



## مطالعه اثر چگالی شبکه شکستگی‌ها بر پایداری چاه و هرزروی سیال حفاری با استفاده از روش المان مجزای سه بعدی - شبکه شکستگی‌های مجزا برای چاه SIE-01 در میدان نفتی سیری

محمد کمیلیان<sup>\*</sup>، امید سعیدی<sup>۲</sup>، مهدی رهبر<sup>۲</sup>  
۱. دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
۲. اداره زمین‌شناسی، شرکت نفت فلات قاره

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۱۲ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۱۲  
DOI : 10.22107/jpg.2019.186627.1097

چکیده	واژگان کلیدی
ناپایداری چاه و هرزروی سیال حفاری در سازندهای دارای شکستگی یکی از مسائل عمده در حفاری‌های عمیق است. بررسی اثر حضور شکستگی‌ها بر مکانیسم‌های 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 اثر حضور شکستگی‌ها بر میزان 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. مدل بر اساس معیار میانگین شعاع زون شکست پلاستیک و لاگ کالیبر، اعتبارسنجی شده است. در این مطالعه، اثر تغییرات چگالی شکستگی‌ها بر میزان هرزروی سیال حفاری به‌عنوان یک عامل مهم در پایداری چاه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تغییرات لیتولوژی سنگ تأثیر بسزایی در گسترش شعاع زون شکست پلاستیک در اطراف چاه دارد. علاوه بر این، افزایش چگالی شبکه شکستگی‌ها منجر به افزایش میزان هرزروی سیال حفاری در چاه می‌شود. بررسی تغییر شکل‌های برشی در دیواره چاه نشان داد که در یک چگالی مشخص از شبکه شکستگی‌ها، مکانیسم‌های وقوع ناپایداری در چاه محدود خواهد شد.	چگالی شکستگی، پایداری چاه، روش المان مجزا، شبکه ناپیوستگی‌های مجزا، مدل - سازی هیدرومکانیکی، هرزروی سیال حفاری

روش‌های مختلفی در ارزیابی پایداری چاه‌ها وجود دارد. برخی از این روش‌ها بر پایه مطالعات تجربی (Santarelli, 1992)، تحلیلی (Zoback, 2007) و عددی (Taheri, 2018) است. از آنجایی که مکانیسم‌های شکست چاه در سازندهای دارای شکستگی بسیار پیچیده و شناخت آن‌ها دشوار است، این مسئله نیازمند انجام مطالعات جامع‌تری است. با توجه به گسترش روزافزون روش‌های عددی و افزایش قابلیت‌های نرم‌افزاری در شبیه‌سازی شرایط پیچیده هیدرومکانیکی، امکان انجام مطالعات دقیق‌تر فراهم شده است. بررسی فرآیندهای هیدرومکانیکی با حضور شکستگی در سنگ پیچیده‌تر خواهد شد. مطالعات عددی انجام شده در راستای

### ۱. پیش‌گفتار

ناپایداری چاه یکی از مسائل چالش‌برانگیز در فرآیندهای حفاری است. این مسئله می‌تواند زمان و هزینه حفاری را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد. به‌طور میانگین ۱۰٪ از زمان حفاری یک چاه صرف رفع مشکلات ناشی از وقوع ناپایداری چاه می‌شود (Li, 2012). 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 غیرتحکیمی (Hashemi, 2014)، توده سنگ‌های شدیداً درزه‌دار (Karatela, 2016) و ارزیابی پایداری چاه‌های حفر شده در سازندهای بسیار عمیق (Camac, 2004) است.

پایداری چاه در سازندهای دارای شکستگی است ( Zhang, 1999). 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 فشار منفذی و درنهایت کاهش تنش مؤثر نرمال می‌شود. این مسئله منجر به رهایی برشی و در نتیجه وقوع جابجایی‌های جانبی در صفحات شکستگی می‌شود (Taheri, 2018). 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 (Taheri, 2018).

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 معرفی شده است. در این روش، ایجاد یک مدل سه‌بعدی از شکستگی‌های منطقه، بر اساس داده‌های آماری، توابع توزیع احتمال و به‌صورت تولید تصادفی انجام می‌شود. 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. 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. در این مقاله مدل‌سازی عددی سه‌بعدی یک چاه در یکی از میدان‌های نفتی خلیج فارس به روش المان مجزا و شبکه

بررسی مکانیسم‌های هیدرومکانیکی در سازندهای دارای شکستگی اغلب به‌منظور توصیف خصوصیات اختصاصی توده سنگ‌ها بوده است و کمتر به بررسی مکانیسم‌های هیدرومکانیکی مؤثر در پایداری چاه پرداخته شده است (Taheri, 2018). باید به این نکته اشاره کرد که در این مطالعات شکستگی‌ها اغلب به‌صورت 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. هرچند روش‌های جدیدی مانند شبکه شکستگی‌های مجزا با قابلیت ایجاد یک مدل سه‌بعدی از سیستم شکستگی‌ها به‌صورت تصادفی و بر اساس پارامترهای آماری و توابع توزیع احتمال مشخص، برخی از این دشواری‌ها را تسهیل نموده است (Lei, 2017). در ارزیابی پایداری چاه‌ها روش‌های عددی مختلفی بکار 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 (Salehi, 2010). علاوه بر این، فرمولاسیون این روش‌ها در حالتی که مسئله مورد نظر شامل ناپیوستگی و سطوح شکستگی متقاطع باشد، محدود است (Itasca, 2016). 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، توده سنگ به‌صورت مجموعه‌ای متشکل از بلوک‌های صلب و یا تغییر شکل‌پذیر در نظر گرفته می‌شوند. در این روش سطوح ناپیوستگی به‌مانند مرزهای مجزای اندرکنشی در بین این 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 هیدرولیکی (Nagel, 2013)، نفوذپذیری وابسته به تنش (Min, 2004) و ارزیابی پایداری حفاری سازه‌های زیرزمینی (Sapigni, 2003) بکار گرفته شده است. این روش اثبات کرده است که یک ابزار حیاتی در فهم مکانیسم‌های شکست در توده سنگ‌های درزه‌دار و ارزیابی

موقعیت قرارگیری آن‌ها در نظر گرفته می‌شوند. این مشخصه-ها منطبق با توابع توزیع احتمال معین و بر پایه متغیرهای تصادفی مستقل استنتاج می‌شوند (Baecher, 1983). برای مثال، جهت‌گیری شکستگی‌ها با استفاده از استریوگرام<sup>۱</sup> و یا روزت<sup>۲</sup> پردازش و بر اساس نوع تابع توزیعی که از آن تبعیت می‌کنند، در مجموعه‌های مجزا گروه‌بندی می‌شوند (Einstein, 1983). این توابع توزیع می‌توانند از نوع نرمال، فیشر<sup>۳</sup>، یکنواخت و ... باشند. اندازه شکستگی‌ها به‌طور معمول منطبق بر توابع توزیع قانون توان، نمایی منفی، لاگ نرمال و گاما است. در این روش فرکانس شکستگی‌ها با مفهوم چگالی شکستگی و یا شدت شکستگی<sup>۴</sup> 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 است، مشخص می‌شود (شکل ۱).

چگالی شکستگی‌ها به‌صورت 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 (Rives, 1992). بازشدگی شکستگی معمولاً از توابع توزیع لاگ نرمال و یا قانون توان تبعیت می‌کند (Snow, 1970). موقعیت قرارگیری شکستگی‌ها در مدل سه‌بعدی نیز می‌تواند بر اساس توابع توزیع فیشر، گاوس<sup>۵</sup> 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 شکستگی-های مجزای پوآسن و یا بیچر<sup>۶</sup> مرسوم است. این روش به‌وسیله محققین زیادی برای مطالعات مرتبط با انتقال‌پذیری، تغییر شکل‌پذیری، نفوذپذیری 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 به صورت یک مدل آماری بر اساس رابطه (۱) بیان می‌شود (Bour, 2002).

