



مقاله پژوهشی

ارزیابی تأثیر شکافت هیدرولیکی بر پتانسیل تولید ماسه در یک چاه نفتی با استفاده از روش المان مجزا

محمد فاتحی مرجی^{۱*}، منوچهر صانعی^۱، مسعود یزدانی^۱، مهدی نجفی^۱

۱- دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۱۳ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/ggj.2026.584860.1265

واژگان کلیدی	چکیده
تولید ماسه، شکافت هیدرولیکی، چاه نفت، روش المان مجزا، نرم افزار PFC2D	تولید ماسه از مخازن ماسه‌سنگی سست یکی از چالش‌های اساسی صنعت نفت است که منجر به فرسایش تجهیزات، کاهش بهره‌وری و افزایش هزینه‌های عملیاتی می‌شود. شکافت هیدرولیکی، اگرچه عمدتاً برای افزایش تراواپذیری و تحریک مخزن انجام می‌شود، می‌تواند پایداری دیواره چاه و پدیده تولید ماسه را تحت تأثیر قرار دهد. با این حال، درک کمی از چگونگی تأثیر مشخصات هندسی شکافت هیدرولیکی (مانند تراکم و طول ترک‌ها) بر میزان تولید ماسه، به‌ویژه در مخازن با درجه سیمان‌شدگی متوسط، همچنان محدود است. در این پژوهش، یک مدل دوبعدی مبتنی بر روش المان مجزا (DEM) در نرم‌افزار PFC2D توسعه داده شده است تا به صورت یکپارچه، فرآیند گسترش شکافت هیدرولیکی و متعاقب آن تولید ماسه را در سه مقطع مختلف از یک چاه واقعی در میدان نفتی آزادگان شبیه‌سازی کند. مدل با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی سه‌محوره کالیبره شد و خطای نسبی پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوره حدود ۱۰/۵ درصد به‌دست آمد. پس از اعمال شرایط مرزی واقعی شامل تنش‌های برجا، فشار مخزن و فشار تولید، مدل برای سه مقطع با سابقه شکست متفاوت اجرا شد. نتایج کمی نشان داد که در مقطع ۱ با بیشترین تراکم و طول شکستگی (تعداد ترک و طول کل بیشتر)، میزان تولید ماسه تجمعی پس از دو روز به‌طور قابل توجهی کمتر از مقطع ۳ با کمترین شکستگی بود. یافته کلیدی حاکی از آن است که برخلاف تصور رایج در برخی مخازن سست، در شرایط ژئومکانیکی مورد مطالعه، وجود شکافت هیدرولیکی گسترده و متراکم با کاهش تولید ماسه همراه است. این پدیده را می‌توان به تشکیل قوس‌های تنش پایدار در پشت نواحی شکسته نسبت داد که نیروی درگ سیال را خنثی کرده و از جدایش ذرات جلوگیری می‌کند. این رویکرد شبیه‌سازی یکپارچه، ابزاری توانمند برای بهینه‌سازی همزمان طراحی شکافت هیدرولیکی و مدیریت تولید ماسه در اختیار مهندسان نفت قرار می‌دهد.

۱. پیشگفتار

امروزه مشکلات مرتبط با ژئومکانیک در صنعت نفت و گاز منجر به افزایش هزینه‌ها و زمان حفاری، تولید و بهره‌برداری از مخازن می‌شود، لذا بررسی و تحلیل ژئومکانیکی به یکی از ضرورت‌های اجتناب‌ناپذیر تبدیل شده است. به طور خاص، پیش‌بینی دقیق رفتار مکانیکی سنگ مخزن تحت شرایط تنش و جریان سیال، نقش کلیدی در موفقیت پروژه‌های بالادستی صنعت نفت ایفا می‌کند. سه حوزه اصلی که در آنها ژئومکانیک نفتی بیشترین کاربرد را دارد عبارتند از: پایداری

دیواره چاه، تولید ماسه و شکافت هیدرولیکی. در میان این چالش‌ها، تولید ماسه (Sand Production) به عنوان یکی از پرهزینه‌ترین و فنی‌ترین معضلات ژئومکانیکی شناخته می‌شود که در مخازن ماسه سنگ رایج است [۱، ۲]. تولید ماسه پدیده جدایش ذرات ماسه از ماتریس سنگ در حین استخراج سیال هیدروکربوری است. این پدیده فیزیکی زمانی رخ می‌دهد که محیط سیال-متخلخل که قبلاً پایدار بوده، ناپایدار شده و به حد مقاومت ماتریس متخلخل می‌رسد و در نتیجه بخش‌های تشکیل‌دهنده آن تجزیه می‌شوند [۳].

