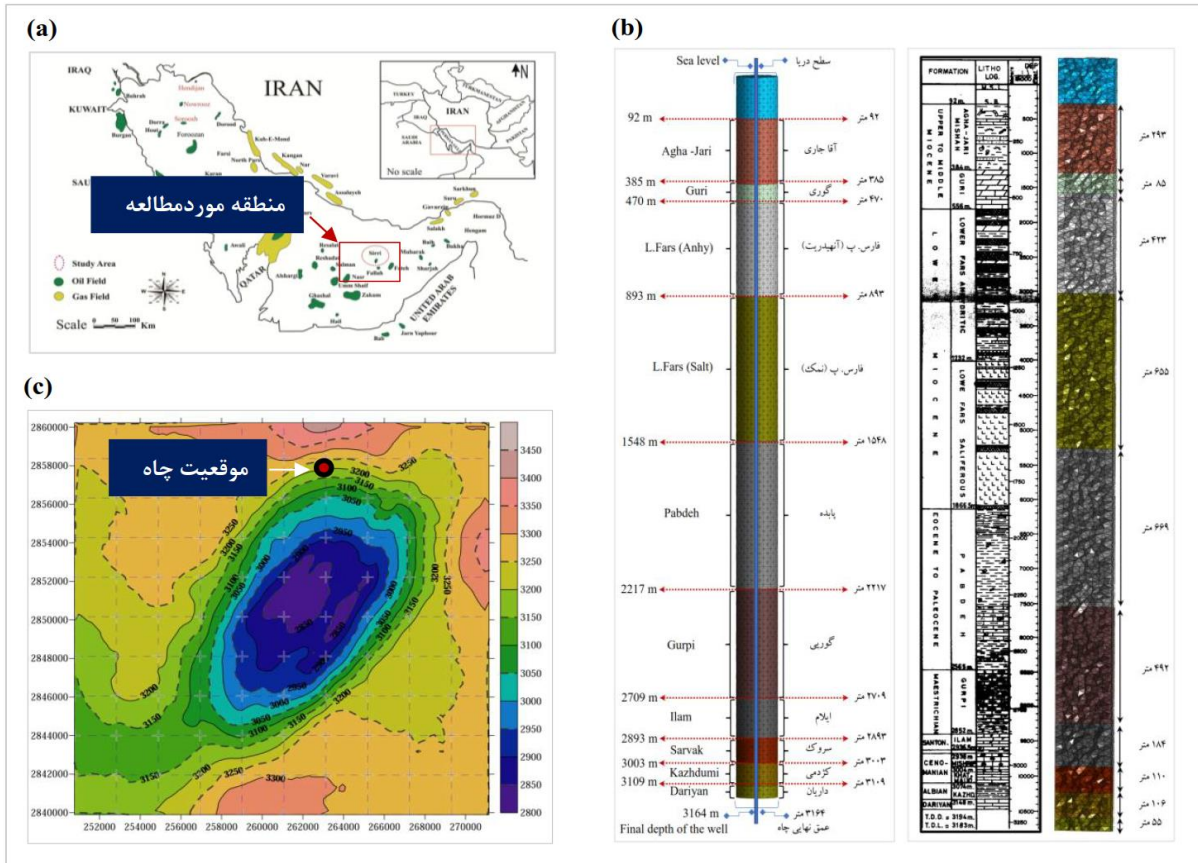
مدلسازی تنش‌های میدانی [۱۶]، شکست هیدرولیکی [۱۷]، نفوذپذیری وابسته به تنش^{۱۸} [۱۸] و ارزیابی پایداری سازه‌های زیرزمینی [۱۹] به کار گرفته شده است. این روش اثبات کرده است که یک ابزار حیاتی در فهم مکانیزم‌های شکست در توده سنگ‌های درزه‌دار و ارزیابی پایداری چاه در سازندهای دارای شکستگی است [۲۰]. یکی از فاکتورهای مؤثر در وقوع ناپایداری چاه، مسئله هرزروی سیال حفاری است. هرزروی سیال حفاری در محیط‌های دارای شکستگی با شدت بیشتری رخ می‌دهد. مکانیزم‌های کنترل‌کننده هرزروی در چاه، پیچیده و شناخت آنها ضروری است. این مسئله با مفهوم نفوذپذیری منتسب به شبکه شکستگی‌ها مرتبط است. در واقع نقش حضور شکستگی‌ها در هرزروی سیال و مکانیزم‌های ناپایداری متأثر از آن مورد نظر است. نفوذپذیری شکستگی‌ها (نفوذ سیال حفاری به درون شکستگی‌های مجاور چاه) یک مسئله با مکانیزم منفرد^{۱۱} (مستقل) نبوده و بر اساس ویژگی‌های محیطی و مشخصه‌های ژئومکانیکی برجای میدان (برای مثال نسبت تنش‌های برجا) متغیر است. بررسی نفوذپذیری وابسته به تنش از جمله موارد مهم در ارزیابی مکانیزم‌های هیدرومکانیکی در محیط‌های دارای شکستگی است. مطالعات متعددی به منظور بررسی اثر نسبت تنش‌های برجا بر نفوذپذیری سنگ و جریان سیال درون شکستگی ارائه شده است [۲۱-۲۳]. هر چند اثر نسبت تنش‌های برجا بر مکانیزم‌های هیدرومکانیکی و هرزروی سیال حفاری به طور کامل بررسی نشده است. ارزیابی مدل‌های هیدرومکانیکی و شبیه‌سازی فرآیندهای پیچیده در حضور شکستگی‌های طبیعی برای شناخت و درک مکانیزم‌های ناپایداری چاه ضروری است. علاوه بر این، بررسی مکانیزم‌های منتج به وقوع ناپایداری در چاه‌ها و ارزیابی مدل‌های عددی به ایجاد درک جامع از رفتار غالب چاه‌ها منجر خواهد شد. به همین منظور شرکت نفت فلات قاره ایران نیز بررسی مدل‌های جامع هیدرومکانیکی (به روش عددی) منطبق بر شرایط برجای میدان‌های نفتی را در دستور کار قرار داده است. از جمله اهداف این مطالعات بررسی مکانیزم‌های هیدرومکانیکی منتج به ناپایداری و هرزروی سیال حفاری است. همان طور که بیان شد یکی از مسائل مهم در بررسی پایداری چاه در سازندهای دارای شکستگی، هرزروی سیال حفاری سیال است. نفوذ سیال حفاری به درون شکستگی‌ها باعث افزایش

شکل‌های مکانیکی منجر به تغییرات در فشار منفذی و به طور متقابل تغییرات در فشار منفذی (تزیق سیال) منجر به وقوع تغییر شکل‌های مکانیکی در مدل خواهد شد [۱۴]. بررسی‌های جامع و پارامتری انجام شده در این مطالعه شامل هرزروی سیال، نفوذپذیری وابسته به نسبت تنش برجا و اثر نرخ تزیق سیال حفاری بر مکانیزم‌های ناپایداری چاه است. نتایج به دست آمده با رویکرد شناخت هر چه بیشتر مکانیزم‌های هیدرومکانیکی در محیط دارای شکستگی ارائه شده است. در این مطالعه به منظور اعتبارسنجی و ارزیابی پاسخ مدل، دو معیار با عنوان: بیشترین جابجایی مجاز [۶] و میانگین شعاع زون شکست پلاستیک نرمال شده^{۱۳} [۱۰] معرفی شده است. اعتبارسنجی مدل مبتنی بر معیار زون شکست پلاستیک با مقایسه داده‌های لاگ کالیپر انجام شده است. کلیه داده‌های به کار برده شده در این مدلسازی بر اساس گزارش‌های حفاری تهیه شده توسط شرکت نفت فلات قاره ایران برای یک چاه در خلیج فارس است.

۲- مشخصه‌های ساختاری میدان و چاه موردنظر در خلیج فارس

خلیج فارس دریای حاشیه‌ای است که طول آن حدود ۱۰۰۰ کیلومتر و عرض بین ۱۸۰ تا ۲۵۰ کیلومتر و حدوداً ۲۴۰۰۰۰ کیلومترمربع مساحت دارد. عمق آن به طور متوسط حدود ۳۵ متر بوده و عمیق‌ترین نقطه آن در تنگه هرمز حدود ۱۰۰ متر است. 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 دومی چندین ساختمان نفتی تشخیص داده شده است. این ساختمان‌های نفتی عبارت‌اند از: سیری (A)، سیری (B)، سیری (C)، سیری (D)، سیری (E)، سیری (F) و سیری (L) و همچنین ساختمان نفتی نصرت (فاتح شمالی). 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. حفاری در این میدان‌ها در مواردی تا عمق نهایی ۴۳۰۰ متر انجام شده است. هرزروی سیال

حفاری و در مواردی ریزش‌های موضعی شدید، منجر به تغییر مسیر حفاری^{۱۴} در این میدان‌ها شده است. به طور معمول در مواجهه با هرزروی‌های سنگین در مسیر حفاری از (LCM^{۱۵})، پلاگ‌های سیمانی^{۱۶} و سایر فرآیندهای سیمان‌کاری استفاده می‌شود. هر چند در موارد متعدد عدم کارایی فرآیندهای تزیق (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 تزیق و گرانروی گل حفاری نیز از جمله موارد مهم 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 ناپوستگی‌ها 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 شکستگی‌ها منطقه ایجاد و شبیه‌سازی شرایط هیدرومکانیکی پیچیده در چاه‌های این میدان انجام شده است. برای میدان مورد نظر ۱۰ سازند مشخص و بر اساس نقشه‌های ساختاری از موقعیت شکستگی‌ها در مسیر حفاری، سیستم شکستگی غالب برای عمق مورد بررسی تعیین شده است. یکی از مشخصه‌های این میدان، اختلاف شدید در مشخصه‌های ژئومکانیکی سازندها است. بنابراین تعیین یک روش حفاری کارآمد در مسیر حفاری نیازمند بررسی‌های جامع‌تر و به صورت 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.۱) موقعیت و ضخامت لایه‌ها درج شده است. موقعیت قرارگیری چاه مورد نظر در نقشه هم‌کناره منتسب به لایه ایلام نمایش داده شده است (شکل (c.۱)).



شکل ۱: (a) نمایش موقعیت نسبی منطقه مورد مطالعه. (b) مشخصات لایه‌بندی و ضخامت سازندها در مسیر چاه مورد نظر. (c) نمایش موقعیت نسبی چاه مورد نظر بر روی نقشه هم‌کناره لایه ایلام

گاما ($GRIM^{19}$)، لاگ کالیپر^{۲۰}، لاگ نوترون ($NPIM^{21}$) و لاگ تصویر بر اساس تغییرات مقاومت الکتریکی (FMS^{22}) است. اطلاعات و داده‌های جامع از مشخصات سازندها بر اساس گزارش‌های واحد پتروفیزیک شرکت نفت فلات قاره ایران تهیه و در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است.

به منظور بررسی رفتار چاه، بر اساس گزارش‌های هرزروی سیال و ناپایداری مقطعی در تراز عمقی ۲۵۰ تا ۳۲۰۰ متری، ۵ سازند اصلی با شروع از گورپی (شروع از عمق ۲۲۱۷ متری) انتخاب شده است. مشخصه‌های ژئومکانیکی سازندها در جدول ۱ درج شده است. مشخصه‌های اندازه‌گیری شده در چاه بر اساس داده‌های لاگ صوتی ($DTCO^{17}$) و ($DTSM^{18}$)، مغزه‌گیری، لاگ

جدول ۱: مشخصات ژئومکانیکی سازندهای معرف ۵ لایه از عمق ۲۷۰۰ تا ۳۱۶۴ متر برای چاه مورد مطالعه

نام سازند	مدول بالک GPa	مدول یانگ GPa	ضریب پواسن	مدول برشی GPa	چسبندگی MPa	زاویه اصطکاک deg	چگالی g/cm ³
گورپی	۶/۴۳	۶/۷۶	۰/۳۲	۷/۲۵	۲۴/۴۶	۲۶/۳۶	۲/۴۷
ایلام	۱۰/۷۰	۱۰/۶۲	۰/۳۳	۱۵/۵۸	۲۹/۷۰	۳۷/۵۷	۲/۶۴
سروک	۹/۰۵	۹/۹۴	۰/۳۲	۱۴/۱۹	۲۲/۳۱	۳۰/۹۳	۲/۵۰
کژدمی	۵/۰۰	۶/۰۵	۰/۳۰	۶/۵۸	۱۱/۰۰	۱۲/۰۲	۲/۲۶
داریان	۸/۴۹	۹/۶۷	۰/۳۱	۱۴/۲۱	۲۲/۳۶	۲۹/۵۶	۲/۵۷

چاه، شکستگی‌های مؤثر تعیین شد. برای محدوده عمقی در ۵ سازند مورد نظر، دو سیستم شکستگی (از نظر شیب و

بر اساس نقشه‌های ساختاری برای میدان مورد نظر، شکستگی‌های منطقه بررسی و با توجه به موقعیت نسبی

در محیط نرم‌افزار، با در نظر گرفتن برخی فرضیات ساده‌سازی در روش شبکه شکستگی‌های مجزا، داده‌های مورد نیاز در جدول ۲ درج شده است.

جهت شیب) مورد توجه قرار گرفته است. شیب و جهت شیب غالب برای این سیستم شکستگی که با عنوان (F_15_West) معرفی می‌شود در شکل ۲ درج شده است. به منظور پیاده‌سازی مدل سه‌بعدی از سیستم شکستگی‌ها

جدول ۲: مشخصه شکستگی‌های منطقه

سختی برشی ^{۲۵}	بازشدگی در حالت تنش نرمال صفر ^{۲۴}	سختی نرمال ^{۲۳}	چسبندگی	زاویه اصطکاک	بازشدگی باقی‌مانده
GPa	m	GPa	MPa	deg	m
۶	۰/۰۰۰۲۵	۹	۰	۳۲	۰/۰۰۰۱۲۵

منظور غلبه بر وضعیت ناپایدار چاه همراه بوده است. بررسی مغزه‌های گمانه در چاه و بررسی نمودارهای لاگ اکتساب شده از چاه موردنظر (توسط واحد زمین‌شناسی و پتروفیزیک شرکت نفت فلات قاره ایران) دو سیستم شکستگی غالب مندرج در شکل ۲ را به عنوان مبنای بررسی در مدل هیدرومکانیکی چاه معرفی کرده است. بر اساس مشخصات اولیه برآورد شده برای چاه و سازند شکسته مجاور آن، مدل‌سازی موردنظر در پنج بخش اصلی انجام شده است.