شکستگی‌های مجزا انجام شده است. مدل به منظور شبیه-سازی 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 به‌صورت تراکم‌ناپذیر فرض شده است. از نفوذپذیری ماتریکس سنگ چشم‌پوشی شده و سیال صرفاً در شکستگی‌ها جریان دارد. در این مدل سازی، تغییر شکل‌های مکانیکی منجر به تغییرات در فشار منفذی و به‌طور متقابل تغییرات در فشار منفذی (تزیق سیال) منجر به وقوع تغییر شکل‌های مکانیکی در مدل خواهد شد. به منظور اعتبارسنجی مدل از معیار میانگین شعاع زون شکست پلاستیک نرمال شده استفاده شده است. پیاده‌سازی مدل سه‌بعدی از سیستم شکستگی‌های منطقه با استفاده از روش شبکه شکستگی مجزا انجام شده است. در این مطالعه سعی شده با بهره‌گیری از توانمندی روش المان مجزا در شبیه-سازی شرایط هیدرومکانیکی چاه و قابلیت‌های روش شبکه شکستگی‌های مجزا در پیاده‌سازی مدل شکستگی‌های منطقه، نحوه اثرگذاری چگالی شکستگی‌ها بر هرزروی سیال و مکانیسم‌های هیدرومکانیکی در ناپایداری چاه بررسی شوند.

## ۲. پیاده‌سازی مدل سه‌بعدی شکستگی‌های

### منطقه با استفاده از روش پوآسن

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 با 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

<sup>1</sup> Stereogram

<sup>2</sup> Rosette

<sup>3</sup> Fisher distribution

<sup>4</sup> Fracture intensity




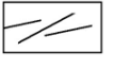


<sup>5</sup> Gauss

<sup>6</sup> Baecher

در واقع معرف نسبت‌های 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 (Lei, 2017). در تئوری ( $D$ ) به بازه‌ی  $[1, 2]$  برای حالت دوبعدی و  $[2, 3]$  برای حالت سه‌بعدی محدود است. مقدار ( $a$ ) نیز به باز  $[1, \infty)$  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.

$$n(l, L)dl = \alpha L^D L^{-a} \text{ for } l \in [l_{min}, l_{max}], (dl \ll l) \quad (1)$$

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>۷</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. ( $a$ ) توان طول، در تابع‌نمایی قانون توان است. توان ( $a$ )

		Measurement Region			
		Line (borehole)	Area (traceplane)	Volume	
					
		dimension	1	2	3
Fracture Density	Number of fractures	0	P10 [# / m]	P20 [# / m <sup>2</sup> ]	P30 [# / m <sup>3</sup> ]
	Fracture trace length 	1	-	P21 [m / m <sup>2</sup> ]	P31 [m / m <sup>3</sup> ]
	Fracture area 	2	-	-	P32 [m <sup>2</sup> / m <sup>3</sup> ]
	Fracture volume 	3	-	-	P33 [m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup> ]

شکل ۱. نمایش نحوه تعریف چگالی شکستگی‌ها در روش شبکه شکستگی‌های مجزا (Itasca, 2016).

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 به‌طور یکنواخت در تمام فضای مدل حضور خواهند داشت. مهم‌ترین پارامتر در ایجاد

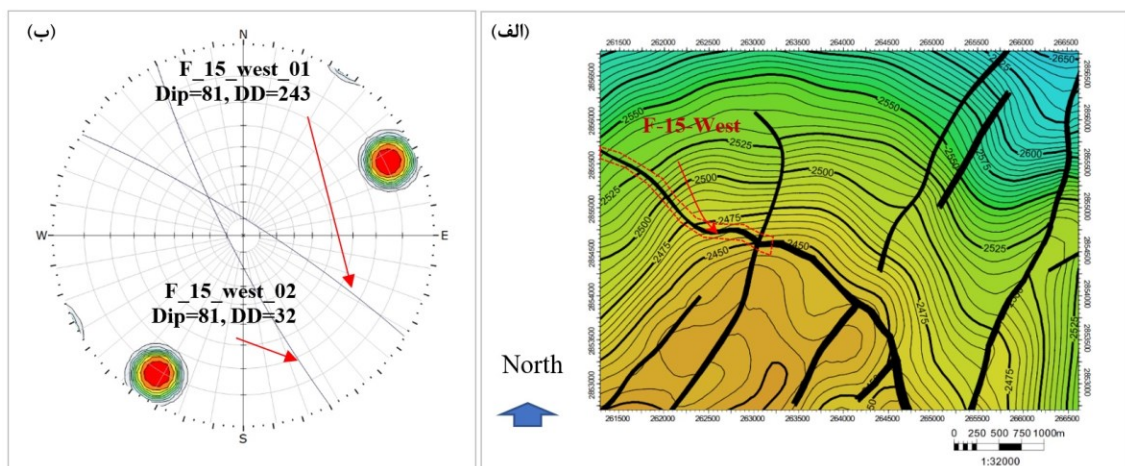
مسئله بعدی نحوه تعریف موقعیت قرارگیری دیسک‌های شکستگی در مدل سه‌بعدی است. موقعیت قرارگیری شکستگی‌ها در مدل سه‌بعدی معمولاً به‌صورت یکنواخت در نظر گرفته می‌شود (Itasca, 2016). بنابراین دیسک‌های

<sup>7</sup> Fractal

## مطالعه اثر چگالی شکستگی‌ها بر پایداری چاه و هرزروی سیال حفاری با استفاده از روش المان‌مجزا ...

۳۲ و ۲۴۳ درجه است (شکل ۲، ب). 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 بزرگ مقیاس بر اساس مشخصه‌های هندسی و جهت‌گیری ناپیوستگی‌ها ایجاد گردید (شکل ۳). 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 (P10) که بر اساس ماهیت تک‌بعدی گمانه‌های برداشت داده‌های هندسی از شکستگی است، اقدام به تعیین الگوی شدت شکستگی‌ها شده است.

یک مدل کارآمد و نزدیک به واقعیت از ساختار شکستگی‌های 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 (۱) و از نظر شیب و جهت شیب به‌طور دقیق منطبق بر داده واقعی خواهند بود. در شکل (۲) نقشه ساختاری از شکستگی‌های منطقه مورد مطالعه بر اساس نتایج پردازش استریوگرام نمایش داده شده است. ناپیوستگی‌های منطقه مورد مطالعه از ۱۴ دسته کلی به ۲ دسته شاخص و مؤثر در چاه، تفکیک شده‌اند. این دو دسته شکستگی دارای شیب تقریبی یکسان ۸۱ درجه و جهت‌گیری متفاوت در راستای