۴. در واقع، با کاهش فشار مخزن و افزایش تنش مؤثر، نیروی درگ ناشی از جریان سیال بر نیروهای چسبندگی و اصطکاک بین ذرات غلبه کرده و ذرات ماسه از دیواره چاه جدا شده و وارد جریان تولیدی می‌شوند [۵]. پیامدهای این پدیده شامل فرسایش لوله‌ها، شیرآلات و دریچه‌ها، مسدودشدگی تجهیزات پایین‌چاهی، کاهش نرخ تولید، افزایش هزینه‌های جداسازی جامد از سیال، و در موارد شدید، از دست رفتن کامل چاه می‌باشد [۶]. گزارشات نشان می‌دهد که حدود ۷۰ درصد از ذخایر هیدروکربنی جهان در مخازنی قرار دارد که مستعد تولید ماسه هستند و کنترل نادرست این پدیده ممکن است توسعه چاه‌ها را از نظر اقتصادی غیرممکن کند یا منجر به بسته شدن زود هنگام آنها شود [۴، ۷]. بنابراین، درک دقیق مکانیسم‌های تولید ماسه و توسعه روش‌های پیش‌بینی و کنترل آن، یک ضرورت فنی و اقتصادی انکارناپذیر است. پدیده تولید ماسه تحت تأثیر طیف گسترده‌ای از عوامل قرار دارد. بیانکا [۸] این عوامل را به دو دسته اصلی تقسیم کرده است: (۱) عوامل ذاتی مخزن شامل بزرگی و تغییر تنش‌های برجا، گرا دیان‌های فشار، سرعت جریان سیال، تغییرات در اشباع سیال، ضریب استحکام (شامل استحکام مواد، اصطکاک بین ذرات، قوس‌های شنی و نیروهای موئینگی) و (۲) عوامل عملیاتی شامل راهبردهای حفاری و تکمیل، تولید و تخلیه مخزن. علاوه بر این، فرسایش داخلی (Internal Erosion) نیز به عنوان یک مکانیسم مرتبط مطرح شده است که زمانی رخ می‌دهد که نیروی کشش سیال برای غلبه بر استحکام چسبندگی و اصطکاک مواد و انتقال ذرات کافی باشد [۹]. در این فرآیند، سیال می‌تواند ذرات ریزتر را از عمق سازند منتقل کند و در نتیجه، یک ناحیه به شدت نفوذپذیر در اطراف چاه ایجاد شود که پایداری دیواره چاه را به شدت تهدید می‌کند [۱۰، ۱۱]. همچنین احتمال رسوب مجدد مواد فرسایش‌یافته در نزدیکی حفره وجود دارد که می‌تواند بر پایداری و سرعت جریان تأثیر بگذارد [۱۲، ۱۳، ۱۴].

در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های قابل توجهی در مدل‌سازی عددی تولید ماسه حاصل شده است. روش المان مجزا (DEM) به دلیل توانایی ذاتی در مدل‌سازی شکستگی‌های گسسته، تغییر شکل‌های بزرگ و اندرکنش ذره-سیال، به عنوان یکی از قدرتمندترین ابزارها در این زمینه شناخته می‌شود [۱۵]. یک مرور جامع بر کاربردهای DEM در

شبیه‌سازی تولید ماسه نشان می‌دهد که این روش در سه دهه گذشته به طور گسترده برای مدل‌سازی رفتار مکانیکی ماسه‌سنگ، مواد ماسه‌ای و بسته‌های دانه‌ای استفاده شده است [۱۵]. به طور خاص، مدل پیوند موازی (Parallel Bond Model) در نرم‌افزار PFC2D، به دلیل قابلیت شبیه‌سازی رفتار شکننده سنگ و انتشار ترک، محبوبیت ویژه‌ای دارد. تایوو و همکاران (۲۰۲۵) با توسعه یک مدل عددی یکپارچه که معیار شکست مور-کلمب را با دینامیک جریان سیال ترکیب می‌کند، نشان دادند که نفوذپذیری قوی‌ترین تأثیر را بر نرخ تولید ماسه دارد و افزایش مقاومت فشاری تک‌محوره می‌تواند زمان شروع تولید ماسه را به طور قابل توجهی به تأخیر بیندازد [۱۶]. لیو (۲۰۲۵) با استفاده از روش جفت‌شده CFD-DEM به مدل‌سازی مهاجرت ذرات در کنترل ماسه با اسکرین شکافدار پرداخت و نشان داد که ویسکوزیته کمتر سیال، دبی جریان کمتر و عرض شکاف کوچک‌تر، به تشکیل پل ذرات (Sand Arching) و کاهش تولید ماسه کمک می‌کند [۱۷].