- ۱- پیاده‌سازی شکستگی‌های منطقه در روش (DFN)
- ۲- ساخت مدل عددی سه‌بعدی تنظیم شده برای بررسی مکانیزم‌های هیدرومکانیکی در چاه
- ۳- اعتبارسنجی مدل با استفاده از داده لاگ کالیپر
- ۴- ارزیابی پایداری اولیه و بررسی هرزروی سیال
- ۵- بررسی پارامتریک بر اساس نرخ تزریق سیال و نسبت تنش‌های برجا

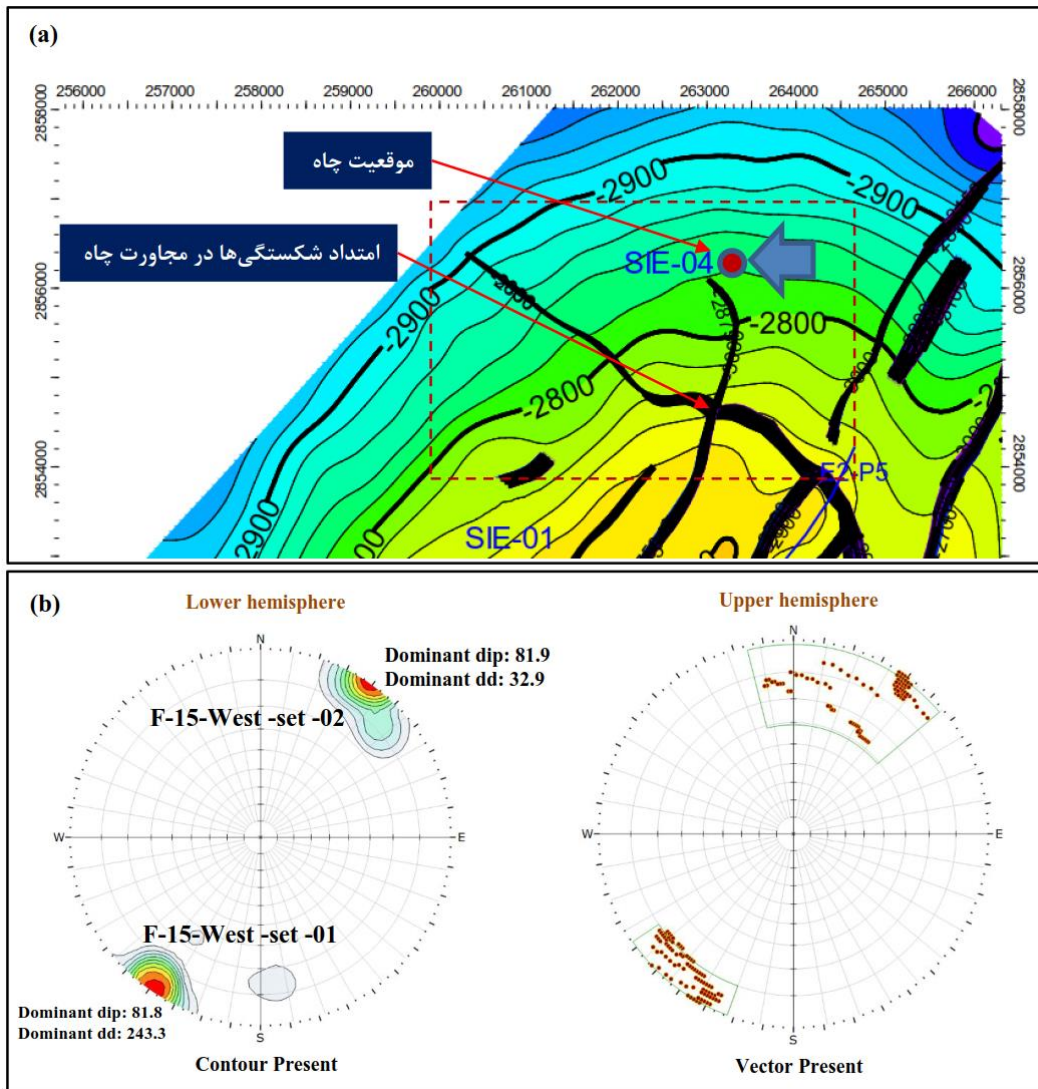
به منظور پیاده‌سازی مدل شکستگی‌ها از روش شبکه شکستگی‌های مجزا (DFN) و برای ساخت مدل هیدرومکانیکی از روش المان‌مجزا در محیط نرم‌افزاری (3DEC) استفاده شده است. ایجاد ساختار سه‌بعدی و تولید تصادفی شکستگی به روش (DFN) با بهره‌گیری از قابلیت نرم‌افزار (3DEC) انجام شده است. در واقع با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان هر دو بخش موردنظر یعنی پیاده‌سازی شبکه شکستگی‌ها و مدل سه‌بعدی هیدرومکانیکی چاه را ارائه نمود [۱۴].

مشخصه‌های مندرج در جدول ۲ بر اساس نتایج بررسی لاگ (FMS)، گزارش‌های مغزه‌گیری و برخی مقادیر پیش‌فرض در بررسی شکستگی‌ها (ارائه شده توسط واحد زمین‌شناسی شرکت نفت فلات قاره ایران) در نظر گرفته شده است. بر اساس داده‌های ژئومکانیکی موجود در منطقه گرادیان تنش قائم به صورت 25 MPa/Km تعیین شد. وزن روباره به صورت تنش قائم (σ_v) ثابت بر اساس رابطه (۱) به مدل اعمال گردید.

$$S_v = \int_{\text{Surface}}^{TVD} \rho g dz \quad (1)$$

در این رابطه (TVD) عمق قائم واقعی، (ρ) چگالی لایه‌های بالایی، (g) شتاب گرانش و (dz) تغییرات در عمق است. تنش‌های افقی بیشینه (σ_H) و کمینه (σ_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 به کار برده شده است. با توجه به رابطه (۱)، 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 MPa/Km تعیین شده است.

حفاری چاه در میدان موردنظر با مشکلات از دست رفتن گل حفاری و در مواردی انحراف چاه از مسیر ۲۶ به



شکل ۴: (a) نمایش موقعیت چاه در مقایسه با امتداد شکستگی در نقشه هم‌کناره برای سازند ایلام. (b) نمایش استریو گرام شکستگی‌های موردنظر در امتداد چاه

آنها در نظر گرفته می‌شوند. این مشخصه‌ها منطبق با توابع توزیع احتمال معین و بر پایه متغیرهای تصادفی مستقل استنتاج می‌شوند [۲۴]. برای مثال، جهت‌گیری شکستگی‌ها با استفاده از استریو گرام^{۲۷} و یا روزت^{۲۸} پردازش و بر اساس نوع تابع توزیعی که از آن تبعیت می‌کنند، در مجموعه‌های مجزا گروه‌بندی می‌شوند [۲۵]. این توابع توزیع می‌توانند از نوع نرمال، فیشر^{۲۹}، یکنواخت و ... باشند. اندازه شکستگی‌ها به طور معمول منطبق بر توابع توزیع قانون توانی، نمایی منفی، لاگ نرمال و گاما است. در این روش فرکانس شکستگی‌ها با مفهوم چگالی شکستگی و یا شدت شکستگی^{۳۰} توصیف می‌شود. چگالی شکستگی‌ها بر اساس سیستم (P_{ij}) که در آن (i) مفهوم بُعد نمونه (تک‌بعدی، دوبعدی و سه‌بعدی) و (j) بُعد اندازه‌گیری از آن نمونه

۳- پیاده‌سازی شکستگی‌های منطقه به روش DFN

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 به صورت 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، فاصله‌داری، بازشدگی و موقعیت قرارگیری

مدل سه‌بعدی نیز می‌تواند بر اساس توابع توزیع فیشر، گاوس^{۳۱} و یا به صورت کاملاً یکنواخت در تمام فضای مدل در نظر گرفته شوند. این روش تصادفی در ایجاد مدل شبکه‌ای از شکستگی‌ها به روش شبکه شکستگی‌های مجزای پواسن و یا بیچر^{۳۲} مرسوم است. این روش به وسیله محققین زیادی برای مطالعات مرتبط با انتقال‌پذیری، تغییر شکل‌پذیری، نفوذپذیری و ... طی سه دهه گذشته به کار گرفته شده است [۱۲].

است، مشخص می‌شود (شکل ۳). چگالی شکستگی‌ها به صورت تعداد شکستگی بر واحد حجم (P_{30})، مساحت (P_{20}) و یا طول (P_{10}) اندازه‌گیری می‌شوند. فاصله‌داری شکستگی‌ها می‌تواند از توابع توزیع لاگ نرمال، نرمال و نمایی منفی تبعیت کند و این مسئله وابسته به درجه اشباع‌شدگی شکستگی‌ها در شبکه است [۲۶]. بازشدگی شکستگی معمولاً از توابع توزیع لاگ نرمال و یا قانون توانی تبعیت می‌کند [۲۷]. موقعیت قرارگیری شکستگی‌ها در

		Dimension of Feature				
		Number of Fractures	Fracture Trace Length	Fracture Area	Fracture Volume	
		0	1	2	3	
		P_{00}				Point Measures
		0				
		P_{10}	P_{11}			Linear Measures
		1				
		P_{20}	P_{21}	P_{22}		Areal Measures
		2				
		P_{30}		P_{32}	P_{33}	Volumetric Measures
		3				
Dimension of Sampling Region						
	Line (Borehole)					
	Area (Traceplane)					
	Volume					
				Intensity	Porosity	
						Density

شکل ۳: نمایش نحوه تعریف چگالی شکستگی‌ها در روش شبکه شکستگی‌های مجزا [۱۴]

مربوط به بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین شکستگی است. مقدار پایین برای پارامتر (a) نمایشگر یک سیستم شکستگی است که در آن شکستگی‌های اندازه بزرگ غالب است. این در حالی است که با افزایش این مقدار (a) به سمت بی‌نهایت، الگوی غالب شبکه شکستگی‌ها به سمت اندازه‌های برابر با مقدار (l_{min}) سیر می‌کند [۱۲]. در تئوری (D) به بازه $[1, 2]$ برای حالت دوبعدی و $[2, 3]$ برای حالت سه‌بعدی محدود است. مقدار (a) نیز به بازه $[1, \infty)$ برای حالت دوبعدی و $[2, \infty)$ برای حالت سه‌بعدی تعلق دارد. برای مدلسازی عددی، اندازه مدل معمولاً در محدوده $(l_{min} \ll L \ll l_{max})$ جای می‌گیرد. مسئله بعدی نحوه تعریف موقعیت قرارگیری دیسک‌های شکستگی در مدل سه‌بعدی است. موقعیت قرارگیری شکستگی‌ها در مدل سه‌بعدی معمولاً به صورت یکنواخت در نظر گرفته

نحوه تعریف چگالی و اندازه شکستگی‌ها در این روش بر اساس توابع توزیع چگالی و طول شکستگی‌ها به صورت یک مدل آماری بر اساس رابطه (۲) بیان می‌شود [۲۸].

$$n(l, L)dl = \alpha L^D L^{-a} \text{ for } l \in [l_{min}, l_{max}], (dl \ll l) \quad (2)$$

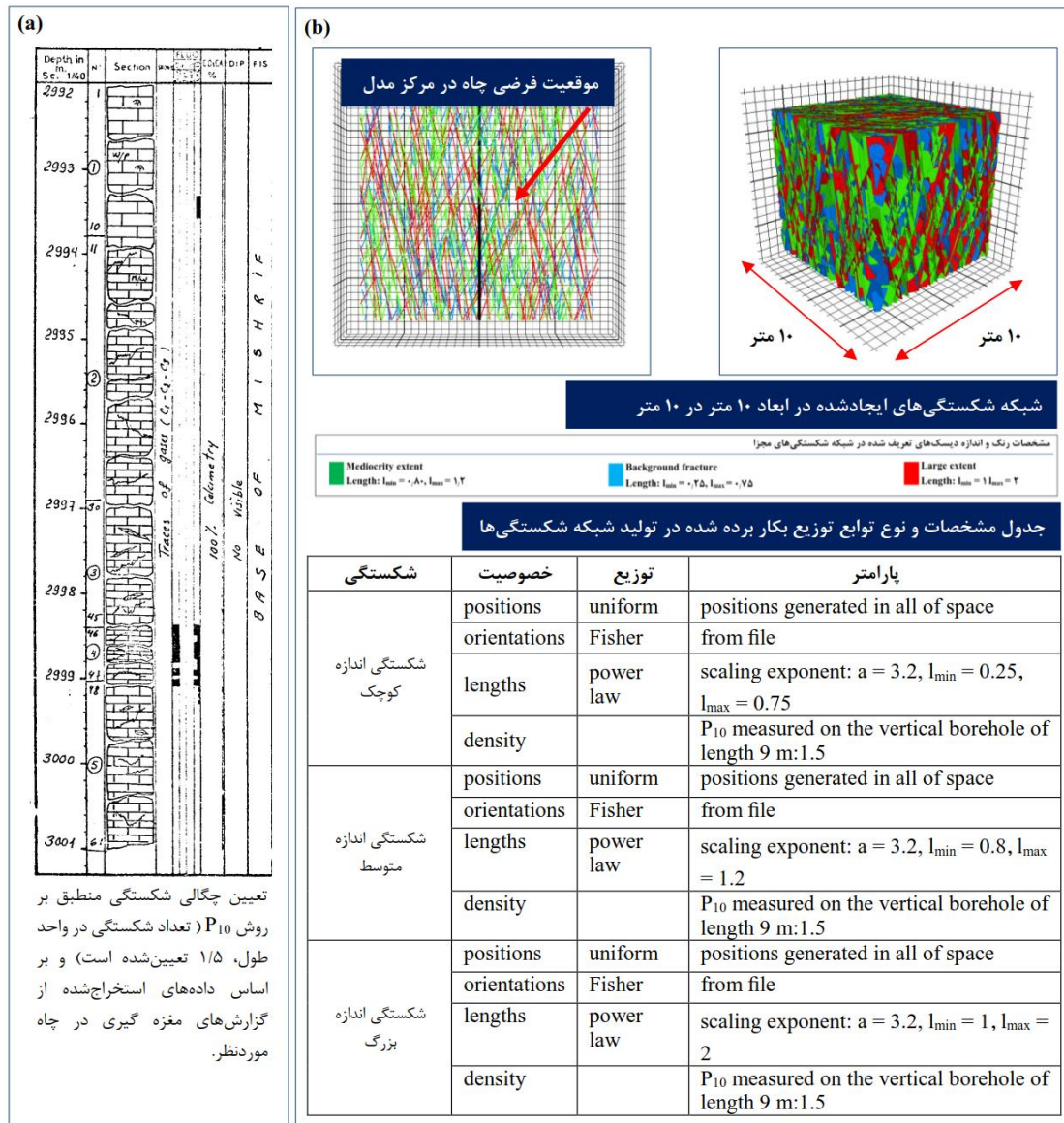
که در آن $(n(l, L)dl)$ نماینده تعداد شکستگی‌ها با اندازه معین است و به بازه $[l, l + dl]$ تعلق دارد و مربوط به حجم اولیه با اندازه مشخص (L) است. (α) چگالی و (l_{min}, l_{max}) بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین اندازه شکستگی است. در این رابطه (D) بُعد فرکتال^{۳۳} است. برخال یا فرکتال، ساختاری هندسی است که با بزرگ کردن هر بخش از این ساختار به نسبت معین، همان ساختار نخستین به دست می‌آید. (a) توان طول، در تابع نمایی قانون توانی است. توان (a) در واقع معرف نسبت‌های