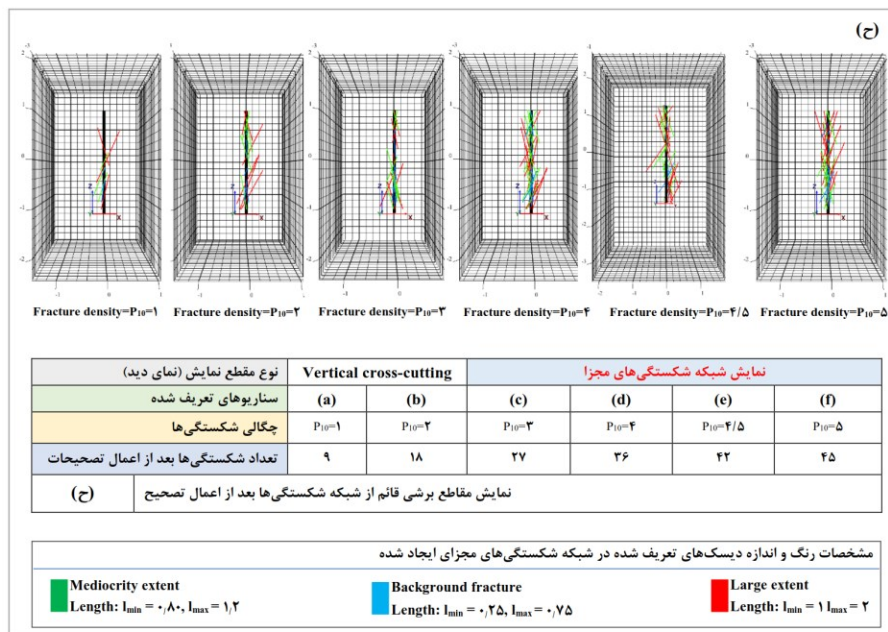
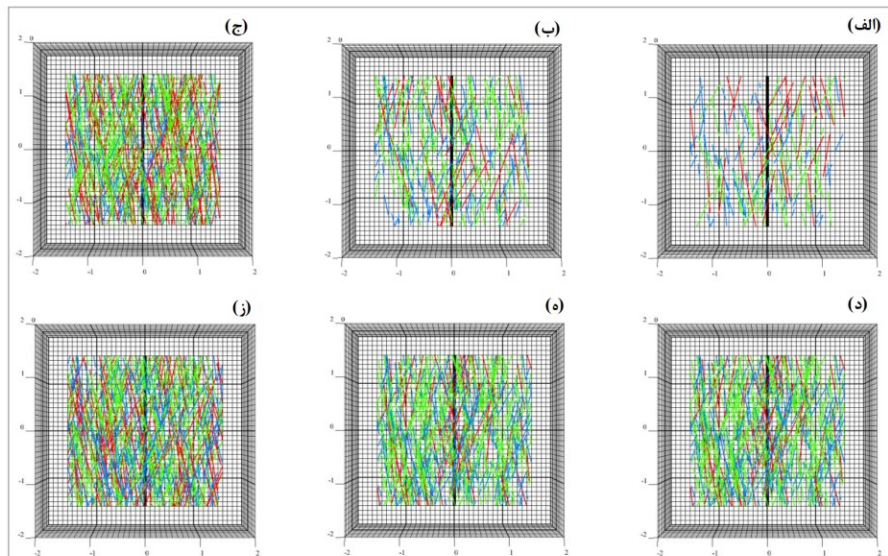
شکل ۲. الف) نقشه ساختاری ناپیوستگی‌های منطقه، ب) نمایش استریوگرام شیب و جهت شیب شکستگی‌ها.

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 (۳) نمایش مقاطع برش قائم از دیسک‌های معرف ناپیوستگی، قبل و بعد از اعمال تصحیح-های ذکر شده، درج شده است. ابعاد دیسک‌های معرف شکستگی‌ها در بازه ۰/۲۵ متر تا ۲ متر تعیین شده است. این دیسک‌های سه‌بعدی به‌صورت یک الگوی برش (دیسک‌ها

به‌منظور بررسی اثر چگالی شکستگی‌ها در رفتار نهایی چاه و ارزیابی پایداری، ۶ سناریو متفاوت برای الگوی فرکنس شکستگی‌ها تعیین شد. در شکل (۳) الگوهای ایجاد شده برای ۶ حالت مختلف درج شده است. فرکنس شکستگی‌ها بر اساس ماهیت تک‌بعدی گمانه‌ها به‌صورت تعداد شکستگی در واحد طول گمانه، از کمترین مقدار ۱ تا بیشترین مقدار ۵ به دست آمد. بهره‌گیری از پالایه‌های متعدد در روند تولید شبکه شکستگی امری ضروری است. تعیین الگوی شکستگی‌ها با

مرحله تعریف خصوصیات مواد، این محدوده با چسبندگی بسیار پایین ( به طور معمول چسبندگی صفر در نظر گرفته می‌شود) در نظر گرفته شود. بخش بیرونی دیسک با تعیین بالاترین حد خصوصیات چسبندگی عملاً به‌عنوان یک ساختار سنگی بدون شکستگی در فرآیند مدل‌سازی وارد می‌شود (Itasca, 2016).

بلوک اصلی را برش می‌دهند) در بلوک اصلی مدل وارد می‌شوند. این شبکه شکستگی‌های مجزای ایجاد شده، بعد از اعمال بر بلوک سه‌بعدی ( بلوکی که شامل محدوده چاه و مرزهای هندسی است)، بلوک را به مشابه صفحات برش قطع خواهد کرد. بنابراین هر دیسک به گستره‌ی بزرگ‌ترین بُعد مدل امتداد خواهد داشت. به‌منظور جداسازی بخشی از قطر این دیسک که معرف محدوده شکستگی است؛ می‌بایست در



شکل ۳. نمایش مدل‌های سه‌بعدی از ساختار شکستگی‌ها بر اساس روش شبکه شکستگی‌های مجزا (پوآسن) برای ۶ سناریو مختلف چگالی شکستگی و منطبق بر ساختار شکستگی مبنای F\_15\_West.

### ۳. شبیه‌سازی جریان سیال حفاری در شکستگی‌ها

به‌منظور تعریف خصوصیات هیدرومکانیکی و شبیه‌سازی شرایط جریان سیال حفاری درون شبکه شکستگی‌ها، پارامترهای بازشدگی شکستگی در شرایط تنش نرمال صفر و بازشدگی باقی‌مانده برای شکستگی‌ها بیان می‌شود. 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 تنش نرمال صفر معرف حالت مینا 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 ۰/۰۰۰۱۲۵ متر تعیین شده است. مشخصه شکستگی‌های مدل شده برای منطقه موردنظر در جدول شماره (۱) درج شده است. مشخصه‌های درج شده در جدول (۱) بر اساس گزارش‌های حاصل از نتایج مطالعات برج‌ها و آزمایشگاهی که در شرکت نفت فلات قاره ایران انجام شده، تهیه شده است.

جدول ۱. مشخصه شکستگی‌های منطقه

پارامتر	سختی برشی	بازشدگی در تنش نرمال صفر	سختی نرمال	چسبندگی	زاویه اصطکاک	بازشدگی باقی مانده
واحد	GPa	m	GPa	MPa	deg	m
	۶	۰/۰۰۰۲۵	۹	۰	۳۲	۰/۰۰۰۱۲۵

است. بر این اساس در محیط نرم‌افزار تابعی برای تعیین تغییرات در حجم فضاهای بازشدگی شکستگی‌ها تعریف شد.

### ۴. مدل‌سازی عددی چاه قائم

همان‌طور که بیان شد، مدل اصلی با استفاده از روش المان-مجزا تهیه شده است. بهره‌گیری از روش المان‌مجزا این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان اثر حضور شکستگی‌ها در رفتار نهایی چاه به‌خوبی در نظر گرفته شود. در واقع در این روش صفحات ناپیوستگی باقابلیت جریان سیال در درون آن‌ها و شبیه‌سازی مکانیسم‌های هیدرومکانیکی به‌خوبی پیاده‌سازی می‌شود. خصوصیات ژئومکانیکی سازندهای منطقه در جدول (۲) درج شده است. این داده‌ها بر اساس آزمایش‌های برج‌ها برای چاه موردنظر 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 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،

به‌منظور شبیه‌سازی رفتار هیدرومکانیکی چاه، در سازند دارای شکستگی، مسئله هرزروی سیال حفاری و فرآیند نفوذ سیال به درون شکستگی‌ها بررسی شد. معادله حاکم بر جریان سیال در شکستگی‌ها بر اساس فرم ساده شده معادله ناویر - استوک<sup>۸</sup> در نظر گرفته شده است. در حالتی که معادله ناویر - استوک برای جریان سیال بین دو صفحه تقریباً موازی، نفوذناپذیر و فرض سیال تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شود، به‌صورت رابطه (۲) بیان می‌شود. در این حالت به فرم ساده شده معادله ناویر- استوک، معادله رینولد<sup>۹</sup> گفته می‌شود (Itasca, 2016).