از سوی دیگر، شکافت هیدرولیکی (Hydraulic Fracturing) به عنوان یک تکنیک حیاتی برای تحریک مخازن کم‌تراوا و نامتعارف، با تزریق سیال تحت فشار، شبکه‌ای از ترک‌ها را در اطراف چاه ایجاد می‌کند [۱۸، ۱۹]. اولین آزمایش میدانی شکافت هیدرولیکی در سال ۱۹۴۷ بر روی یک چاه گازی در میدان هوگوتون انجام شد [۲۰] و از آن زمان، این روش به طور گسترده در صنعت نفت و گاز، استخراج انرژی زمین‌گرمایی و حتی مدیریت تنش در معادن مورد استفاده قرار گرفته است [۲۱]. مدل‌های تحلیلی متعددی برای شبیه‌سازی شکافت هیدرولیکی توسعه یافته‌اند که از آن جمله می‌توان به مدل کلاسیک KGD (کریستیانووچ-گرتسما-دکلرک) برای شکستگی‌های با طول زیاد و مدل PKN (پرکینز-کرن-نوردگرن) برای شکستگی‌های با ارتفاع محدود اشاره کرد [۲۲]. با این حال، این مدل‌های تحلیلی به دلیل فرضیات ساده‌کننده، قادر به شبیه‌سازی پیچیدگی‌های واقعی مانند ناهمگنی مخزن، اندرکنش ترک با ناپیوستگی‌های طبیعی و اثرات جفت‌شدگی سیال-جامد نیستند [۲۳]. از این رو، در دهه‌های اخیر، روش‌های عددی پیشرفته‌ای مانند روش اجزای محدود (FEM)، روش المان محدود توسعه‌یافته (XFEM) و روش المان مجزا (DEM) برای مدل‌سازی

شکافت هیدرولیکی مورد استفاده گسترده قرار گرفته‌اند [۲۴].

روش XFEM به دلیل توانایی در مدل‌سازی مسیرهای پیچیده ترک بدون نیاز به بازمشبندی (re-meshing)، به یک رویکرد محاسباتی پیشرو در مطالعه رشد ترک در سنگ‌ها تبدیل شده است [۲۵، ۲۶]. در پژوهشی دیگر، محققان با استفاده از XFEM به بررسی شروع، انتشار و اندازه دهانه ترک در سازندهای سنگی پرداخته و نتایج را با روش المان مرزی (BEM) اعتبارسنجی نمودند [۲۶]. یافته‌های آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش زاویه ترک نسبت به راستای تنش اصلی، مسیر انتشار آن مستقیم‌تر می‌شود؛ با این حال، رشد چنین ترک‌هایی با زوایای بزرگ نیازمند اعمال تنش اضافی بیشتری است. همچنین، روش کوپل (XFEM) و روش شبکه شکست گسسته (EDFM) برای شبیه‌سازی جریان چندفازی در مخازن شکسته توسعه یافته است که قادر به پیش‌بینی دقیق‌تر تولید از مخازن نامتعارف می‌باشد [۲۷].