می‌شود [۱۴]. بنابراین دیسک‌های معرف شکستگی در تمام مدل با احتمال یکسان ایجاد می‌شوند. در واقع تجمع شکستگی در یک بخش خاص از مدل وجود نخواهد داشت و شکستگی‌ها به طور یکنواخت در تمام فضای مدل حضور خواهند داشت. مهم‌ترین پارامتر در ایجاد یک مدل کارآمد و نزدیک به واقعیت از ساختار شکستگی‌ها منطقه، شیب و جهت شیب شکستگی‌ها 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 (۲) و از نظر شیب و جهت شیب به طور دقیق منطبق بر داده واقعی خواهند بود. در شکل ۲ نقشه ساختاری از شکستگی‌های منطقه مورد مطالعه بر اساس نتایج پردازش استریو گرام نمایش داده شده است. 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 ۴، b). بیشترین 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 (P_{10}) که بر اساس ماهیت تک‌بعدی گمانه‌های برداشت داده‌های هندسی از شکستگی است، اقدام به تعیین الگوی شدت شکستگی‌ها شده است. بهره‌گیری از پالایه‌های متعدد در روند تولید شبکه شکستگی امری ضروری است. تعیین الگوی شکستگی‌ها با کمترین فاصله از دیواره چاه، شکستگی متقاطع با امتداد چاه و بهینه‌سازی فواصل نزدیک به هم برای ساخت مدل نهایی از جمله این موارد است. در شکل ۵ نمایش مقاطع برش قائم از دیسک‌های معرف ناپیوستگی، قبل و بعد از اعمال تصحیح‌های ذکر شده، درج شده است. ابعاد دیسک‌های معرف شکستگی‌ها در بازه ۰/۲۵ متر تا ۲ متر تعیین شده است. این دیسک‌های سه‌بعدی به صورت یک

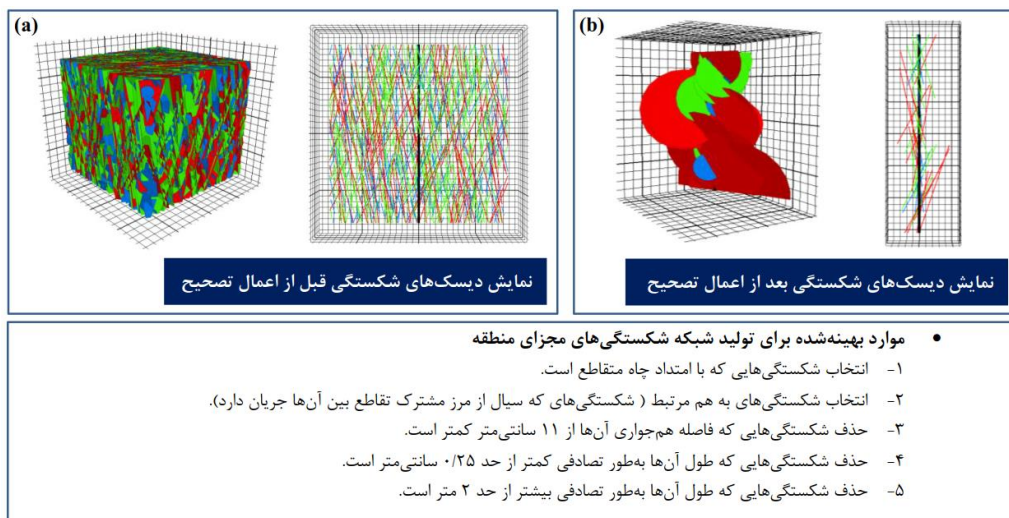
در ادامه با تعریف هندسه یک چاه قائم به طول ۹ متر در مرکز این فضای مکعبی و پیاده‌سازی کدهای پیش‌فرض نرم‌افزار، این امکان ایجاد می‌شود که سیستم شکستگی‌ها بر اساس چگالی از پیش تعیین شده $(P_{10}=1/5)$ که معرف حضور ۱۴ شکستگی در طول ۹ متر مغزه است، تولید و از این حد تجاوز نکنند. در واقع این هندسه فرضی برای چاه به عنوان یک شاخص تعیین حد آستانه چگالی ۱/۵ برای تولید شکستگی در فضای مدل است. طول شکستگی بر اساس پیشنهاد واحد زمین‌شناسی شرکت نفت فلات قاره (منطبق بر داده‌های میدانی و گزارش‌های تجمیعی) در بازه ۲۵ سانتی‌متر تا ۲ متری تعیین شد. در واقع شکستگی مجاز هستند در این بازه از طول تعیین شده ایجاد شوند. به

بهینه‌سازی مدل ایجاد شده انجام می‌شود. در این حالت شکستگی‌های مؤثر در امتداد چاه تعیین، شکستگی‌های دارای خوشه‌بندی (شکستگی‌هایی که به هم راه دارند) مشخص و صفحات شکستگی با فاصله مجاورتی بسیار کم) به منظر جلوگیری از ایجاد المان‌های مش بندی نامناسب در موقعیت بین صفحات مجاور و کاهش خطا در مدل‌سازی) حذف می‌شوند (شکل ۵).

منظور تعریف موقعیت قرارگیری شکستگی‌های تولید شده در فضای مدل، پیش‌فرض توزیع یکنواخت در نظر گرفته شده است. در واقع شکستگی در کلیه فضای مدل با توزیع یکسان تولید خواهند شد. در این حالت تمرکز چگالی شکستگی در بخش خاصی از مدل رخ نخواهد داد (شکل ۴). بعد از تولید تصادفی شکستگی‌ها و ایجاد ساختار سه‌بعدی از دیسک‌های معرف شکستگی، تصحیح و



شکل ۴: (a) داده‌های مغزه گیری برای طول ۹ متر در امتداد چاه موردنظر به منظور برآورد مشخصات اولیه سیستم شکستگی‌ها. (b) نمایش مدل سه‌بعدی ایجادشده بر اساس پارامترهای تعیین شده و جدول متناسب به مشخصه‌های توابع آماری و توزیع‌های تعیین شده برای ساخت مدل نهایی (قبل از اعمال تصحیح و بهینه‌سازی مدل شکستگی‌ها)



شکل ۵: (a) نمایش مدل سه‌بعدی ایجادشده برای شکستگی‌های منطقه قبل از اعمال تصحیح. (b) نمایش دیسک‌های معرفی شکستگی در امتداد چاه بعد از اعمال تصحیح و تعیین شکستگی‌های مؤثر برای مدلسازی نهایی

سنگی و محیط شکسته برای مدلسازی توزیع توانی انتخاب شده است [۱۴]. قابل ذکر است که در بررسی فرآیندهای هرزروی و ارزیابی مکانیزم‌های هیدرومکانیکی درون چاه در سازند دارای شکستگی، اغلب جهت‌گیری صفحات ناپیوستگی در مقایسه با امتداد تنش‌های افقی بیشینه و کمینه و امتداد چاه مدنظر است. در این حالت تعیین وزن بهینه گل حفاری با دقت و اطمینان بالاتری انجام خواهد گرفت [۳۱].

۴- مدلسازی عددی چاه قائم به روش DEM

در این مطالعه به منظور پیاده‌سازی مدل سه‌بعدی از شرایط هیدرومکانیکی چاه در حضور شکستگی‌ها از روش المان مجزا استفاده شده است. بهره‌گیری از این روش در بهبود نتایج حاصل از مدل‌های شامل شکستگی و شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرومکانیکی نقش بسزایی دارد [۱۰]. توده سنگ‌های دارای شکستگی طبیعی به طور معمول به صورت محیط‌های با تخلخل دوگانه شبیه‌سازی می‌شوند. تخلخل اولیه که در فرآیند تشکیل سنگ (دیازنز^{۳۵}) ایجاد شده و تخلخل ثانویه حاصل از مکانیزم‌های گسلش و سایر فرآیندهای تکتونیکی مرتبط است [۲۰]. در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرومکانیکی در ساختارهای شکسته به طور معمول از تخلخل اولیه چشم‌پوشی می‌شود [۱۰]. در این روش بلوک‌های تشکیل دهنده هندسه چاه به صورت تغییر شکل‌پذیر در نظر گرفته شده است. در این حالت تغییر شکل‌های پلاستیک بر اساس

با استفاده از روش تصادفی تولید شبکه شکستگی‌ها، این امکان ایجاد خواهد شد که بتوان فرآیندهای هرزروی سیال در ساختار توده سنگ مجاور چاه و ناپایداری‌های احتمالی را با قابلیت اطمینان بیشتری شبیه‌سازی نمود [۱۴]. ایجاد شبکه شکستگی‌های منطقه با استفاده از روش (DFN) نیازمند داده‌های جامع از خصوصیت‌های برج‌های شکستگی‌ها است. هرچند با توجه به محدودیت‌های برداشت داده از عمق چاه، فرضیات ساده‌سازی مدنظر است. از جمله این موارد محدودیت داده‌های برداشت شده از مغزه‌های درون چاه است. در واقع این داده‌های تک‌بعدی است. بر اساس قابلیت‌های تعریف‌شده در محیط نرم‌افزار انتخابی (3DEC) با استفاده از داده‌های تک‌بعدی، تولید شبکه شکستگی‌ها در سه بعد میسر می‌شود. بر اساس مشخصه‌های معرفی شده در سیستم نرم‌افزار مورد نظر، ذکر شده است که پارامترهای آماری سیستم سه‌بعدی شکستگی‌ها مانند توزیع اندازه‌ها، فاصله‌داری‌ها و توزیع چگالی از طریق داده‌های نمونه‌گیری تک‌بعدی و یا دوبعدی و بر اساس تحلیل‌های استریولوژیک^{۳۴} استخراج می‌شود [۲۹،۳۰]. مسئله بعدی در ایجاد مدل (DFN) انتخاب طول مناسب برای امتداد شکستگی‌ها است. با توجه به خصوصیات مخزن حفاری شده و داده‌های ارائه شده در گزارش‌های بررسی مغزه‌ها و سایر مطالعات برج‌ها، بازه طول انتخاب شده در این مدلسازی (۰/۲۵ تا ۲ متر) به عنوان بازه‌ای مناسب برای تولید شکستگی‌ها تعیین شده است. به منظور تعیین نوع تابع توزیع مناسب برای طول شکستگی‌ها بر اساس پیشنهاد خود نرم‌افزار (3DEC) برای داده‌های

$$\tau_s \leq C + \sigma'_n \tan \phi \quad (4)$$

$$\sigma'_n = \sigma_n - p$$

که در آن (τ_s) تنش برشی است. همان طور که بیان شد، 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 مکانیزم‌های 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.