$$\left(\frac{u^3 \rho g}{12\mu} \varphi\right), i = 0 \quad (2)$$

که در آن  $(u = x_i)$  معرف فاصله بین مرزهای نفوذناپذیر شکستگی‌ها در نقطه  $(x_i (i = 1, 2))$  از صفحه (صفحه متناسب به مرزهای ناپیوستگی)،  $(\varphi = z + \frac{p}{\rho g})$  هد هیدرولیکی،  $(g)$  شتاب گرانش،  $(\rho)$  چگالی سیال حفاری،  $(\mu)$  گرانشی سیال و  $(p)$  فشار سیال است. در صورتی که سیال حفاری تراکم‌ناپذیر فرض شود، حجم هرزروی سیال حفاری، معادل با تغییرات حجم فضای بین شکستگی‌ها (حجم بازشدگی شکستگی)

<sup>8</sup> Navier-Stokes

<sup>9</sup> Reynolds

سروک، کژدمی و داریان است. انتخاب بخش مذکور از چاه موردنظر، بر اساس گزارش‌های هرزروی و ناپایداری (ریزش-های مقطعی) برای ساختارهای سنگی مجاور دیواره چاه انجام گرفته است.

جدول ۲. مشخصات ژئومکانیکی سازندهای معرف ۵ لایه از عمق ۲۷۰۰ تا ۳۱۶۴ متر برای چاه مورد مطالعه (بر اساس گزارش آزمایش‌های برجاس شرکت نفت فلات قاره ایران)

نام سازند	پارامتر واحد	مدول بالک GPa	مدول یانگ GPa	ضریب پوواسن .	مدول برشی GPa	چسبندگی MPa	زاویه اصطکاک deg	چگالی g/cm <sup>3</sup>
گورپی		۶/۴۳	۶/۷۶	۰/۳۲	۷/۲۵	۲۶/۴۶	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

#### ۱.۴ هندسه و شرایط مرزی

هندسه مدل به صورت یک بلوک مکعبی (۲×۲×۳) و یک چاه استوانه‌ای به قطر ۲۰ سانتی‌متر در مرکز مدل ایجاد شده است. 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. بر اساس داده‌های ژئومکانیکی موجود در منطقه گرادیان تنش قائم به صورت MPa/Km ۲۵ تعیین شد. وزن روباره به صورت تنش قائم ( $\sigma_v$ ) ثابت بر اساس رابطه (۳) به مدل اعمال گردید.

$$S_v = \int_{Surface}^{TVD} \rho g dz \quad (3)$$

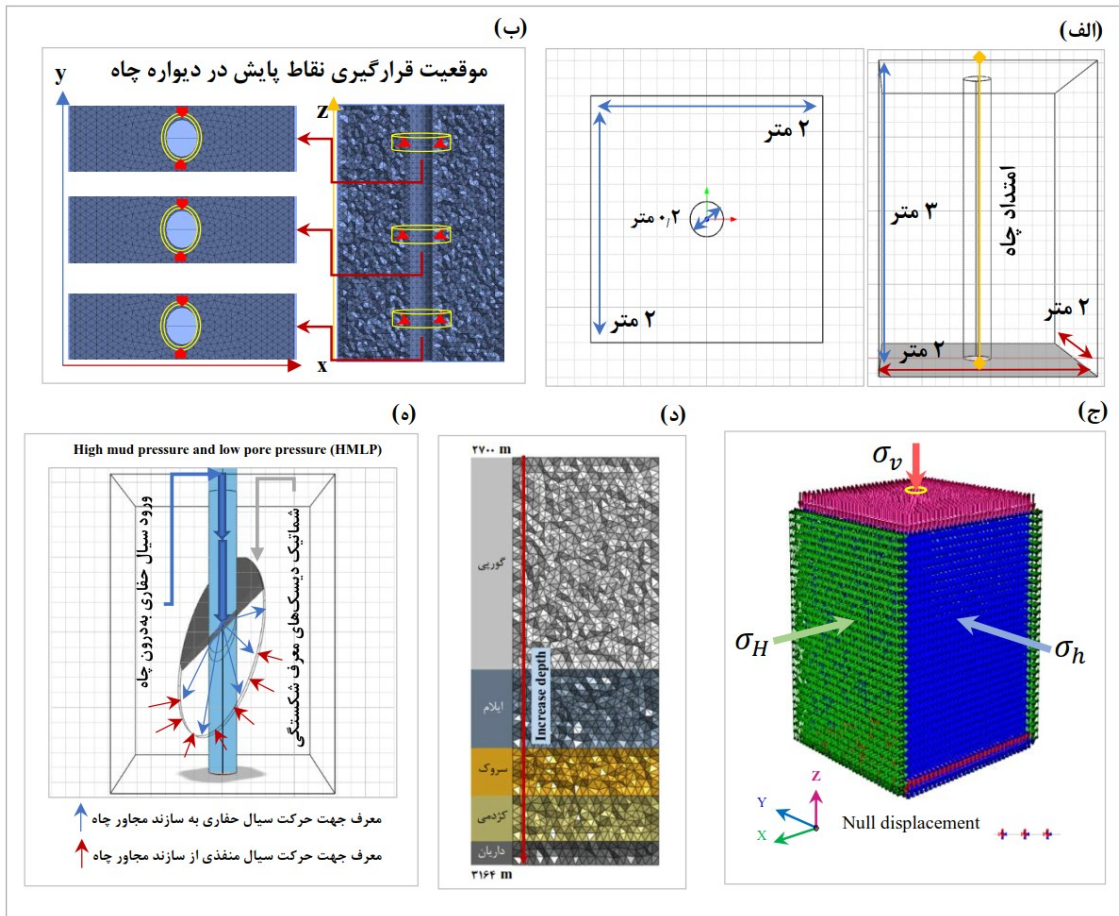
در این رابطه (TVD) عمق قائم واقعی، ( $\rho$ ) چگالی لایه‌های بالایی، ( $g$ ) شتاب گرانش و ( $dz$ ) تغییرات در عمق است. تنش‌های افقی بیشینه ( $\sigma_H$ ) و کمینه ( $\sigma_h$ ) بر اساس داده‌های ژئومکانیکی از محدوده مورد مطالعه که توسط شرکت نفت فلات قاره تهیه شده‌اند، و با در نظر گرفتن نسبت ( $\sigma_H = R_{xxz} \times \sigma_v$ ) 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 رابطه (۳)، 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 ۱۰ 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 (۴) مشخصه‌های هندسی مدل، شرایط مرزی، محل قرارگیری نقاط پایش و نحوه تعریف شرایط تزریق سیال به درون چاه درج شده است. همان‌طور که در شکل (۴-۵) نمایش داده 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 (HMLP<sup>10</sup>) معرفی می‌گردد، استفاده شده است. با بالاتر در نظر گرفتن فشار سیال حفاری، جریان سیال به درون سازند برقرار خواهد شد.

<sup>10</sup> High mud pressure and low pore pressure (HMLP)



مطالعه اثر چگالی شکستگی‌ها بر پایداری چاه و هرزروی سیال حفاری با استفاده از روش المان‌مجزا ...



شکل ۴. (الف) نمایش هندسه و ابعاد مدل ساخته شده. (ب) موقعیت قرارگیری نقاط پایش. (ج) شرایط مرزی تعیین شده برای مدل. (د) موقعیت قرارگیری لایه‌ها نسبت به عمق. (ه) نمایش شماتیک فرآیند تزریق و نفوذ سیال به درون سازند در مقایسه با شرایط فشار منفذی با فرض بالاتر بودن فشار گل حفاری (HMLP).