علاوه بر روش‌های متعارف شکافت هیدرولیکی، تکنیک‌های جایگزینی مانند شکست انفجاری (Explosive Fracturing) نیز برای تحریک مخازن بسیار کم‌تراوا پیشنهاد شده‌اند. این تکنیک که ماهیتی مشابه شکافت هیدرولیکی دارد، به جای تزریق سیال تحت فشار، از امواج شوک ناشی از انفجار و فشار گاز برای ایجاد و انتشار ترک‌های شعاعی اطراف چاه استفاده می‌کند و به ویژه در مناطق با کمبود آب و برای مخازن حساس به سیال، یک گزینه جذاب محسوب می‌شود [۲۸]. در پژوهشی دیگر، محققان به تحلیل تکنیک شکست انفجاری با استفاده از روش‌های تحلیلی-عددی شامل کوپل روش تفاضل محدود صریح (FDM) و روش ناپیوستگی جابجایی (DDM) پرداختند [۲۸]. نتایج عددی آن‌ها نشان می‌دهد که امواج شوک مسئول شروع و انتشار ترک‌های شعاعی بوده و سپس فشار گاز ناشی از انفجار باعث ادامه انتشار این ترک‌ها در سنگ مخزن می‌شود. لک و همکاران (۲۰۱۸) نیز با استفاده از مدل‌سازی المان مجزا، مکانیسم گسترش ترک ناشی از انفجار در توده‌های سنگی درزه‌دار را شبیه‌سازی کردند و نشان دادند که وجود درزه‌ها می‌تواند مسیر انتشار ترک را به طور قابل توجهی تغییر دهد [۲۹]. با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در مدل‌سازی مجزای شکافت هیدرولیکی و تولید ماسه، شکاف دانش قابل توجهی در درک

اثرات متقابل این دو پدیده بر یکدیگر وجود دارد. به عبارت دیگر، پژوهش‌های اندکی به طور یکپارچه به این سؤال پاسخ داده‌اند که آیا شکافت هیدرولیکی تولید ماسه را تشدید می‌کند یا مهار می‌نماید؟ این مسئله به ویژه در مخازن با درجه سیمان‌شدگی متوسط و برای مقاطع مختلف چاه با سابقه متفاوت عملیات شکست، نیازمند بررسی بیشتر است. برخی مطالعات اولیه نشان داده‌اند که در شرایط خاص ژئومکانیکی، شکافت هیدرولیکی گسترده می‌تواند با ایجاد قوس‌های تنش پایدار (Stable Stress Arches) از تولید ماسه جلوگیری کند. در همین راستا، یزدانی و همکاران (۲۰۲۵) با استفاده از نرم‌افزار PFC2D به شبیه‌سازی مکانیزم شکافت هیدرولیکی اطراف چاه‌های هیدروکربنی با تأکید بر اثرات آن بر تولید ماسه پرداختند و نشان دادند که مدل کالیبره‌شده می‌تواند تغییرات نرخ تولید ماسه را در مقایسه با حالت شکسته‌نشده پیش‌بینی کند [۳۰]. با این حال، این مطالعات عمدتاً به بررسی پارامترهای هندسی ساده محدود شده و کمتر به شبیه‌سازی یکپارچه در یک میدان واقعی با داده‌های عملیاتی کامل پرداخته‌اند.

علاوه بر جنبه‌های مکانیکی، اثرات شیمیایی نیز می‌توانند نقش مهمی در یکپارچگی چاه و تولید ماسه ایفا کنند. به عنوان مثال، در مخازن ذخیره‌سازی CO₂، سیال اسیدی حاصل از حل شدن CO₂ در آب، می‌تواند سیمان اطراف چاه را تخریب کرده و مسیرهای ترجیحی برای نشت سیال ایجاد کند [۳۱]. این مسئله نشان می‌دهد که مدل‌سازی یکپارچه و چندفیزیکی که اثرات شیمیایی را نیز در نظر بگیرد، برای ارزیابی جامع پایداری چاه ضروری است [۳۱].

در سال‌های اخیر، توجه فزاینده‌ای به شبیه‌سازی جفت‌شده شکافت هیدرولیکی و تولید ماسه معطوف شده است. یک مطالعه جامع با استفاده از یک مدل کاملاً جفت‌شده ترمو-هیدرو-مکانیکی-شیمیایی (THMC) نشان داد که شکافت هیدرولیکی در مخازن هیدرات‌گازی، اگرچه تولید گاز را تا ۵۷٪ افزایش می‌دهد، اما به طور همزمان خطر تولید ماسه را نیز به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد [۳۲]. این مطالعه بر اهمیت ارزیابی همزمان مزایا و معایب شکافت هیدرولیکی تأکید می‌کند. همچنین، شبیه‌سازی‌های عددی متعددی با استفاده از روش اجزای محدود جفت‌شده برای درک مکانیسم‌های پیچیده شکست در سازندهای ماسه‌سنگی

سست و ضخیم انجام شده است [۳۳]. این شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که در این نوع مخازن، شکافت هیدرولیکی تمایل به ایجاد ترک‌هایی با طول کوتاه و عرض زیاد دارد که تأثیرات متفاوتی بر تولید ماسه نسبت به مخازن سنگ‌آهکی سخت دارد.