۱-۴- هندسه و شرایط مرزی مدل

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 ۱۶). بر این اساس یک مدل سه‌بعدی از هندسه چاه با حضور شکستگی‌هایی که دیواره چاه را قطع کرده‌اند، به دست خواهد آمد. ابعاد مدل شکستگی به صورت یک محدوده مکعبی با بعد ۱۰ متر تعیین شده است. شکستگی‌های ایجاد شده در این گستره از پیش تعیین شده بر اساس پارامترهای آماری و روش (DFN) در مرحله قبل ارائه شد. به منظور ایجاد بلوک هندسی چاه و اعمال شرایط مرزی مشخص شده برای بررسی فرآیندهای هیدرومکانیکی، مدل نهایی به صورت یک بلوک مکعبی (۳×۲×۲) و یک چاه استوانه‌ای به قطر ۲۰ سانتی‌متر در مرکز آن تعیین شد. پیاده‌سازی مدل عددی در نرم‌افزار (3DEC) با محدودیت‌هایی روبروست. برای مثال در صورت وجود

معیار موهر- کولمب شبیه‌سازی می‌شود. در یک فرآیند هیدرومکانیکی شبیه‌سازی شده با استفاده از روش المان مجزا این امکان وجود دارد که بر اساس تغییر شکل‌های مکانیکی، نفوذپذیری هیدرولیکی^{۳۶} در مدل بررسی شود. بررسی یک مدل هیدرومکانیکی با فرآیندهای توأمان مبتنی بر موارد زیر است [۱۴]:

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

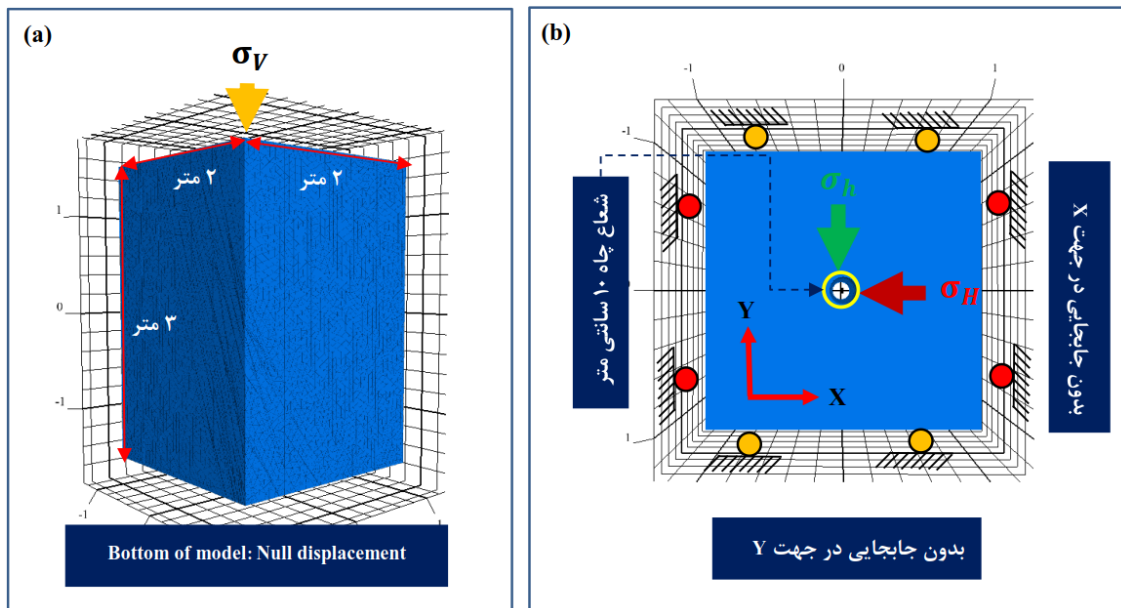
باید در نظر داشت که بررسی نفوذپذیری سازند در روش المان مجزا بر اساس تغییرات در بازشدگی شکستگی‌ها^{۳۷} است [۱۴]. معادله حاکم بر جریان سیال در شکستگی‌ها بر اساس فرم ساده شده معادله ناور- استوک^{۳۸} در نظر گرفته شده است. در حالتی که معادله ناور- استوک برای جریان سیال بین دو صفحه تقریباً موازی، نفوذناپذیر و فرض سیال غیر تراکم پذیر در نظر گرفته شود، به صورت رابطه (۳) بیان می‌شود. در این حالت به فرم ساده شده معادله ناور- استوک، معادله رینولد^{۳۹} گفته می‌شود [۱۴].

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

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)، ($\phi = z + \frac{p}{\rho g}$) هد هیدرولیکی، (g) شتاب گرانش، (ρ) چگالی سیال حفاری، (μ) گرانیوی 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^{۴۰} (رابطه ۴) پیاده‌سازی شده است. همان طور که در رابطه (۴) بیان شده است، شکستگی‌های برشی (تغییر شکل‌های لغزشی) در شکستگی‌ها بر اساس تنش نرمال مؤثر (σ'_n)، چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک (ϕ) کنترل می‌شود. در این فرآیند با تغییر تنش نرمال (σ_n) در اثر جریان سیال در سازند (که منجر به تغییر فشار سیال (p) می‌شود)، تنش نرمال مؤثر (σ'_n) تغییر کرده و منجر به شکست برشی در ناپیوستگی‌ها می‌شود [۱۴].

کاهش زمان محاسبات خواهد شد. انتخاب ابعاد مناسب برای طراحی هندسه چاه و سازند دربرگیرنده به صورت فاصله مرزی پنج برابر قطر چاه تعریف می‌شود [۱۴]. هر چند برای مدل‌های عددی در شرایط خاص و بر اساس نوع حل که به صورت مفهوم کرنش صفحه‌ای و یا سه‌بعدی بافاصله مشخص از مرکز چاه، تعیین این ضریب با مقیاس قطر چاه متغیر است. در یک جمع‌بندی کلی برای ابعاد مدل در راستای ارزیابی پایداری چاه بر اساس روش‌های المان‌مجزا محدودده متعارف تعیین اندازه ابعاد مدل بر پایه قطر چاه در بازه ۵ تا ۱۶ برابر قطر چاه تعریف می‌گردد [۱۰، ۶]. به منظور بررسی رفتار غالب چاه، ۱۲ نقطه پایش در محدوده دیواره چاه تعیین شده است. کف مدل به طور ثابت در نظر گرفته 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 این حالت امکان جریان سیال از دیواره چاه به درون سازند دارای شکستگی (سازند مجاور چاه) فراهم می‌شود [۱۴].

هندسه نامطلوب در مدل اصلی (بر اثر تقابل و تقاطع شکستگی‌های پیچیده) و امتداد چاه، می‌تواند در ایجاد شبکه منظم و یکنواخت مش‌بندی (المان بندی بلوک‌های تشکیل‌دهنده) اختلال ایجاد کند. تجربه و ساخت مدل‌های عددی متعدد می‌تواند در رفع این مشکلات احتمالی نقش مؤثری داشته باشد. بنابراین در این مدل‌سازی نیز سعی شده بر اساس تجربه برای پیاده‌سازی مدل‌های متنوع از چاه در شرایط پیچیده، رویه مناسب در ایجاد مدل نهایی انتخاب شود. هندسه چاه به طور پیش‌فرض بر اساس طرح اجرایی حفاری به دست خواهد آمد. ابعاد مدل به طور معمول بر اساس قطر چاه و برای رفع اثر شرایط مرزی انتخاب می‌شود. قطر چاه‌ها در محدوده وسیعی از اندازه‌های متفاوت قرار دارد. تعیین ابعاد به نسبت فاصله از مرکز چاه تا حد نهایی مرز مدل به صورت ضریبی از شعاع چاه تعیین می‌شود. انتخاب فاصله‌های غیرمعقول از مرز داخلی دیواره چاه برای ارزیابی پایداری منجر به افزایش چگالی المان‌ها و افزایش بازه‌های زمانی در محاسبات نرم‌افزاری خواهد شد. بنابراین انتخاب حد بهینه ابعاد برای مدل نقش اساسی در کارآمدی و رفع اثر شرایط مرزی بر پاسخ مدل و همچنین



شکل ۶: (a) نمایش هندسه و ابعاد مدل ساخته‌شده. (b) نمایش شرایط مرزی تعیین‌شده برای مدل و امتداد تنش‌های افقی بیشینه و کمینه

ریزش‌های مقطعی) برای ساختارهای سنگی مجاور دیواره چاه انجام‌گرفته است. به منظور بررسی چاه برای ۵ سازند تعیین شده، شرایط مرزی بر اساس رابطه (۱) محاسبه و بر مرز مدل اعمال می‌شود. در جدول ۳ مشخصات مربوط به نسبت تنش‌های برجا برای هر بخش درج شده است.

بررسی مدل و ارزیابی‌های انجام شده بر اساس محدوده عمق ۲۷۰۰ تا ۳۱۶۴ متر است. لایه‌های تعریف شده در این مقطع از چاه شامل ۵ لایه به نام‌های گورپی، ایلام، سروک، کژدمی و داریان است. انتخاب بخش مذکور از چاه موردنظر، بر اساس گزارش‌های هرزروی و ناپایداری

جدول ۳: مقادیر تنش‌های برجا برای ۵ لایه موردنظر

نام لایه	گورپی	ایلام	سروک	کزدمی	داریان
تنش قائم (MPa)	۶۶/۶۵	۷۱/۴۶	۷۴/۲۶	۷۶/۸۰	۷۸/۰۶
تنش افقی بیشینه (MPa)	۴۶/۵۱	۴۵/۰۴	۴۸/۴۹	۵۴/۹۳	۴۹/۴۱
تنش افقی کمینه (MPa)	۴۴/۸۹	۴۲/۴۹	۴۶/۱۰	۴۶/۱۰	۴۷/۰۹

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. مکانیزم‌های پاسخ چاه در حین حفاری به شرایط پیچیده زمین‌شناسی، تنش‌های برجای میان دور و ناحیه‌ای و ... بستگی دارد. بنابراین تعیین یک آستانه مشخصی از جابجایی برای یک شرایط خاص عملاً غیرممکن است. هر چند بر اساس فرضیات پذیرفته شده‌ای، بعضی از آشفستگی‌های 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 درصد به عنوان حد آستانه پایداری چاه در نظر گرفته می‌شود [۷]. این معیار به صورت رابطه (۵) بیان می‌شود (شکل ۷a).

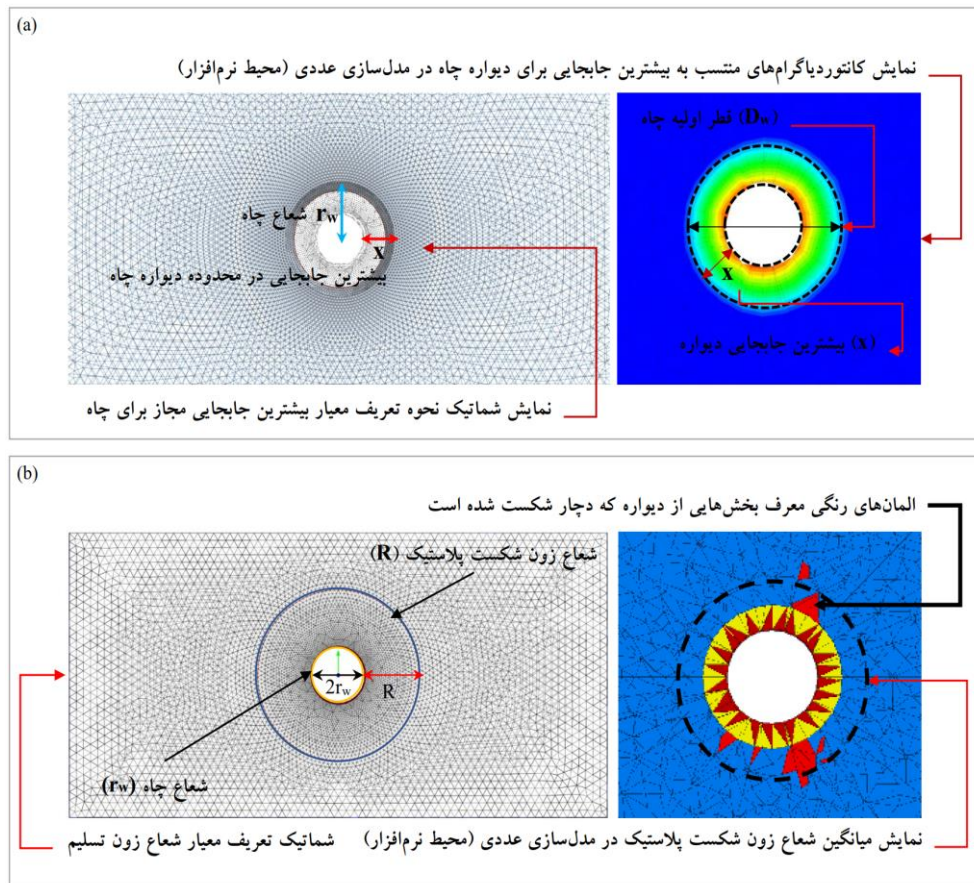
$$Relative\ dis\ (\%) = \frac{Max\ dis}{D} \times 100 \quad (5)$$

بیشترین جابجایی‌ها در محدوده دیواره چاه تعیین و بر اساس رابطه بالا با تقسیم بر قطر اولیه چاه، نرمال می‌شوند. معیار بعدی برای تعیین حد آستانه پایداری چاه معیار زون شکست پلاستیک است. بر این اساس، گسترش زون تسلیم در محدوده اطراف دیواره چاه که بر اثر تنش‌های القایی ایجاد شده است، با استفاده از شعاع زون تسلیم نرمال شده، اندازه‌گیری می‌شود [۷]. شعاع زون شکست پلاستیک نرمال شده در واقع حاصل تقسیم شعاع زون تسلیم (R) به شعاع اولیه چاه (r_w) است. در یک شرایط حفاری متداول، بازه ۱/۴ تا ۱/۵ برای نسبت ($\frac{R}{r_w}$)، به عنوان آستانه پایداری چاه در نظر گرفته می‌شود [۳۰]. شعاع رون تسلیم نرمال شده به عنوان معیاری برای اعتبارسنجی مدل نیز به کار گرفته می‌شود. در این مقاله، بر اساس این معیار و مقادیر اندازه-گیری شده توسط لاگ کالیبر، اعتبارسنجی برای پاسخ مدل انجام گرفته است [۹]. در رابطه (۶) معیار زون تسلیم نرمال شده ارائه شده است (شکل ۷b).

$$Normalized\ average\ plastic\ zone\ radius = \frac{R}{r_w} \quad (6)$$

با پیاده‌سازی مدل شکستگی‌های منطقه و ساخت مدل هندسی از چاه و اعمال شرایط مرزی، مدل اصلی متشکل از چاه در سازند دارای شکستگی به دست می‌آید. تعریف شرایط هیدرومکانیکی با فعال‌سازی ماژول تحلیل توأمان مکانیزم‌های مکانیکی و هیدرولیکی در مدل انجام می‌شود. در نرم‌افزار ($3DEC$) برای تحلیل‌های عددی می‌توان مکانیزم‌های مکانیکی به تنهایی بررسی شوند. برای این منظور از دستور پیش‌فرض ($Mechanic\ on - off$) استفاده می‌شود. همچنین می‌توان با دستور پیش‌فرض ($Fluid\ on - off$) مکانیزم‌های هیدرولیکی ناشی از جریان سیال در مدل را به طور هم‌زمان بررسی کرد [۱۴]. 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 ($HMLP^f$) معرفی می‌گردد، استفاده شده است. با بالاتر در نظر گرفتن فشار سیال حفاری، جریان سیال به درون سازند برقرار خواهد شد. بر اساس گزارش‌های حفاری در چاه موردنظر، سیال حفاری ($FCL\ Sea\ water\ mud$) است. گرانی و چگالی سیال به ترتیب $0.0108\ Ns/m^2$ (معادل CP ۱/۰۸) و $1025\ Kg/m^3$ در نظر گرفته شده است. بعد از ایجاد مدل اصلی تنظیم شده برای ارزیابی فرآیندهای هیدرومکانیکی درون چاه در سازند دارای شکستگی، ارزیابی اولیه پاسخ مدل انجام می‌شود [۱۰]. در واقع قبل هرگونه تحلیل و بررسی مکانیزم‌های هیدرومکانیکی در چاه، اعتبارسنجی مدل انجام می‌شود. اعتبارسنجی و مقایسه پاسخ مدل با شرایط واقعی برجا به منظور ایجاد یک مدل عددی کارآمد، ضروری است. به منظور ارزیابی پایداری چاه و اعتبارسنجی مدل عددی ایجاد شده، از دو معیار با عنوان بیشترین جابجایی مجاز و شعاع زون شکست پلاستیک استفاده شده است.