مواجه‌شدن با سازندهای جدید به‌خوبی مشهود است. این مشاهده نشان می‌دهد که خصوصیات سنگ نقش حیاتی در پایداری چاه ایفا می‌کند (Taheri, 2018). به‌منظور کاهش زمان اجرای مدل‌سازی، هر سازند به‌طور مجزا و با در نظر-گیری یک عمق قائم ارجح برای حذف اثرات مرزی، شبیه‌سازی شده است. سپس ارزیابی پایداری و اعتبارسنجی مدل بر اساس تحلیل تغییر شکل‌های اطراف چاه انجام گرفت. مکانیسم 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 پایداری بودن و یا نبودن چاه بر اساس آن، در یک شرایط

#### ۲.۴ اعتبارسنجی مدل با استفاده از لاگ کالیپر

در این مقاله به‌منظور اعتبارسنجی و ساخت مدل عددی پایه، از معیار میانگین شعاع زون شکست پلاستیک نرمال شده و مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی با داده‌های اندازه‌گیری شده در لاگ کالیپر برای چاه موردنظر، استفاده شده است. در یک حالت مطلوب برای یک چاه پایدار، قطر چاه باید با قطر مته یکسان باشد. هر چند در عمل چنین نیست و به‌طور معمول قطر چاه بزرگ‌تر و یا کوچک‌تر از اندازه مته است. لاگ کالیپر اندازه چاه را می‌سنجد و همچنین شکست‌های به‌وقوع پیوسته در چاه را در قالب افزایش اندازه چاه (تغییر شکل‌های اطراف چاه) نشان می‌دهد (Taheri, 2018). همان‌طور که در شکل (۵) نمایش داده شده است، تغییرات در اندازه چاه در

شده است، با استفاده از شعاع زون تسلیم نرمال شده، اندازه-گیری می‌شود. 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 ( $\frac{R}{r_w}$ )، به‌عنوان آستانه پایداری چاه در نظر گرفته می‌شود (Hawkes, 2007). برای تعیین شعاع میانگین زون تسلیم (زون تغییر شکل پلاستیک)، محدوده شعاعی حضور المان‌های تسلیم (المان‌های قرمز و زرد) در اطراف چاه اندازه-گیری 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 (۵، ب) شماتیکی از نحوه تعریف شعاع زون تسلیم درج 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 مقایسه-ای 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، معیار 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 اندازه-گیری شده در لاگ کالیپر (نسبت تغییرات قطر چاه به قطر اولیه) در محدوده تقریبی ۱٫۵۴ است. در واقع تغییرات قطر چاه نسبت به قطر اولیه چاه به طور میانگین ۱٫۵۴ 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 (Taheri, 2018). داده‌ی چاه نگار کالیپر در عمق متناسب به لایه کژدمی که ضعیف‌ترین لایه در مجموعه سازندها بشمار می‌رود، نشان‌دهنده تغییرات زیاد در اندازه قطر چاه در این مقطع است (شکل ۵، الف). نقش تغییرات لیتولوژی و خواص مرتبط با آن شامل مدول الاستیسیته، چسبندگی، مقاومت فشاری، مدول برشی و سایر پارامترهای طراحی مدل عددی،

خاص ممکن نیست. هرچند این مسئله پذیرفته شده است که برخی از آشفتگی‌های غالب در حفاری چاه در سازندهای دارای شکستگی مشترک است (Karatela, 2016). به منظور ارزیابی رفتاری و اعتبارسنجی مدل ایجاد شده، زون پلاستیک اطراف چاه بررسی شد. زون پلاستیک نشانه قابل توجهی از تغییر شکل‌های اطراف چاه است (Taheri, 2018). در واقع با تعیین محدوده زون پلاستیک اطراف چاه می‌توان محدوده تغییر شکل‌های پلاستیک اطراف چاه را تعیین کرد. محیط نرم‌افزاری المان‌جزا انتخابی این قابلیت را دارد که جریان پلاستیک مواد را ترسیم کند. اما بجای جریان پلاستیک واقعی، بلوک‌های تسلیم شده را نشان می‌دهد (Taheri, 2018). این جریان پلاستیک بر اساس بلوک‌های تسلیم شده-ی بر جا مانده (برخی بلوک‌ها از دیواره جدا شده و از محدوده چاه حذف می‌شوند که این مسئله در محیط یک نرم‌افزار المان‌جزا سه‌بعدی رخ می‌دهد) تخمین زده می‌شود. در ابتدای فرآیند مدل‌سازی، مشاهده بلوک‌های تسلیم شده، در واقع نشان‌دهنده یک وضعیت سیستمی نامتعادل (نیروهای نامتعادل کننده بیش از حد مجاز) 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. این المان‌ها با عنوان تسلیم در گذشته<sup>۱۱</sup> معرفی می‌شوند. در انتهای شبیه‌سازی، المان‌های تسلیم فعال که با عنوان المان‌های تسلیم در حال<sup>۱۲</sup> 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 (Itasca, 2016). شکل (۵) توسعه زون تسلیم اطراف چاه را برای پنج سازند مختلف نشان می‌دهد. مقدار این تسلیم برای تعریف تغییر شکل‌های اطراف چاه اندازه‌گیری می‌شود (Taheri, 2018). 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

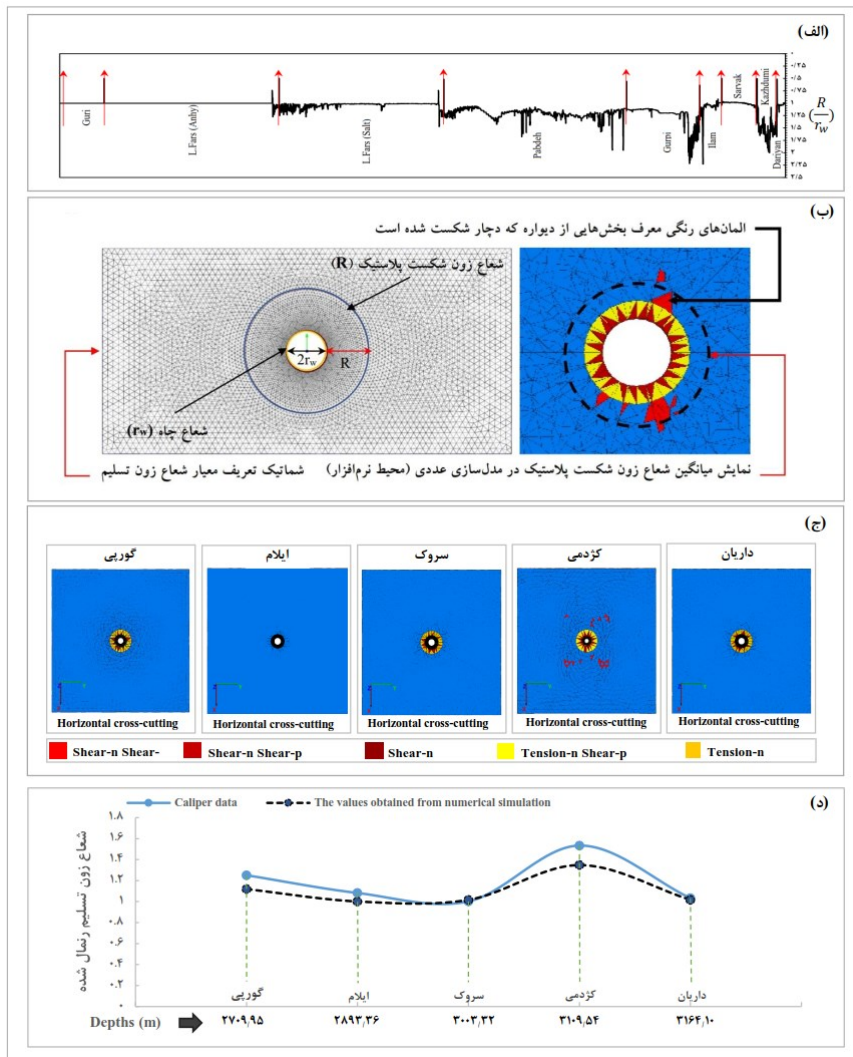
<sup>11</sup> Yielding past

<sup>12</sup> Yielding now

مطالعه اثر چگالی شکستگی‌ها بر پایداری چاه و هرزروی سیال حفاری با استفاده از روش المان‌مجزا ...