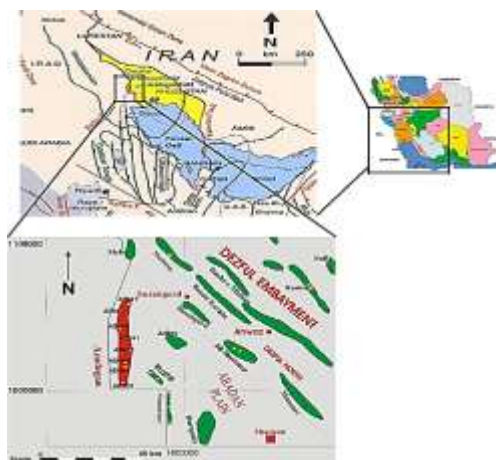
علاوه بر روش‌های المان مجزا و XFEM، روش‌های عددی دیگری نیز برای مطالعه شکافت هیدرولیکی و تولید ماسه به کار گرفته شده‌اند. روش ناپیوستگی جابجایی (Displacement Discontinuity Method) به دلیل کارایی بالا در مدل‌سازی ترک‌های باریک، به طور گسترده در مسائل شکافت هیدرولیکی استفاده شده است. عبدالله‌پور و فاتحی‌مرجی (۲۰۲۰) یک روش ناپیوستگی جابجایی ترمو-هیدرو-مکانیکی (THM-DDM) برای مدل‌سازی ترک‌ها در محیط‌های با فشار و دمای بالا توسعه دادند [۳۴]. این روش قادر است اثرات تنش حرارتی و فشار سیال را به طور همزمان در نظر بگیرد. همچنین، روش ناپیوستگی جابجایی مرتبه بالاتر (HODDM) برای مدل‌سازی دقیق‌تر توزیع تنش در نوک ترک و پیش‌بینی مسیر رشد ترک در شرایط مختلف تنش برجا مورد استفاده قرار گرفته است [۳۵، ۳۶].

هدف اصلی پژوهش حاضر، پر کردن این شکاف دانشی با استفاده از یک رویکرد شبیه‌سازی یکپارچه است. در این تحقیق، با بهره‌گیری از روش عددی المان مجزا (DEM) نرم‌افزار PFC2D، یک مدل دو بعدی توسعه داده شده است که قادر است به طور همزمان فرآیند گسترش شکافت هیدرولیکی و سپس تولید ماسه را در سه مقطع مختلف از یک چاه واقعی در میدان نفتی آزادگان شبیه‌سازی کند. نوآوری اصلی پژوهش را می‌توان در سه جنبه زیر خلاصه کرد: (۱) استفاده از یک مدل یکپارچه و کالیبره‌شده برای شبیه‌سازی متوالی شکافت هیدرولیکی و تولید ماسه در یک چاه واقعی با داده‌های عملیاتی کامل، (۲) مقایسه کمی و دقیق سه مقطع مختلف چاه با سابقه شکست متفاوت (حداکثر، متوسط و حداقل شکست) و تعیین رابطه کمی بین شدت شکافت هیدرولیکی و نرخ تولید ماسه، و (۳) اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی با گزارشات میدانی موجود (شامل داده‌های هرزروی گل و تولید ذرات جامد) که به ندرت در مطالعات پیشین انجام شده است. ساختار این مقاله به گونه‌ای است که پس از این مقدمه، در بخش دوم مشخصات

ژئومکانیکی سازند مورد مطالعه ارائه می‌شود، بخش سوم به روش‌شناسی عددی و فرآیند کالیبراسیون اختصاص دارد، نتایج شبیه‌سازی در بخش چهارم ارائه و در بخش پنجم مورد بحث قرار می‌گیرد، و نهایتاً در بخش ششم نتیجه‌گیری و پیشنهادات آورده می‌شود.