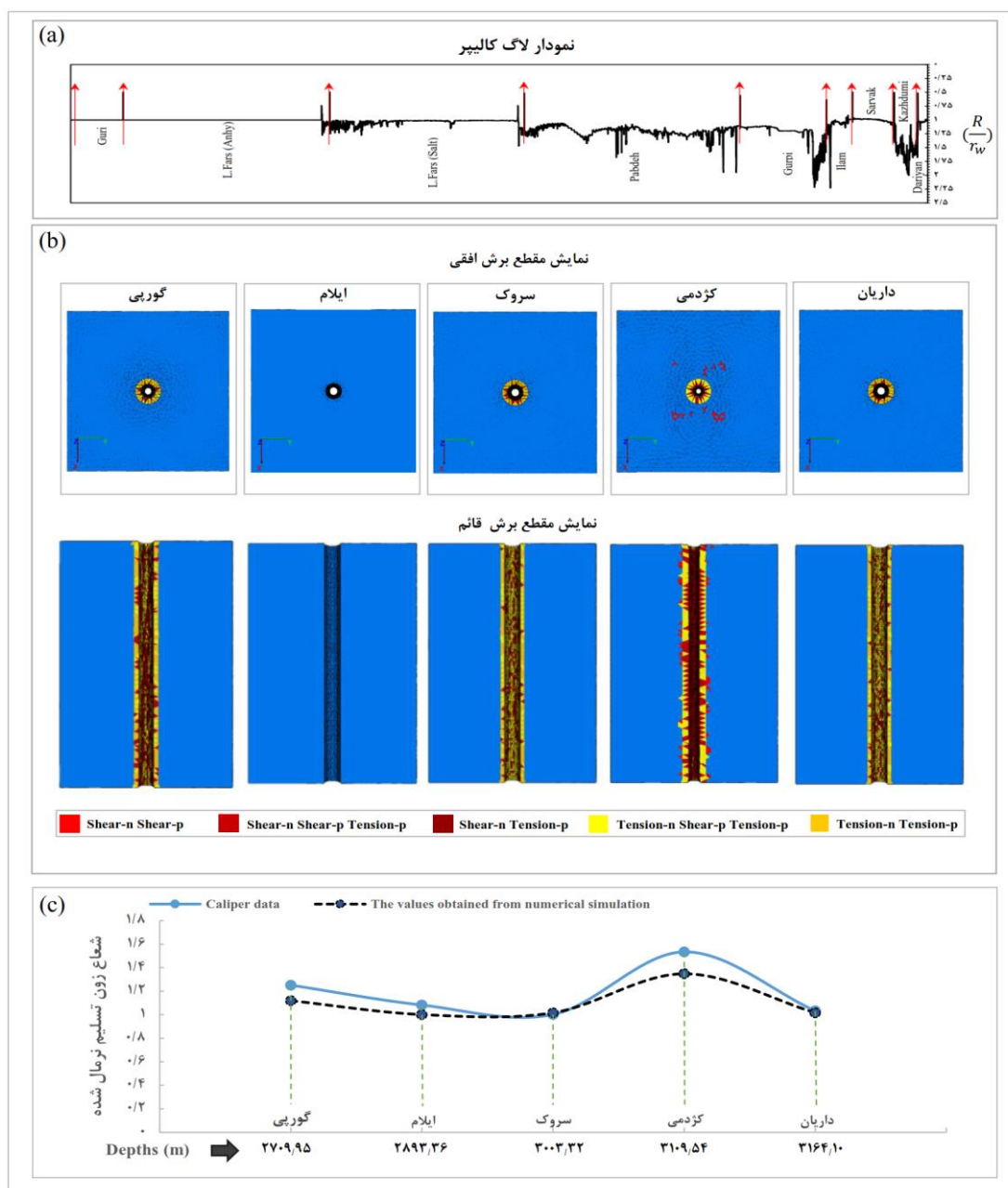
۴-۲- اعتبارسنجی مدل و ارزیابی پایداری چاه



شکل ۷: (a) نمایش نحوه تعریف معیار بیشترین جابجایی مجاز (b) نمایش نحوه تعریف معیار شعاع زون شکست پلاستیک نرمال شده بر اساس المان‌های شکست برشی و کششی در گذشته و حال

اتراف چاه بررسی شد. زون پلاستیک نشانه قابل توجهی از تغییر شکل‌های اطراف چاه است [۱۰]. در واقع با تعیین محدوده زون پلاستیک اطراف چاه می‌توان محدوده تغییر شکل‌های پلاستیک اطراف چاه را تعیین کرد. محیط نرم‌افزاری المان مجزا انتخابی این قابلیت را دارد که جریان پلاستیک مواد را ترسیم کند. اما بجای جریان پلاستیک واقعی، بلوک‌های تسلیم‌شده را نشان می‌دهد [۱۰]. این جریان پلاستیک بر اساس بلوک‌های تسلیم شده برجای مانده (برخی بلوک از دیواره جدا شده و از محدوده چاه حذف می‌شوند که این مسئله در محیط یک نرم‌افزار المان مجزا سه‌بعدی رخ می‌دهد) تخمین زده می‌شود. در ابتدای فرآیند مدل‌سازی، مشاهده بلوک‌های تسلیم‌شده، در واقع نشان‌دهنده یک وضعیت سیستمی نامتعادل (نیروهای نامتعادل کننده بیش‌ازحد مجزا) است. با ادامه فرآیند مدل‌سازی و توزیع مجدد تنش‌ها، نیروهای نامتعادل کننده کاهش یافته و بارگذاری‌های تسلیم‌کننده از روی المان‌ها برداشته می‌شود. در واقع تنش‌ها، بیشتر از این معیار تسلیم (که در این مطالعه موهر کولمب است) را ارضاء نمی‌کنند.

همان‌طور که در شکل (a, 8) نمایش داده شده است، تغییرات در اندازه چاه در مواجه شدن با سازندهای جدید به خوبی مشهود است. این مشاهده نشان می‌دهد که خصوصیات سنگ نقش حیاتی در پایداری چاه ایفا می‌کند [۱۰]. به منظور کاهش زمان اجرای مدل‌سازی، هر سازند به طور مجزا و با در نظرگیری یک عمق قائم ارجح برای حذف اثرات مرزی، شبیه‌سازی شده است. سپس ارزیابی پایداری و اعتبارسنجی مدل بر اساس تحلیل تغییر شکل‌ها اطراف چاه انجام گرفت. مکانیزم پاسخ چاه در عملیات حفاری به ساختارهای پیچیده زمین‌شناسی، تنش‌های میدان دور و محلی و پارامترهای عملیاتی (مربوط به نحوه حفاری) بستگی دارد. بنابراین تعریف یک آستانه مشخص از جابجایی برای بلوک‌های سنگی و ارزیابی پایدار بودن و یا نبودن چاه بر اساس آن، در یک شرایط خاص ممکن نیست. هرچند این مسئله پذیرفته شده است که برخی از آشفتگی‌های غالب در حفاری چاه در سازندهای دارای شکستگی مشترک است [۶]. به منظور ارزیابی رفتاری و اعتبارسنجی مدل ایجاد شده، زون پلاستیک



شکل ۸: (a) نمایش لاگ کالیپر برای چاه موردنظر. (b) نمایش مقاطع برشی افقی و قائم از مرکز مدل برای ارزیابی گسترش زون شکست پلاستیک. (c) نمودار مقایسه تغییرات مقدار بر لاگ کالیپر برای قطر چاه (این مقدار با تقسیم بر قطر اولیه چاه نرمال شده است) و نتایج مدل‌سازی متناسب به تغییرات شعاع زون شکست پلاستیک

این المان‌ها با عنوان تسلیم در گذشته^{۴۲} معرفی می‌شوند. در انتهای شبیه‌سازی، المان‌های تسلیم فعال که با عنوان المان‌های تسلیم در حال^{۴۳} معرفی می‌شوند، در محدوده چاه ظاهر می‌شود. المان‌های تسلیم در گذشته و تسلیم در حال با یکدیگر معرف زون تغییر شکل‌های پلاستیک اطراف چاه است [۱۴]. شکل (۸، b) توسعه زون تسلیم اطراف چاه را برای پنج سازند مختلف نشان می‌دهد. مقدار این تسلیم برای تعریف تغییر شکل‌های اطراف چاه

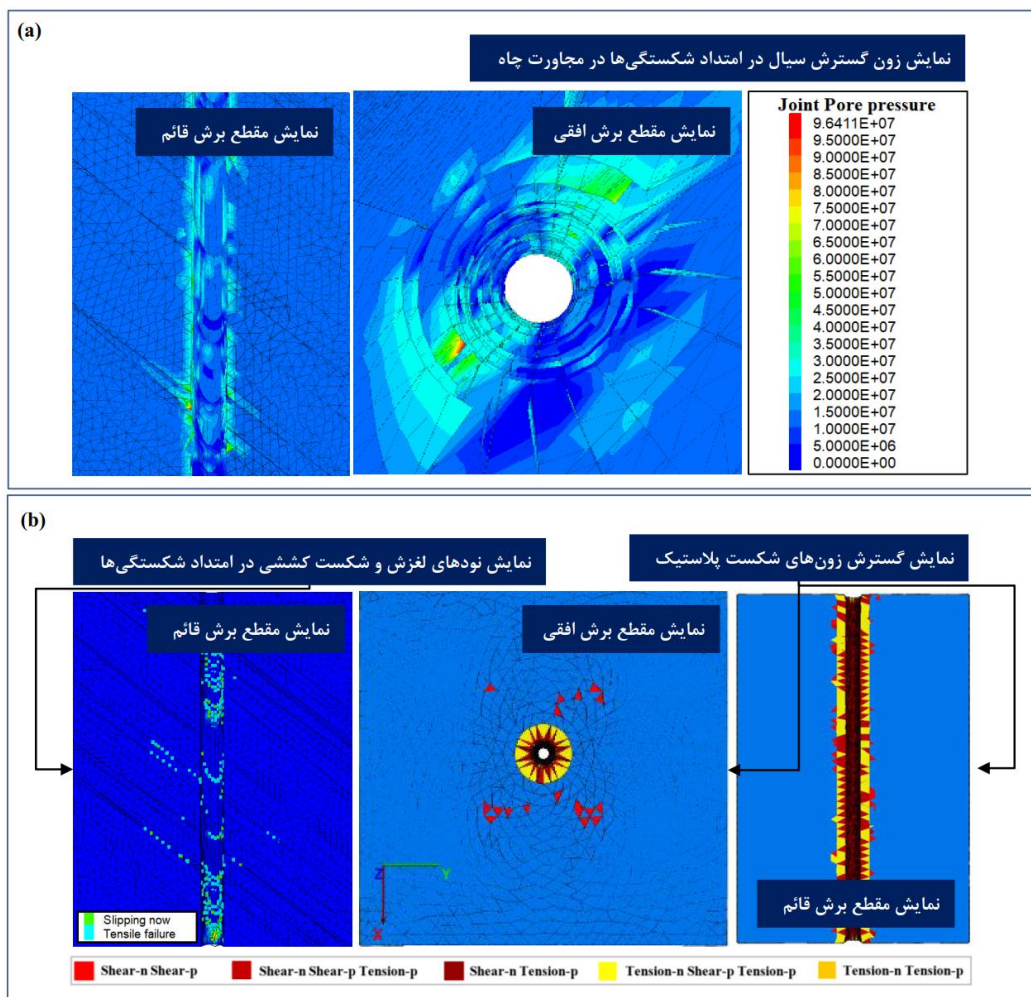
اندازه‌گیری می‌شود [۱۰]. زون شکست پلاستیک با عنوان شعاع میانگین زون تسلیمی نرمال شده، مقیاسی برای ارزیابی و اعتبارسنجی مدل نهایی است. گسترش زون تسلیم در محدوده اطراف دیواره چاه که بر اثر تنش‌های القایی ایجاد شده است، با استفاده از شعاع زون تسلیم نرمال شده، اندازه‌گیری می‌شود. برای تعیین شعاع میانگین زون تسلیم (زون تغییر شکل پلاستیک)، محدوده شعاعی حضور المان‌های تسلیم (المان‌های قرمز و زرد) در اطراف چاه