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 و داده‌های برجای میدانی است.

در مکانیسم پاسخ سازندها بسیار برجسته است. درواقع خصوصیات مقاومتی توده سنگ، مؤثرترین عامل در ایجاد و یا عدم حضور زون‌های تسلیم در محدوده چاه است (Karatela, 2016). معیار شعاع زون تسلیم نرمال شده، مقیاسی برای ارزیابی و اعتبارسنجی مدل نهایی است. همان‌طور که در شکل (۵ج) مشاهده می‌شود در عمق منتسب به



شکل ۵. (الف) نمایش لاگ کالیپر برای چاه موردنظر (ب) شماتیک نحوه تعریف معیار زون شکست پلاستیک. (ج) نمایش مقاطع برشی افقی از مرکز مدل برای ارزیابی گسترش زون شکست پلاستیک. (د) نمودار مقایسه تغییرات مقادیر لاگ کالیپر برای قطر چاه (این مقدار با تقسیم بر قطر اولیه چاه نرمال شده است) و نتایج مدل‌سازی منتسب به تغییرات شعاع زون شکست پلاستیک.

همان‌طور که در شکل (۵د) مشاهده می‌شود، روند تغییرات در هر دو بخش (نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و نتایج

در این حالت می‌توان مدل به دست آمده را با اطمینان مناسبی برای انجام بررسی‌های پارامتری بعدی مورد استفاده قرار داد.

مربوط به کالیپر) تطبیق داشته و پاسخ مدل در این فرآیند می‌تواند به‌عنوان یک پاسخ نزدیک به واقعیت (شرایط برجا) در نظر گرفته شود. نتایج حاصل از داده‌های میدانی و شبیه-سازی نرم‌افزاری در واقع یک روند تغییرات نسبتاً مشابه برای مواجهه با سازندهای جدید دارند. بدین‌صورت 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. 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 به‌عنوان بحرانی-ترین بخش چاه تعیین شد. بر اساس گزارش‌های شرکت نفت فلات قاره ایران، هرزروی سیال و شکست‌های مقطعی در این بخش از چاه مشاهده 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 مکانیسم‌های ناپایداری و هرزروی سیال حفاری بررسی شده است.

#### ۳.۴ هرزروی سیال حفاری در چاه قائم

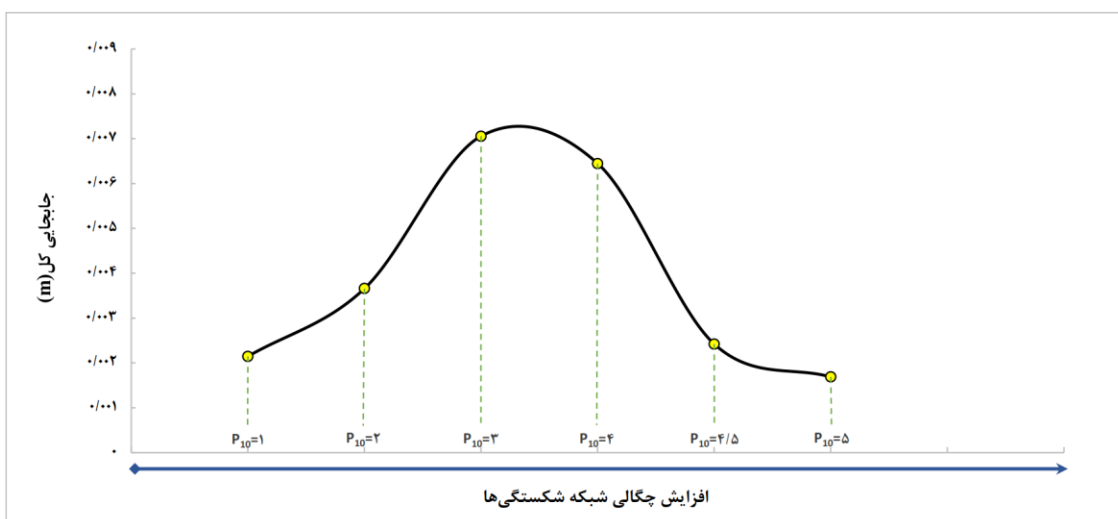
به‌منظور بررسی هرزروی سیال حفاری و ارزیابی پارامتری مدل، ابتدا مدل عددی منطبق بر خصوصیات هیدرومکانیکی و شرایط ژئومکانیکی برجا (مدل عددی منطبق بر شرایط رژیم تنش برجا) ایجاد می‌شود. در نظرگیری پارامترهای مناسب برای گرانروی سیال، فشار دیواره چاه و نرخ تزریق سیال از بخش‌های مهم در این ارزیابی است. بدین منظور برای مدل عددی، شرایط تزریق سیال با نرخ ۲۵ بشکه بر ساعت (معادل ۰/۰۱ مترمکعب بر ثانیه)، گرانروی ۰/۰۱ سانتی‌پواز و همچنین وزن مخصوص ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب تعیین شده است. مدل پایه بر اساس لایه ایلام ایجاد شده است.

به‌منظور درک رفتار توأمان هیدرومکانیکی چاه، در سازند دارای شکستگی، مسئله هرزروی و فرآیند نفوذ سیال به درون شکستگی‌ها بررسی شد. بر این اساس در محیط نرم‌افزار تابعی برای تعیین تغییرات در حجم فضاهای بازشدگی شکستگی‌ها تعریف شد. مفهوم بازشدگی شکستگی (تغییر حجم فضای مربوط به بازشدگی شکستگی‌ها) بر اساس میزان 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. پارامتر مورد بررسی در این مطالعه که به‌عنوان یک عامل غیرقابل کنترل معرفی می‌شود، فرکانس شکستگی‌ها (شدت شکستگی) و یا به عبارتی چگالی حضور صفحات ناپیوستگی در مجموعه ساختار مدل سه‌بعدی شبکه شکستگی‌های مجزا (DFN) است. همان‌طور که بیان شد شدت شکستگی‌ها بر اساس الگوی برداشت فرکانس ناپیوستگی (تعداد شکستگی‌ها در واحد طول) با عنوان الگوی (P10) تعریف می‌شود. ساختار شکستگی موردنظر در این بخش منطبق با مشخصات (F\_15\_West) است. همان‌طور که قبلاً بیان شده این ساختار شکستگی به‌صورت دودسته شکستگی با مشخصات متفاوت تعیین شده است. جهت‌گیری غالب در این سیستم شکستگی به‌صورت جهت ۲۴۳ و ۳۲ درجه تعیین شده است. دو مجموعه تعریف شده که به‌صورت یک ساختار متقاطع است، به منظور بررسی اثر چگالی شکستگی‌ها انتخاب شده است. برای شناخت نحوه اثرگذاری چگالی شکستگی‌ها بر مکانیسم‌های رفتاری چاه، ۶ سناریو از کمترین حد چگالی متعارف تا یک مدل چگال از ساختار شکستگی‌ها تعیین شد. نتایج حاصل از بررسی نحوه اثرگذاری فرکانس شکستگی‌ها بر جابجایی‌ها در محدوده دیواره چاه در شکل (۶) درج شده است. نتایج نشان داد که افزایش چگالی شکستگی‌ها و نحوه اثرگذاری این پارامتر بر تغییر شکل‌ها، دارای یک رویه‌ی یکنواخت از منظر اثرگذاری به‌عنوان یک عامل صرفاً منفی در مقادیر بالای شدت شکستگی و بروز رفتار ناپایداری چاه، نبوده و با رسیدن چگالی شکستگی‌ها به آستانه (P10=3) میزان جابجایی‌ها کاهش یافته و مدل وضعیتی نسبتاً پایدار پیدا خواهد کرد. بدین معنی که با افزایش چگالی و رسیدن به یک