۲. مشخصات ژئومکانیکی سازند مورد مطالعه

میدان نفتی آزادگان یکی از بزرگترین میادین نفتی ایران و یکی از بزرگ‌ترین میادین نفتی جهان محسوب می‌شود که محدودهای به وسعت ۱۵۰۰ کیلومترمربع را می‌پوشاند. این میدان در ۱۰۰ کیلومتری غرب اهواز و در منطقه دشت آزادگان قرار گرفته است. این میدان نفتی به موازات خط مرزی ایران و عراق، در فاصله ۳۰ کیلومتری جنوب غرب میدان جفیر و ۸۰ کیلومتری غرب اهواز واقع شده است (شکل ۵-۱). میدان آزادگان با وسعتی در حدود ۱۵۰۰ کیلومتر مربع و حجم نفت در جای بالغ بر ۳۰ میلیارد بشکه، یکی از عظیم‌ترین میادین نفتی توسعه نیافته جهان محسوب می‌شود. در این میدان چهار لایه سروک، بخش زیرین کژدمی، گدوان و فهلان به عنوان مخازن قابل بهره‌برداری شناخته شده و با حفر چاه شماره ۷ این میدان، سازندهای نفتی ایلام و لایه ماسه‌سنگی آزادگان (بورگان) نیز حاوی نفت قابل تولید ارزیابی گردیده است. شکل ۱ موقعیت میدان نفتی آزادگان را نشان می‌دهد. مقادیر خصوصیات ژئومکانیکی و تنش‌های برجا در مقطع ۱ به ترتیب در جداول ۱ و ۲ آمده است.



شکل ۱. موقعیت میدان نفتی آزادگان

۳. شبیه‌سازی عددی

۱.۳. مبانی ریاضی روش المان مجزا و مدل پیوند موازی

در این پژوهش، از روش عددی المان مجزا (DEM) با استفاده از مدل پیوند موازی (Parallel Bond Model) در نرم‌افزار PFC2D استفاده شده است [۳۷]. در این روش، محیط پیوسته سنگ با مجموعه‌ای از ذرات دایره‌ای شکل (دیسک) که در نقاط تماس با یکدیگر پیوندهایی الاستیک-شکننده دارند، گسسته‌سازی می‌شود [۳۹]. معادلات حاکم شامل سه دسته اصلی هستند: (۱) معادلات حرکت ذرات، (۲) قوانین تماس و مدل پیوند موازی، (۳) معادلات جریان سیال و نیروی درگ. در ادامه هر یک تشریح می‌گردد.

۱.۱.۳. معادلات حرکت ذرات (قانون دوم نیوتن)

هر ذره (دیسک) در محیط دوبعدی دارای سه درجه آزادی (دو جابجایی خطی و یک چرخش) است [۳۸]. معادلات حرکت برای ذره i به صورت زیر نوشته می‌شوند [۳۷]. حرکت خطی:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = F_i = \sum_j F_{ij}^{contact} + F_i^{fluid} + m_i g \quad (1)$$

حرکت چرخشی:

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_j M_{ij}^{contact} \quad (2)$$

که در آن m_i جرم، v_i سرعت خطی، $F_{ij}^{contact}$ نیروی تماسی، F_i^{fluid} نیروی سیال، g شتاب گرانش، I_i ممان اینرسی (برای دیسک $I_i = \frac{1}{2} m_i R_i^2$)، ω_i سرعت زاویه‌ای و $M_{ij}^{contact}$ گشتاور تماسی است [۴۲].

۲.۱.۳. قوانین تماس و مدل تماس خطی

در روش المان مجزا، تماس بین دو ذره با همپوشانی جزئی (overlap) تشخیص داده می‌شود [۳۹]. نیروی تماس به دو مؤلفه نرمال و مماسی تقسیم می‌شود [۴۰، ۴۳]. برای مدل تماس خطی (بدون پیوند یا پس از شکست پیوند)، روابط زیر برقرار است [۴۴].

نیروی نرمال:

جدول ۱. خصوصیات ژئومکانیکی در مقطع ۱

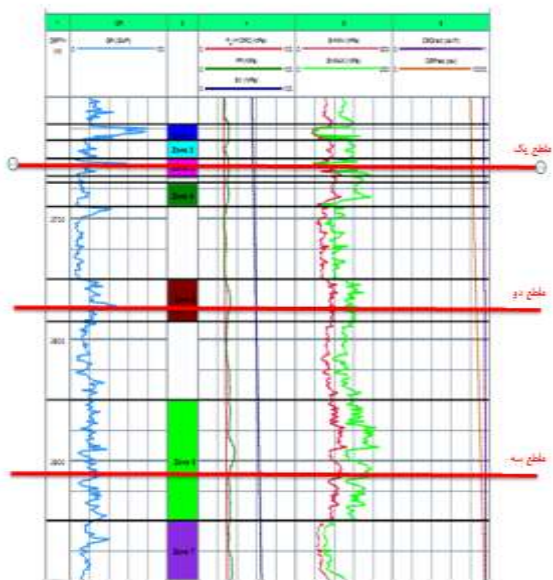
عبدول یانگ (GPa)	نسبت پواسون	تخلخل (%)	فشار منفذی (MPa)
۳۷	۰.۲۷	۱۰	۱۴