و داده‌های برجای میدانی است. در این حالت می‌توان مدل به دست آمده را با اطمینان مناسبی برای انجام بررسی‌های پارامتری بعدی مورد استفاده قرارداد. همان طور که در شکل (c, 8) مشاهده می‌شود، روند تغییرات در هر دو بخش (نتایج حاصل از مدلسازی عددی و نتایج مربوط به کالیپر) تطبیق داشته و پاسخ مدل در این فرآیند می‌تواند به عنوان یک پاسخ نزدیک به واقعیت (شرایط برجا) در نظر گرفته شود. نتایج حاصل از داده‌های میدانی و شبیه‌سازی نرم‌افزاری در واقع دارای یک‌روند تغییرات نسبتاً مشابهی برای مواجهه با سازندهای جدید دارند. بدین صورت که در لایه ضعیف‌تر (کژدمی) مقادیر به دست آمده برای نسبت شعاع زون تغییر شکل‌های پلاستیک به شعاع اولیه چاه در مقایسه با سایر لایه‌ها بیشتر بوده است که تقریباً مشابه با نتایج حاصل از لاگ کالیپر است. بیشترین تغییرات و جابجایی در دیواره چاه برای لایه کژدمی معادل ۳ سانتی‌متر به دست آمده است. جابجایی در دیواره برای لایه ایلام ۰/۰۱ متر است. این دولا به معرف ضعیف‌ترین (لایه کژدمی) و مستحکم‌ترین (لایه ایلام) سازندها در امتداد چاه معرفی می‌شوند. بر اساس معیار تعریف‌شده با عنوان بیشترین جابجایی مجاز دیواره چاه، برای لایه ایلام مقدار این نسبت به صورت ۰/۵ درصد و برای لایه ضعیف کژدمی مقدار ۱۵ درصد به دست آمد. مقدار به دست آمده برای لایه ضعیف کژدمی از حد آستانه ۱۰ درصد مجاز، بیشتر بوده و نشان دهنده ناپایداری در این بخش از چاه است. بر اساس آنچه در نمودار شکل (c, 8) برای سازند کژدمی به دست آمده است، نسبت تغییرات قطر چاه به قطر اولیه در اندازه‌گیری‌های لاگ کالیپر در حدود ۱/۶ بوده است. این مقدار به دست آمده نشان دهنده ناپایداری چاه در سازند کژدمی است. هر چند نتایج تحلیل عددی نشان دهنده یک روند مشابه در مقادیر نسبت $\left(\frac{R}{r_w}\right)$ در مقایسه با مقادیر به دست آمده از لاگ کالیپر است، ولی این حد آستانه پایداری برای لایه کژدمی در شبیه‌سازی عددی پایین‌تر به دست آمده است. بدین معنا که علیرغم شباهت در روند تغییرات این نسبت برای هر دو بخش نتایج اندازه‌گیری شده برجا و نتایج حاصل از مدلسازی عددی، ولی مقدار این نسبت برای لایه کژدمی در شبیه‌سازی عددی در حدود ۱/۴ بوده است که بر اساس بازه پایداری فرض شده (حد آستانه پایداری در بازه ۱/۴ تا ۱/۵) برای نسبت $\left(\frac{R}{r_w}\right)$ مجاز در نظر گرفته می‌شود، نشان‌دهنده پایداری نسبی این

اندازه‌گیری و یک شعاع میانگین برآورد شده است. المان‌های تسلیم در سازند کژدمی دارای پراکندگی بیشتری است و همان‌طور که بیان شد، میانگینی از شعاع حضور المان‌های تسلیم تعیین شده است. در شکل (b, 8) نحوه تعریف شعاع زون تسلیم نمایش داده شده است. شعاع میانگین حضور المان‌های تسلیم برای محدوده دیواره چاه در هر لایه برآورد و با تقسیم بر شعاع اولیه چاه، نرمال شده است. در این حالت می‌توان یک وضعیت غالب از گسترش زون تسلیم و نحوه تغییرات آن در مواجهه با سازندهای جدید را ارزیابی کرد. سپس بر اساس نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های لاگ کالیپر یک معیار مقایسه‌ای به دست آمده است. داده‌های اندازه‌گیری شده در لاگ کالیپر به صورت تغییرات قطر چاه بوده است. بنابراین با تقسیم این مقادیر بر قطر اولیه چاه، معیاری بدون بُعدی به دست خواهد آمد که تغییرات قطر چاه در سازندهای مختلف را نشان خواهد داد. برای مثال در عمق مربوط به سازند کژدمی مقادیر اندازه‌گیری شده در لاگ کالیپر (نسبت تغییرات قطر چاه به قطر اولیه) در محدوده تقریبی ۱/۶ است. در واقع تغییرات قطر چاه نسبت به قطر اولیه چاه به‌طور میانگین ۱/۶ برابر بوده است. این مقادیر تغییرات برای ضخامت تقریبی سازند کژدمی میانگین‌گیری شده است تا بتوان یک معیار مقایسه‌ای با داده‌های حاصل از مدلسازی عددی به دست آورد [۱۰]. داده چاه نگار کالیپر در عمق منتسب به لایه کژدمی که ضعیف‌ترین لایه در مجموعه سازندها بشمار می‌رود، نشان‌دهنده تغییرات زیاد در اندازه قطر چاه در این مقطع است (شکل a, 8). نقش تغییرات لیتولوژی و خواص مرتبط با آن شامل مدول الاستیسیته، چسبندگی، مقاومت فشاری، مدول برشی و سایر پارامترهای طراحی مدل عددی، در مکانیزم پاسخ سازندها بسیار برجسته است. در واقع خصوصیات مقاومتی توده سنگ، مؤثرترین عامل در ایجاد و یا عدم حضور زون‌های تسلیم در محدوده چاه است [۶]. معیار شعاع زون تسلیم نرمال شده، مقیاسی برای ارزیابی و اعتبارسنجی مدل نهایی است. همان‌طور که در شکل (c, 8) مشاهده می‌شود در لایه ضعیف‌تر یعنی کژدمی، شعاع زون شکست پلاستیک گسترش بیشتری داشته است. این در حالی است که در لایه ایلام هیچ‌گونه گسترش زون پلاستیکی مشاهده نشد. نتایج به دست آمده از ارزیابی اولیه و اعتبارسنجی مدل نشان‌دهنده تطبیق مناسب بین نتایج مدلسازی عددی

چاه مشاهده شده است. در شکل ۹ گسترش زون‌های نفوذ سیال در امتداد شکستگی‌ها برای لایه کژدمی درج شده است. گسترش سیال حفاری در امتداد شکستگی‌ها، وقوع لغزش و شکست برشی و همچنین گسترش زون‌های شکست پلاستیک در شکل ۹ برای لایه کژدمی نمایش داده شده است. بیشترین نودهای معرف لغزش و شکست کششی در امتداد شکستگی‌ها (نودهای سبز و آبی‌رنگ) برای لایه کژدمی به دست آمد. بر این اساس برای لایه کژدمی یک وضعیت ناپایدار و سست از منظر بروز شکست و لغزش برآورد شده است. در این مرحله از مدلسازی، یک مدل عددی سه‌بعدی با پاسخ نزدیک بر واقعیت به دست می‌آید. در مرحله بعد نحوه اثرگذاری مشخصه شکستگی‌های منطقه بر مکانیزم‌های ناپایداری و هرزروی سیال حفاری بررسی شده است.

سازند است. هر چند بر اساس معیار بیشترین جابجایی مجاز، برای این سازند یک وضعیت ناپایداری تعیین شد. در یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان لایه کژدمی را ناپایدارترین بخش چاه تعیین کرد. بر اساس گزارش‌های میدانی شرکت نفت فلات قاره ایران، ناپایداری و ریزش‌های مقطعی و همچنین هرزروی سیال در این سازند وجود دارد. بر این اساس در یک برآورد کلی چاه حفر شده در بخشی که لایه کژدمی حضور داشته است، ناپایدار و شعاع زون شکست پلاستیک گسترش بیشتری داشته است. لایه ایلام که لایه‌ای با مشخصه‌های استحکامی بالاتری در مقایسه با سایر لایه‌ها است، کاملاً پایدار و بدون گسترش زون شکست پلاستیک است. بنابراین در ارزیابی پایداری چاه موردنظر، لایه کژدمی به عنوان بحرانی‌ترین بخش چاه تعیین شد. بر اساس گزارش‌های شرکت نفت فلات قاره ایران، هرزروی سیال و شکست‌های مقطعی در این بخش از



شکل ۹: (a) نمایش زون‌های گسترش سیال و فشار گل در امتداد شکستگی‌ها و مجاورت چاه برای لایه ضعیف‌تر (کژدمی). (b) نمایش نودهای شکست کششی و لغزش (نودهای سبز و آبی در مجاورت چاه و امتداد شکستگی‌ها) و زون گسترش تغییر شکل‌های پلاستیک برای لایه ضعیف‌تر (کژدمی)

۵- بررسی هرزروی سیال حفاری و ارزیابی پارامتری مدل

پارامتری مدل، لایه ایلام به عنوان یک سازند پایدار انتخاب شده است. در این حالت امکان بررسی مکانیزم‌های مدل در آستانه پایدار چاه میسر خواهد شد. در جدول ۴ و ۵ به ترتیب نسبت تنش‌های برجا برای ۶ حالت متفاوت و سناریوهای تعریف‌شده برای نرخ تزریق سیال حفاری درج شده است. مقدار $1/0.6$ برای نسبت تنش افقی بیشینه به تنش افقی کمینه ($\frac{\sigma_H}{\sigma_h}$) معرف حالت تنش مینا (شرایط رژیم تنش افقی برجا منطبق با داده‌های ژئومکانیکی منتسب به چاه موردنظر) و منطبق با شرایط برجا در لایه ایلام و عمق منتسب به این سازند است.

به منظور بررسی نحوه اثرگذاری پارامترهای مختلف بر هرزروی سیال حفاری در سازند دارای شکستگی، دو بخش مجزا تعیین شده است. بخش اول بررسی نسبت تنش‌های برجا و اثر آن بر هرزروی و وضعیت کلی چاه (جابجایی برشی و فشار سیال در امتداد شکستگی‌ها) به عنوان یک پارامتر غیرقابل کنترل در حفاری و بخش بعدی بررسی اثر نرخ تزریق سیال بر هرزروی و وضعیت کلی چاه به عنوان یک فاکتور قابل کنترل در حفاری است. به منظور بررسی

جدول ۴: اطلاعات مربوط به ۶ سناریو تعریف‌شده برای نرخ تنش‌های برجا

Defined scenarios	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
In situ stress ratio	$\frac{\sigma_H}{\sigma_h} = 1$	$\frac{\sigma_H}{\sigma_h} = 1.06$	$\frac{\sigma_H}{\sigma_h} = 1.25$	$\frac{\sigma_H}{\sigma_h} = 1.5$	$\frac{\sigma_H}{\sigma_h} = 1.75$	$\frac{\sigma_H}{\sigma_h} = 2$

جدول ۵: اطلاعات مربوط به ۵ سناریو تعریف‌شده برای نرخ تزریق سیال

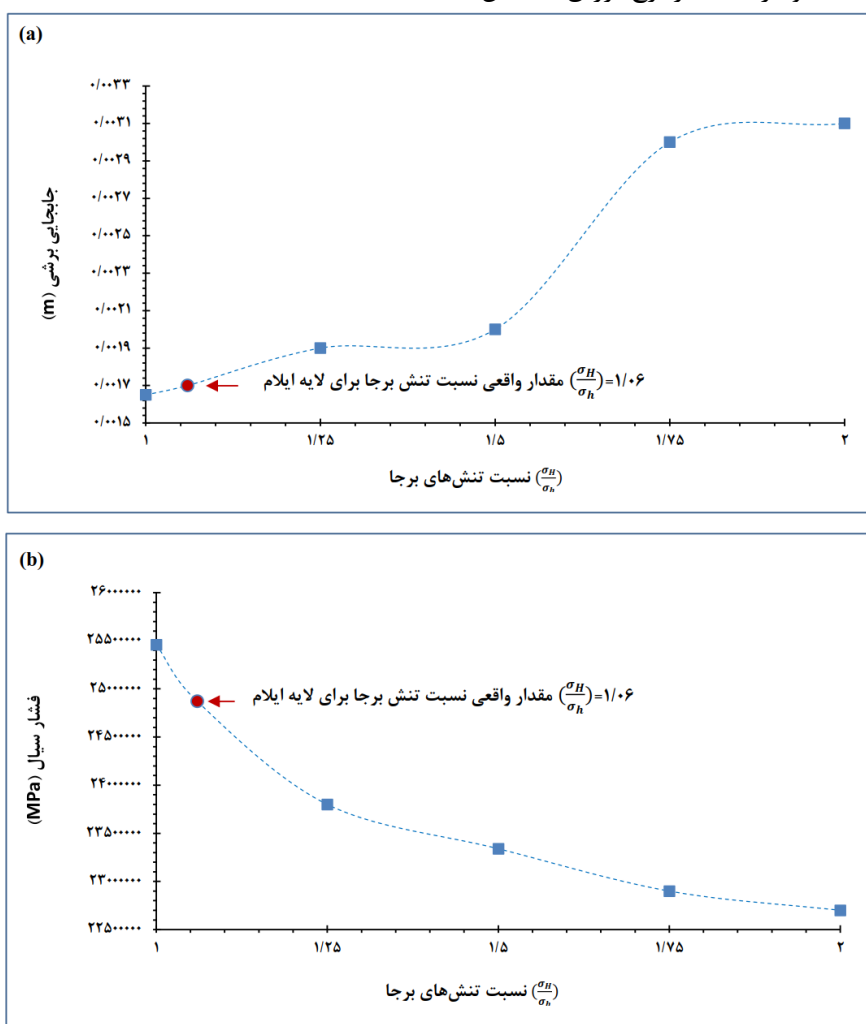
Defined scenarios	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Flow ratio (BPH)	5	10	15	20	25

امتداد شکستگی‌ها کمتر رخ خواهد داد [۱۰]. به منظور بررسی نحوه اثرگذاری نسبت تنش‌های برجا، مدل اصلی برای ۶ حالت مختلف تنظیم و با تزریق سیال با نرخ ۲۵ بشکه بر ساعت، جابجایی‌های برشی مجاورت چاه پایش شده است. حد آستانه (1×10^5) برای نیروهای خارج از تعادل^{۴۴} در فرآیند محاسبات نرم‌افزار تعیین شده است. در این حالت تا رسیدن مدل به یک وضعیت پایدار از نظر میزان نیروهای خارج از تعادل، مدلسازی ادامه خواهد داشت [۱۴]. همان طور که در شکل (a, 10) مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت تنش‌های برجا، جابجایی‌های برشی در مجاورت چاه نیز افزایش می‌یابد. در واقع در حالتی که تنش‌های برجا در یک وضعیت همسانگرد باشند، جابجایی برشی، لغزش و شکست‌های کششی در مجاورت چاه و امتداد شکستگی کمتر مشاهده شده است. هر چند باید به این نکته توجه کرد که در حفاری‌های عمیق رژیم تنش‌های برجا ناهمسانگرد است [۱۰]. برای حالتی که تنش‌های برجا ناهمسانگرد ($\frac{\sigma_H}{\sigma_h} = 2$) باشند، شرایط چاه در یک وضعیت ناپایدار از نظر افزایش جابجایی‌های برشی، لغزش و شکست در امتداد ناپیوستگی‌ها قرار دارد. باید به این نکته توجه کرد که شکست‌های برشی در مجاورت چاه