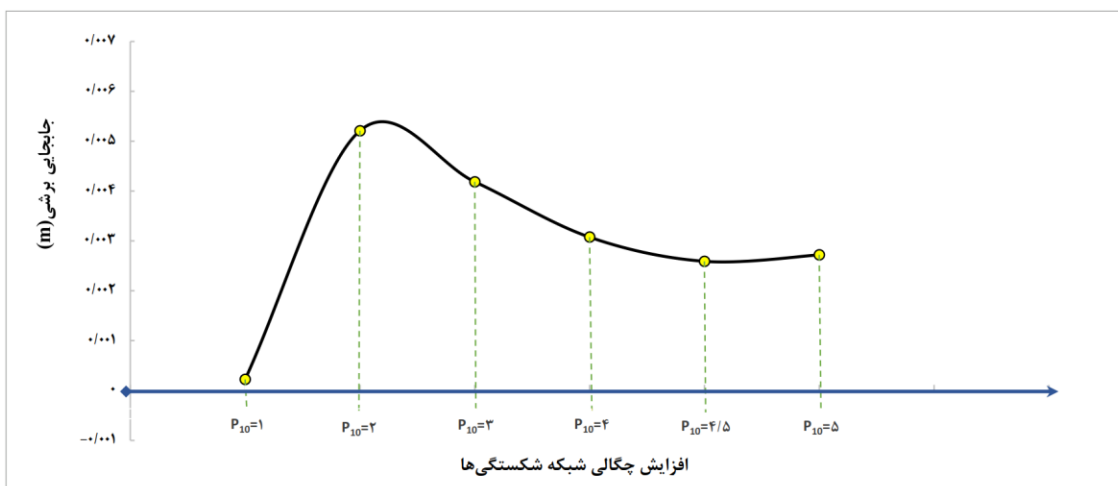
مطالعه اثر چگالی شکستگی‌ها بر پایداری چاه و هرزروی سیال حفاری با استفاده از روش المان‌مجزا ...

مشاهده می‌شود. در شکل (۷) نمودار جابجایی‌های برشی درج شده است. آستانه شدت شکستگی معادل ( $P_{10}=3$ ) به‌عنوان حد تغییر رفتاری (گرایش به یک محیط همگن و یکپارچه) تعیین می‌شود. روند تغییرات در نرخ جابجایی‌های برشی و اختلاف در مقادیر به‌دست آمده برای نتایج جابجایی‌های کل، در تحلیل فرآیندهای هرزروی سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ساختار توده‌سنگی متشکل از شبکه شکستگی‌های چگال (منظور یک محیط معادل توده‌سنگی با یک ساختار شکستگی یکپارچه و یکنواخت در تمام فضای مدل) رفتار مدل متعادل شده و روند تغییر شکل‌های ناپایدار کننده تضعیف شده است. در شکل (۶) محل پیک و تقارن در نمودار جابجایی‌ها برای حد آستانه چگالی ۳ نمایش داده شده است. این مکانیسم رفتاری در تغییر شکل‌های برشی برای محدوده چاه نیز



شکل ۶. نمودار تغییرات جابجایی کل برای میانگین ۱۲ نقطه پایش در محدوده چاه در مقابل تغییرات چگالی شکستگی‌ها.



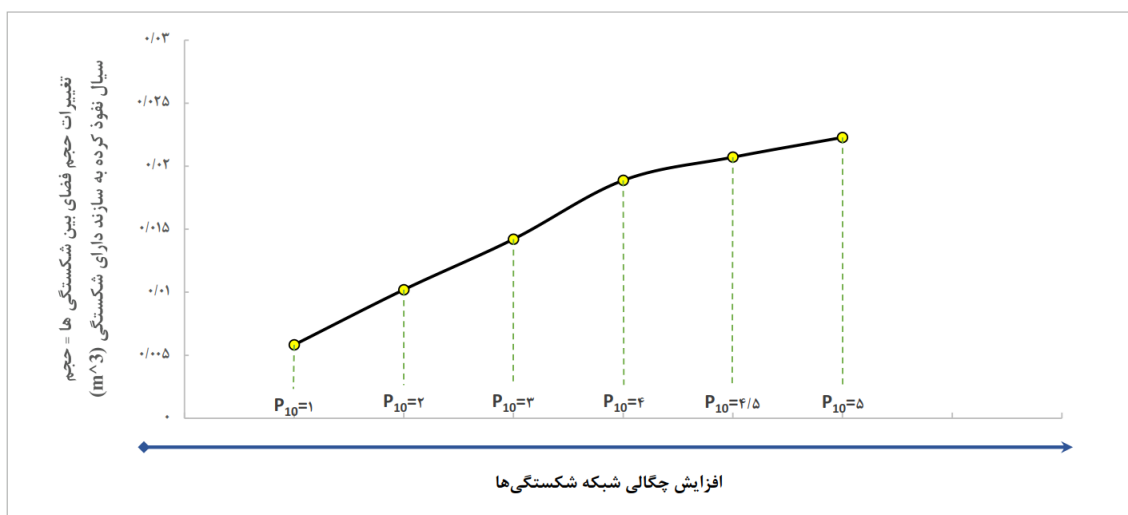
شکل ۷. نمودار تغییرات جابجایی برشی برای میانگین ۱۲ نقطه پایش در محدوده چاه در مقابل تغییرات چگالی شکستگی‌ها.

نفوذ بیشتر (پخش و گسترش) در سازند مجاور خواهد بود. چراکه در مکانیسم‌های محاسباتی در محیط المان‌مجزا،

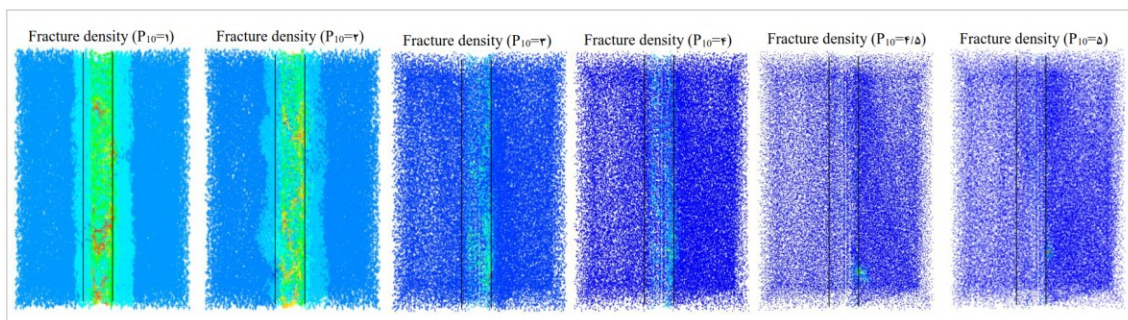
در حالتی که سهم جابجایی برشی در جابجایی‌های کل، بیشتر باشد، نشان‌دهنده هرزروی کمتر سیال (از نظر حجم) ولی

تغییرات حجم شکستگی‌ها به طور غالب متأثر از جابجایی‌های غیر برشی (لغزشی) است. باید به این نکته توجه کرد در حالی که وقوع لغزش و برش متأثر از افزایش نرخ تزریق و یا گرانبوری سیال حفاری است، مکانیسم هرزروی سیال در مقایسه با شرایطی که در آن برش‌ها ناشی از افزایش چگالی شکستگی باشد، متفاوت خواهد بود (Karatela, 2016). همان‌طور که در شکل (۸) نشان داده شده است، با افزایش شدت شکستگی (فرکانس شکستگی‌ها) تغییرات حجم سیال نفوذ کرده به سازند دارای شکستگی (۳) افزایش می‌یابد. در این مطالعه، تغییرات حجم سیال نفوذ کرده به سازند دارای شکستگی (۳) با افزایش چگالی شکستگی‌ها مقایسه شده است. در شکل (۹) مقاطع برشی قائم از محدوده چاه (دیواره چاه) برای نمایش توزیع تانسور تنش برشی درج شده است.