در صورتی که سیال حفاری غیر تراکم پذیر فرض شود، حجم هرزروی سیال، معادل با تغییرات حجم فضای بین شکستگی‌ها است و بر این اساس در محیط نرم‌افزار تابعی برای تعیین تغییرات در حجم مرتبط با بازشدگی شکستگی‌ها تعریف شد [۱۴]. تغییر در میزان بازشدگی شکستگی‌ها بر اساس فاصله اولیه بین صفحات ناپیوستگی (بازشدگی اولیه) که به صورت پیش‌فرض برای شبکه شکستگی‌های مجزا (DFN) مشخص شده است و بازشدگی هیدرومکانیکی (تغییر در فاصله قائم بین صفحات ناپیوستگی) به وقوع پیوسته در طی فرآیند تحلیل عددی و نفوذ سیال به درون سازند، تعریف می‌شود. بررسی و ارزیابی پارامتری بر مبنای تغییرات جابجایی برشی در مجاورت چاه، فشار سیال در امتداد شکستگی‌ها و حجم سیال هرزروی انجام شده است. برای این منظور دو پارامتر نرخ تزریق سیال و نسبت تنش‌های برجا بررسی شد. به منظور بررسی اثر نسبت تنش‌های برجا ۶ سناریو تعریف شد. در حالتی که نسبت تنش‌های برجا ۱ در نظر گرفته شده باشد، وضعیت تنش‌ها در مجاورت چاه همسانگرد فرض شده است. در این حالت وضعیت چاه از نظر تغییر شکل‌های برشی محدود خواهد بود. در واقع وقوع برش و لغزش در

(۲۵ بشکه بر ساعت)، گسترش سیال در صفحات ناپیوستگی کمتر خواهد بود. در حالتی که نسبت تنش‌های برجا ۲ در نظر گرفته شده است، افت فشار سیال در محدوده شکستگی‌ها مشاهده می‌شود (شکل ۱۰b). با افزایش نسبت تنش‌های افقی بیشینه به کمینه ($\frac{\sigma_H}{\sigma_h}$)، مکانیزم‌های برشی در امتداد شکستگی تشدید خواهد شد.

به عنوان علت اصلی وقوع ناپایداری در چاه تعیین می‌شود [۱۰]. مسئله بعدی در مورد بررسی اثر نرخ تنش‌های برجا، تغییرات فشار سیال در شکستگی‌ها و مجاورت چاه است. همان طور که بیان شد نسبت 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



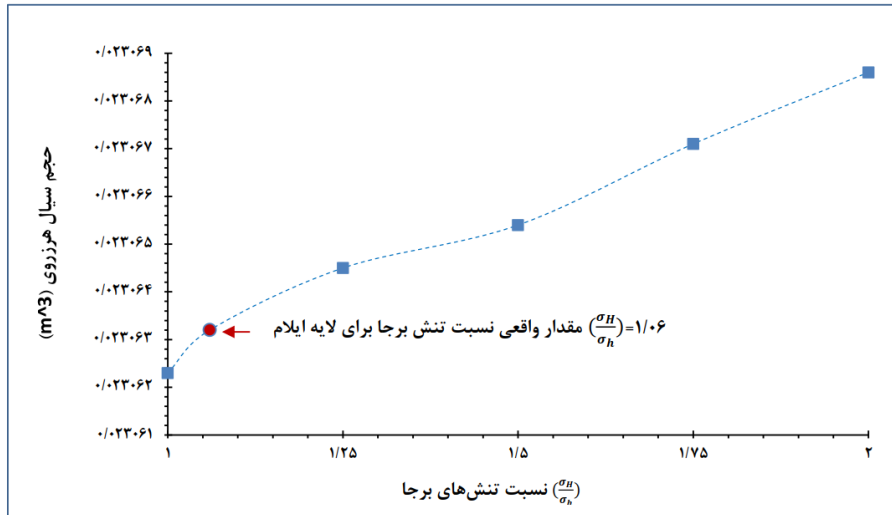
شکل ۱۰: (a) نمودار تغییرات جابجایی برشی در مقابل نسبت تنش‌های برجا متفاوت. (b) نمودار تغییرات فشار سیال در امتداد شکستگی‌ها در مقایسه با تغییرات نسبت تنش‌های برجا

در واقع در یک حالت ناهمسانگرد برای 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 واقع افزایش جابجایی برشی و لغزش‌ها در امتداد شکستگی‌ها منجر به افزایش فضای پخش سیال در محدوده شکستگی‌ها خواهد شد. در نتیجه برای تزریق سیال با نرخ ثابت، افت فشار در امتداد

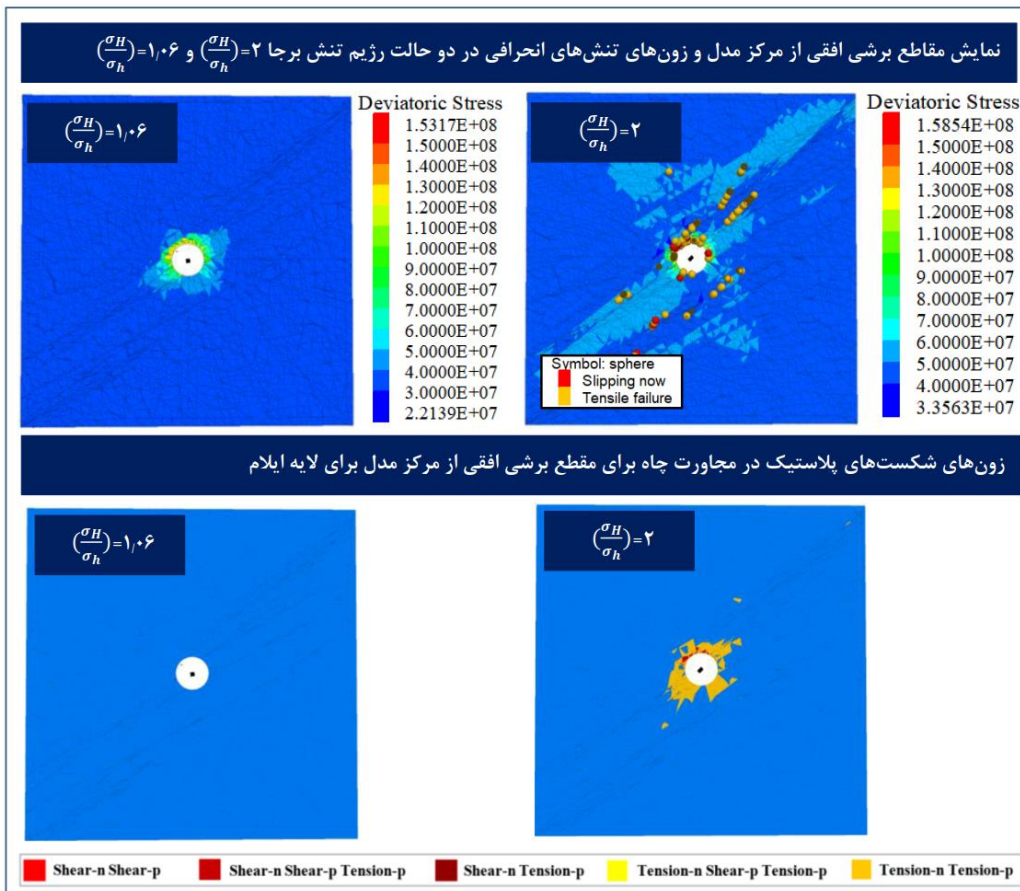
ناپیوستگی‌ها را به دنبال خواهد داشت. با افزایش جابجایی برشی در وضعیت تنش‌های ناهمسانگرد و گسترش فضای در دسترس برای نفوذ سیال (تسهیل جریان سیال و گسترش بیشتر در امتداد شکستگی‌ها)، حجم بیشتری سیال به درون سازند شکسته مجاور چاه نفوذ خواهد کرد (شکل ۱۱). این مسئله به صورت اثر متقابل بر پایداری چاه بیان می‌شود. در واقع با افزایش جابجایی‌های برشی و لغزش‌ها در امتداد شکستگی در رژیم تنش‌های ناهمسانگرد

شکست کششی در امتداد ناپیوستگی‌ها مشاهده می‌شود. همچنین گسترش المان‌های شکست پلاستیک و زون‌های تسلیم در مجاورت دیواره چاه برای نسبت تنش‌های برجای $(\frac{\sigma_H}{\sigma_h}=2)$ مشاهده شده است.

و افت فشار سیال در نرخ تزریق مشخص، می‌تواند بر فشار حد تعادل در چاه اثر گذاشته و موجب ناپایداری چاه شود. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود در حالت تنش‌های ناهمسانگرد گسترش زون‌های تنش‌های انحرافی در مجاورت چاه افزایش یافته و نودهای معرف لغزش و



شکل ۱۱: نمودار تغییرات حجم هرزروی سیال در امتداد شکستگی‌ها در مقابل تغییرات نسبت تنش‌های برجا برای ۶ حالت متفاوت (نسبت تنش ۱/۰۶ معرف شرایط واقعی رژیم تنش‌های برجا برای سازند ایلام است)

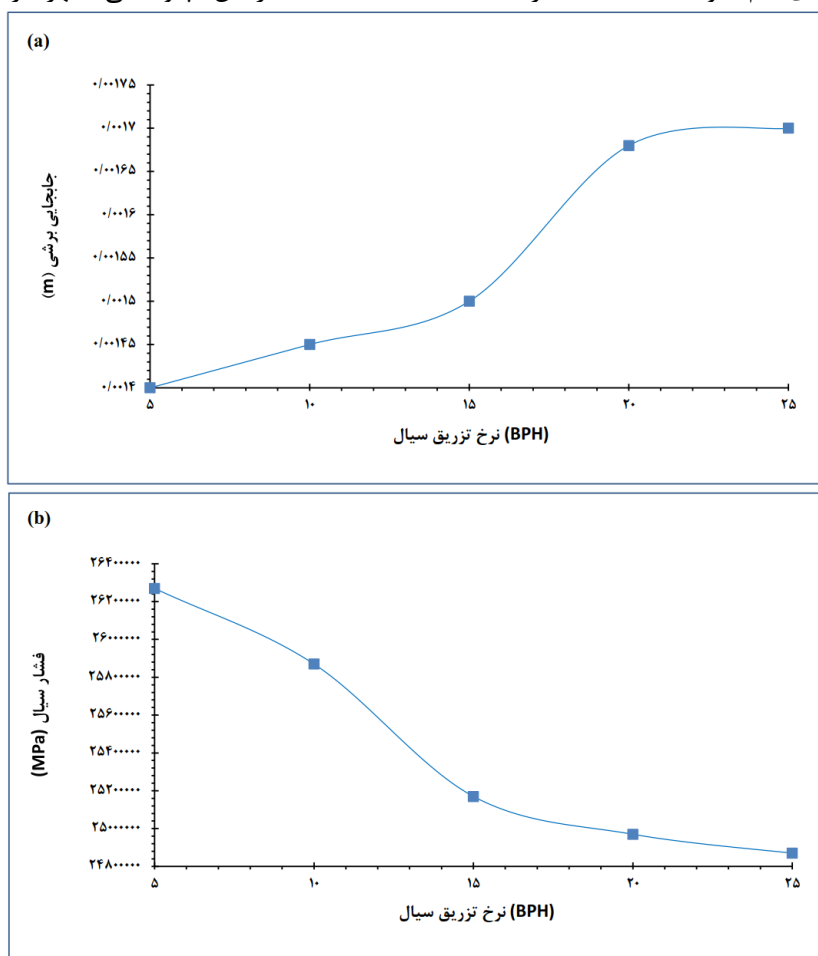


شکل ۱۲: نمایش مقاطع برشی افقی از چاه برای تنش‌های انحرافی، نودهای لغزش و زون شکست پلاستیک در مجاورت دیواره و امتداد شکستگی‌ها در دو حالت نسبت تنش‌های برجا ۲ و ۱/۰۶

بردن فشار سیال می‌شود [۱۰]. 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. این مسئله در شکل (۱۳، a و b) نمایش داده شده است. بر اساس نتایج حاصل از مطالعه انجام‌شده تغییرات نرخ جریان سیال حفاری، تأثیر بسزایی بر ایجاد شکست‌های کششی و جابجایی‌های برشی دارد. افزایش نرخ جریان به طور قابل توجهی منجر به افزایش شکست‌های کششی در مدل می‌شود. این مفهوم با افزایش فشار تزریق قابل بیان است که در واقع منجر به حضور مقدار بیشتری انرژی برای وقوع شکست در سنگ در مجاورت چاه خواهد شد [۱۰]. این رفتار مشاهده‌شده از مدلسازی چاه در سازندهای دارای ناپیوستگی این امکان را می‌دهد تا بتوان از نرخ جریان به عنوان یک فاکتور قابل کنترل فعال در مقدار و نوع شکست ایجاد شده در بین ناپیوستگی‌ها بهره برد.

با افزایش نرخ تزریق سیال از محدوده ۵ بشکه بر ساعت تا ۲۵ بشکه بر ساعت جابجایی برشی به طور 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. به طور مشابه با افزایش فشار سیال درون چاه تنش کششی افزایش یافته و به صورت شکست کششی ظاهر می‌شود [۱۰]. فشار برجای منفذی در نرخ جریان ۵ بشکه بر ساعت در نقاط مختلف پایش در بیشترین مقدار در مقایسه با سایر نرخ‌های جریان است.

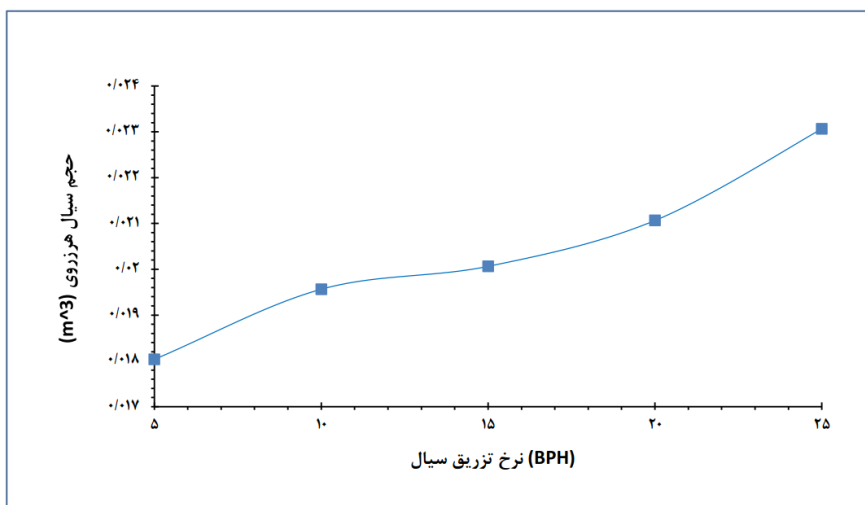
علت این مسئله جابجایی برشی کمتر در نرخ جریان پایین است. به همین دلیل بازشدگی هیدرولیکی به اندازه کافی بزرگ نیست که اجازه ایجاد یک جریان سیال نامحدود را بدهد و به همین ترتیب نرخ جریان برای ایجاد شکست کششی کم است. در نتیجه همین اتفاق، پراکندگی و گسترش فشار منفذی کم خواهد شد که منجر به بالا



شکل ۱۳: (a) نمودار تغییرات جابجایی برشی در مقابل نرخ‌های تزریق سیال حفاری. (b) نمودار تغییرات فشار سیال در امتداد شکستگی‌ها در مقایسه با تغییرات نرخ تزریق سیال حفاری

در مجموع افزایش فضای در دسترس برای نفوذ سیال به درون شکستگی‌ها خواهد شد. در این حالت حجم بیشتری سیال به درون شکستگی‌ها نفوذ خواهد کرد (شکل ۱۴).

به طور مشابهی با افزایش نرخ تزریق سیال حفاری، حجم سیال هرزروی نیز افزایش یافت. در واقع افزایش نرخ تزریق سیال منجر به افزایش جابجایی برشی، لغزش و



شکل ۱۴: نمودار تغییرات حجم سیال هرزروی در امتداد شکستگی‌ها در مقابل نرخ‌های تزریق متفاوت

منطبق بر مشخصه‌های ساختاری ناپیوستگی در مجاورت چاه ایجاد شد. به منظور ارزیابی اولیه چاه، بر اساس معیار بیشترین جابجایی مجاز و میانگین شعاع زون شکست پلاستیک در دیواره چاه انجام شده است. با توجه به حد آستانه ۱۰ درصد مجاز برای جابجایی دیواره، چاه موردنظر در برای سازند ایلام در وضعیت پایداری نسبی قرار دارد. هر چند برای سازند ضعیف‌تر (کژدمی) نتایج به دست آمده از بررسی معیار بیشترین جابجایی مجاز نشان دهنده یک وضعیت ناپایدار برای چاه بود. با تزریق سیال به چاه مکانیزم‌های 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- مقایسه پاسخ مدل عددی با داده‌های برجا (لاگ کالیپر) نشان داد که بر اساس معیار زون شکست پلاستیک نرمال شده، مدل شبیه‌سازی شده دارای پاسخی نزدیک به پاسخ واقعی است.
- ۲- ارزیابی پایداری چاه برای ۵ لایه انتخابی در امتداد چاه موردنظر نشان داد که برای لایه ایلام یک وضعیت پایدار و برای لایه کژدمی یک وضعیت ناپایداری نسبی پیش‌بینی می‌شود.
- ۳- زون شکست پلاستیک برای لایه کژدمی گسترش بیشتری داشته است که بر اساس

۶- نتیجه‌گیری

مسئله ناپایداری چاه و شناخت مکانیزم‌های هیدرومکانیکی مؤثر بر آن در سازندهای دارای شکستگی از جمله مسائل چالش‌برانگیز در صنعت حفاری است. در این مقاله مدلسازی عددی سه‌بعدی یک چاه دریکی از میدان‌های نفتی خلیج فارس به روش المان‌مجزا و شبکه شکستگی‌های مجزا انجام شد نتایج به دست آمده از این مطالعه شامل موارد زیر است. 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 المان‌مجزا مدل سه‌بعدی هیدرومکانیکی چاه در سازند دارای شکستگی بررسی شد. سه بخش اصلی ارائه شده شامل پیاده‌سازی مدل سه‌بعدی از شبکه شکستگی‌های منطقه به روش (DFN)، ساخت و تنظیم مدل سه‌بعدی هیدرومکانیکی چاه به روش (DEM)، اعتبارسنجی و ارزیابی پایداری اولیه مدل بر اساس معیار بیشترین جابجایی مجاز و میانگین شعاع زون شکست پلاستیک و در نهایت بررسی پارامتری است. هرزروی سیال با در نظر گرفتن شرایط تخلخل متناسب به 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

۲- استفاده از روش‌های حفاری با فشار مدیریت شده (MPD) بر اساس مکانیزم‌های 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.

۳- در یک سازند دارای شکستگی، 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 مکانیزم‌های برشی در امتداد شکستگی‌ها اجتناب‌ناپذیر است.

مراجع

- [1] Peng, S., & Zhang, J. (2007). Engineering geology for underground rocks. Springer Science & Business Media.
- [2] Li, S., George, J., & Purdy, C. (2012). Pore-pressure and wellbore-stability prediction to increase drilling efficiency. *Journal of Petroleum Technology*, 64(02), 98-101.
- [3] Meng, M., Baldino, S., Miska, S. Z., & Takach, N. (2019). Wellbore stability in naturally fractured formations featuring dual-porosity/single-permeability and finite radial fluid discharge. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 174, 790-803.
- [4] Labenski, F., Reid, P., & Santos, H. (2003, January). Drilling fluids approaches for control of wellbore instability in fractured formations. In SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- [5] Hashemi, S. S., Taheri, A., & Melkounian, N. (2014). Shear failure analysis of a shallow depth unsupported borehole drilled through poorly cemented granular rock. *Engineering geology*, 183, 39-52.
- [6] Karatela, E., Taheri, A., Xu, C., & Stevenson, G. (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.
- [7] Camac, B. A., & Hunt, S. P. (2004, January). Applications of stress field modelling using the distinct element method for petroleum production. In SPE Asia Pacific Oil and Gas

- گزارش‌های میدانی شرکت نفت فلات قاره در این لایه هرزروی و ریزش‌های مقطعی نیز وجود دارد.
- ۴- 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.
- ۵- 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.
- ۶- 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.
- ۷- 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.
- ۸- 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.
- ۹- فشار سیال در امتداد شکستگی‌ها در رژیم تنش‌های ناهمسانگرد کاهش خواهد یافت. با افزایش نسبت تنش‌های برجای افقی بیشینه به کمینه، ناپایداری (جابجایی‌های برشی و لغزش در امتداد شکستگی‌ها) در محدوده مجاور چاه افزایش خواهد یافت. در نتیجه گسترش سیال در امتداد شکستگی‌های افزایش می‌یابد. افت فشار در حالت تنش‌های ناهمسانگرد نیز به همین علت مشاهده خواهد شد.
- در یک بررسی کلی نتایج به شرح زیر بیان می‌شود.
- ۱- در شرایط حضور شکستگی در مجاورت چاه، به کار بردن نرخ‌های تزریق پایین سیال حفاری با در نظر گرفتن (LCM) های مناسب امکان کنترل هرزروی سیال را بهبود خواهد بخشید.

- [19] Sapigni, M., LA BARBERA, G., & Ghirotti, M. (2003). Engineering geological characterization and comparison of predicted and measured performance of a cavern in the Italian Alps.
- [20] Zhang, X., Last, N., Powrie, W., & Harkness, R. (1999). Numerical modelling of wellbore behaviour in fractured rock masses. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 23(2), 95-115.
- [21] Zhang, Z., He, S., Gu, D., Gai, S., & Li, G. (2018). Effects of stress-dependent permeability on well performance of ultra-low permeability oil reservoir in China. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 8(2), 565-575.
- [22] Han, G., & Dusseault, M. B. (2003). Description of fluid flow around a wellbore with stress-dependent porosity and permeability. *Journal of Petroleum science and engineering*, 40(1-2), 1-16.
- [23] Cao, N., Lei, G., Dong, P., Li, H., Wu, Z., & Li, Y. (2019). Stress-Dependent Permeability of Fractures in Tight Reservoirs. *Energies*, 12(1), 117.
- [24] Baecher, G. B. (1983). Statistical analysis of rock mass fracturing. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 15(2), 329-348.
- [25] Einstein, H. H., & Baecher, G. B. (1983). Probabilistic and statistical methods in engineering geology. *Rock mechanics and rock engineering*, 16(1), 39-72.
- [26] Rives, T., Razack, M., Petit, J. P., & Rawnsley, K. D. (1992). Joint spacing: analogue and numerical simulations. *Journal of Structural Geology*, 14(8-9), 925-937.
- [27] Snow, D. T. (1970, January). The frequency and apertures of fractures in rock. In *International Journal of Rock mechanics and Mining sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 7, No. 1, pp. 23-40). Pergamon.
- [28] Bour, O., Davy, P., Darcel, C., & Odling, N. (2002). A statistical scaling model for fracture network geometry, with validation on a multiscale mapping of a joint network (Hornelen Basin, Norway). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B6), ETG-4.
- [29] Warburton, P. M. (1980, December). Stereological interpretation of joint trace data: influence of joint shape and implications for geological surveys. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 17, No. 6, pp. 305-316). Pergamon.
- [30] Berkowitz, B., & Adler, P. M. (1998). Stereological analysis of fracture network structure in geological formations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B7), 15339-15360.
- Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- [8] Santarelli, F. J., Chenevert, M. E., & Osisanya, S. O. (1992, January). On the Stability of Shales and its consequences in terms of swelling and wellbore stability. In *SPE/IADC Drilling Conference*. Society of Petroleum Engineers.
- [9] Zoback, M. D. (2010). *Reservoir geomechanics*. Cambridge University Press.
- [10] Karatela, E., & 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.
- [11] Yousefian, H., Soltanian, H., Marji, M. F., Abdollahipour, A., & Pourmazaheri, Y. (2018). Numerical simulation of a wellbore stability in an Iranian oilfield utilizing core data. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 168, 577-592.
- [12] Lei, Q., Latham, J. P., & Tsang, C. F. (2017). The use of discrete fracture networks for modelling coupled geomechanical and hydrological behaviour of fractured rocks. *Computers and Geotechnics*, 85, 151-176.
- [13] Salehi, S., Hareland, G., & Nygaard, R. (2010). Numerical simulations of wellbore stability in under-balanced-drilling wells. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 72(3-4), 229-235.
- [14] Itasca. (2016). *3DEC User Manual Version 5.2*. Minneapolis: Itasca Consulting Group.
- [15] Cappa, F., Guglielmi, Y., Rutqvist, J., Tsang, C. F., & Thoraval, A. (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*, 43(7), 1062-1082.
- [16] Hart, R. (2003). Enhancing rock stress understanding through numerical analysis. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 40(7-8), 1089-1097.
- [17] Nagel, N. B., Sanchez-Nagel, M. A., Zhang, F., Garcia, X., & Lee, B. (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*, 46(3), 581-609.
- [18] Min, K. B., Rutqvist, J., Tsang, C. F., & Jing, L. (2004). Stress-dependent permeability of fractured rock masses: a numerical study. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(7), 1191-1210.

[31] Zhang, J. (2013). Borehole stability analysis accounting for anisotropies in drilling to weak bedding planes. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 60, 160-170.

-
- ¹ Non-productive time (NPT)
 - ² Washout
 - ³ Overbalanced drilling
 - ⁴ Drilling Mud Circulation
 - ⁵ Pore pressure (PP)
 - ⁶ Fracture gradient (FG): Fracture gradient, also known as frac gradient, is the pressure gradient at which the formation breaks. Frac gradient is crucial to understand in order to calculate the expected bottom-hole treating pressure (BHTP)
 - ⁷ Low permeability
 - ⁸ Discrete fracture network (DFN)
 - ⁹ Distinct element (DEM)
 - ¹⁰ Stress dependent permeability
 - ¹¹ Independent mechanism
 - ¹² Shear release
 - ¹³ Normalized yield zone radius
 - ¹⁴ Sidetrack
 - ¹⁵ Lost circulation materials (LCM)
 - ¹⁶ Cement Plug
 - ¹⁷ Compressional wave sonic transit time log [DTCO]
 - ¹⁸ Shear wave sonic transit time log [DTSM]
 - ¹⁹ Gamma Ray Data Density [GRIM]
 - ²⁰ Caliper log [Single Acoustic Caliper sensors]
 - ²¹ Neutron Porosity Data Density [RWD]
 - ²² Formation Micro Scaling [FMS]
 - ²³ Normal stiffness
 - ²⁴ Zero normal stress aperture
 - ²⁵ Shear stiffness
 - ²⁶ Sidetrack
 - ²⁷ Stereogram
 - ²⁸ Rosette
 - ²⁹ Fisher distribution
 - ³⁰ Fracture intensity
 - ³¹ Gauss
 - ³² Baecher
 - ³³ Fractal
 - ³⁴ Stereological analysis
 - ³⁵ Diagenesis
 - ³⁶ Hydraulic conductivity
 - ³⁷ Opening of the fractures
 - ³⁸ Navier-Stokes
 - ³⁹ Reynolds
 - ⁴⁰ Mohr coulomb slip model
 - ⁴¹ High mud pressure and low pore pressure (HMLP)
 - ⁴² Yielding past
 - ⁴³ Yielding now
 - ⁴⁴ Out-of-balance force