تغییرات حجم شکستگی‌ها به طور غالب متأثر از جابجایی‌های غیر برشی (لغزشی) است. باید به این نکته توجه کرد در حالی که وقوع لغزش و برش متأثر از افزایش نرخ تزریق و یا گرانبوری سیال حفاری است، مکانیسم هرزروی سیال در مقایسه با شرایطی که در آن برش‌ها ناشی از افزایش چگالی شکستگی باشد، متفاوت خواهد بود (Karatela, 2016). همان‌طور که در شکل (۸) نشان داده شده است، با افزایش شدت شکستگی (فرکانس شکستگی‌ها) تغییرات حجم سیال نفوذ کرده به سازند دارای شکستگی افزایش یافته است. با فرض تراکم ناپذیر بودن سیال حفاری، تغییرات حجم فضای بین



شکل ۸. نمودار تغییرات حجم بازشدگی شکستگی‌ها (معادل حجم سیال نفوذ کرده به ساختار شکستگی‌ها) در محدوده دیواره چاه در مقایسه با تغییرات فرکانس ( شدت شکستگی‌ها).



شکل ۹. مقاطع برش قائم برای نمایش نحوه توزیع تانسور تنش برشی بیشینه در محدوده دیواره چاه برای ۶ حالت مختلف چگالی شکستگی‌ها (فرکانس شکستگی).

همان‌طور که شکل (۹) مشاهده می‌شود، با روند رو به افزایش تغییرات در فرکانس شکستگی‌های محدوده چاه، توزیع

یکنواخت‌تری از تنش‌های برشی نتیجه شده است. در این بین مفهوم ایجاد یک محیط همگن با توزیعی چگال از

- شکستگی‌ها در ماتریکس توده سنگ مطرح می‌شود. بنابراین این پدیده که به صورت یک فرآیند رو به پایداری برای چاه تعریف می‌شود، به‌عنوان یک شاخص ارزیابی در سازندهای دارای شکستگی با چگالی بسیار زیاد در نظر گرفته می‌شود. سازندهای شدیداً درزه‌دار در حالتی که تشکیل یک ساختار نسبتاً یکپارچه از مجموعه شکستگی‌های خود دهند، بر اساس مفهوم محیط همگن معادل (ماتریکس توده سنگ متشکل از ساختار چگال از شکستگی‌های متقاطع) می‌تواند به عنوان یک حد آستانه پایداری برای چاه در نظر گرفته شود. در شکل (۷) آنچه به عنوان روند رو به کاهش نرخ جابجایی‌های برشی مشاهده شده است، متأثر از ایجاد یک ماتریکس یکنواخت، شامل توده‌سنگ و مجموعه شکستگی‌های با چگالی زیاد در سازند سنگی است. این مسئله در شکل (۹) به صورت توزیع یکنواخت‌تر (عدم وجود اختلاف در رژیم تنش برشی در محدوده چاه) برای رژیم تنش‌های برشی بیشینه بیان شده است. در شکل (۹) المان‌های مربوط به توزیع تنش برشی بیشینه با یک‌روند رو به یکنواختی، نحوه اثرگذاری چگالی شکستگی‌ها در مکانیسم‌های رفتاری مجموعه چاه، سازند دارای شکستگی و سیال حفاری را نمایش می‌دهد. ارزیابی پایداری چاه در سازندهای دارای شکستگی، نیازمند بررسی توأمان عامل‌های کلیدی تأثیر گذار در فرآیندهای هیدرومکانیکی است. بررسی توأمان نرخ تزریق سیال، نرخ تنش‌های برجا و جهت‌گیری سیستم شکستگی‌ها در مقایسه با امتداد تنش افقی بیشینه و کمینه از جمله این موارد است.
- ۵. نتیجه‌گیری**
- مسئله ناپایداری چاه و شناخت مکانیسم‌های هیدرومکانیکی مؤثر بر آن در سازندهای دارای شکستگی از جمله مسائل چالش‌برانگیز در صنعت حفاری است. در این مقاله مدل‌سازی عددی سه‌بعدی یک چاه در یکی 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.
- 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 گزارش‌های میدانی شرکت نفت فلات قاره در این لایه هرزروی و ریزش‌های مقطعی نیز وجود دارد.
- ۴- بررسی پارامتری اثر چگالی شکستگی‌ها بر پایداری چاه و هرزروی سیال نشان داد که برای محیط سنگی با چگالی بالایی از شکستگی‌ها، حجم سیال نفوذی به سازند بیشتر خواهد بود. هرچند بر اساس نتایج تحلیل جابجایی‌ها و مکانیسم‌های برشی در محدوده چاه نشان داد که برای یک حد آستانه چگالی شکستگی معادل ( $P_{10}=3$ ) تغییر در وضعیت کلی پایداری چاه رخ می‌دهد. در این حالت با گذر از حد آستانه چگالی شکستگی ( $P_{10}=3$ )، تغییر شکل‌ها و مکانیسم‌های برشی محدود شده و یک وضعیت پایداری نسبی ایجاد می‌شود.
- ۵- توزیع یکنواخت رژیم تنش‌های برشی بیشینه در محدوده چاه برای مدل با چگالی بالایی از شکستگی‌ها، معرف تبدیل وضعیت نسبی از یک حالت تقابل و آشفتگی ساختاری به یک حالت تقریبی همگن معادل (مدلی با یک ماتریکس یکنواخت‌تر از مجموعه شکستگی‌ها با چگالی بالا) است.
- باید به این نکته توجه کرد که ارزیابی اثر چگالی شکستگی‌ها با ایجاد سناریوهای مختلفی از نرخ تزریق و گرانش سیال می‌تواند در فهم هر چه بیشتر مکانیسم‌های متأثر از حضور شکستگی‌های چگال در سازند مجاور چاه، کمک شایلی نماید. از این رو به‌عنوان یک تحقیق پیشرو، مسئله ارزیابی پایداری چاه و هرزروی سیال در شرایط نرخ‌های تزریق و گرانشی متفاوت در حال بررسی است. بر اساس مطالعات انجام شده نتایج به صورت افزایش جابجایی‌های برشی در نرخ‌های تزریق بالا به دست آمده است. همچنین در وضعیتی

که گرانروی سیال بالا در نظر گرفته شود، فشار سیال در مجاورت چاه افت شدیدی خواهد داشت که این مسئله به‌صورت افزایش تنش‌های برشی ناشی از غلظت بالای گل حفاری بیان می‌شود. در این حالت سیال حفاری در فضای شکستگی‌ها گسترش بیشتری داشته و در نتیجه افت فشار سیال رخ خواهد داد. نتایج جامع‌تر از تحقیق پیشرو به‌زودی ارائه خواهد شد.

## منابع

- Baecher, G. B. (1983). Statistical analysis of rock mass fracturing. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 15(2), 329-348.
- 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.
- 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 Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- 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.
- Einstein, H. H., & Baecher, G. B. (1983). Probabilistic and statistical methods in engineering geology. *Rock mechanics and rock engineering*, 16(1), 39-72.
- Hart, R. (2003). Enhancing rock stress understanding through numerical analysis. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 40(7-8), 1089-1097.
- Hashemi, S. S., Taheri, A., & Melkoumian, N. (2014). Shear failure analysis of a shallow depth unsupported borehole drilled through poorly cemented granular rock. *Engineering geology*, 183, 39-52.
- Hawkes, C. D. (2007). Assessing the mechanical stability of horizontal boreholes in coal. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(7), 797-813.
- Itasca. (2016). 3DEC User Manual Version 5.2. Minneapolis: Itasca Consulting Group.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

Zoback, M. D. (2010). *Reservoir geomechanics*. Cambridge University Press.