جدول ۲. مقادیر تنش‌های برجا در مقطع ۱

تنش قائم (MPa)	تنش افقی حداکثر (MPa)	تنش افقی حداقل (MPa)
۵۴.۲۰	۴۷.۶۲	۴۰.۵۰

۱.۲. مقاطع شکست هیدرولیک در چاه شماره ۶

بر اساس اطلاعات گزارش شده، سه رخداد شکافت هیدرولیکی در مقاطع مختلف این چاه شناسایی شده است که در شکل ۲ به‌عنوان مقاطع ۱، ۲ و ۳ مشخص شده‌اند. شکل ۲ ناحیه‌های مشخص شده در طول چاه را نشان می‌دهد. شکست اول در ناحیه (زون ۱) سوم (مقطع ۱)، شکست دوم در ناحیه پنجم (مقطع ۲) و آخرین شکست در ناحیه ششم (مقطع ۳) بوده است که موارد مذکور به‌خوبی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. ناحیه‌بندی چاه ۶ آزادگان

که در آن α ضریب مقیاس‌گذاری گام زمانی (در این پژوهش ۰.۱)، m_{min} جرم کوچک‌ترین ذره و k_{max} بیشینه سختی تماس در مدل می‌باشد. گام زمانی محاسبه‌شده توسط نرم‌افزار، پایداری عددی حل صریح معادلات حرکت را تضمین می‌کند. پس از تعیین گام زمانی پایدار، مدل عددی به صورت گام‌به‌گام اجرا می‌شود؛ بدین معنا که ابتدا فرآیند گسترش شکافت هیدرولیکی و سپس تولید ماسه در محیط شکسته‌شده شبیه‌سازی می‌گردد. جزئیات انتخاب روش عددی و کالیبراسیون مدل در ادامه ارائه می‌شود.

۲.۳. انتخاب روش عددی

روش‌های عددی متنوعی مانند روش المان محدود، روش المان مجزا، روش‌های ترکیبی المان مجزا-المان محدود، روش چند ظرفیتی عددی و روش ناپیوستگی جابجایی برای مطالعه شروع و انتشار ترک با معیارهای مختلف بر اساس مکانیک شکست وجود دارد. با پیشرفت در محاسبات رایانه‌ای، مطالعات مربوط به بررسی رشد و انتشار ترک با روش‌های عددی گسترش یافته است. روش المان محدود به عنوان یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای مدل‌سازی مواد دارای نقص از پیش موجود در یک محیط پیوسته در نظر گرفته شده است. هیلبربرگ و همکاران [۴۹] تلاش کرد تا مدل منطقه چسبنده را در روش المان محدود برای مصالح بتنی در نظر بگیرد. به طور کلی در روش المان محدود برای مواد سنگی و شبه-سنگی شکست با در نظر گرفتن سه معیار مختلف یعنی تنش اصلی، کرنش اصلی و معیار انرژی بررسی می‌شود. بسیاری از این مطالعات سنگ را با نقص‌های باز در نظر می‌گیرند که تحت تنش فشاری قرار گرفته و این نقص‌ها در طول بارگذاری باز باقی می‌ماند. سنگ ممکن است دارای نقص‌های باز و بسته باشد که در حالت نقص بسته در حین بارگذاری، نقص یا ترک از پیش موجود بسته مانده و منجر به اصطکاک سطح بین نقص می‌شود. با توجه به این رفتار، تغییراتی در شروع ترک و تنش‌های اوج مواد می‌تواند ایجاد شود. داشتن یک معیار مناسب که بتواند تنش شروع ترک را با توجه به تنش اوج برای طراحی و امور مهندسی تعیین کند، حائز اهمیت است. در این پژوهش برای بررسی دقیق مسیر ترک و حل مشکلات موجود در انتخاب معیار شروع ترک، از یک روش المان گسسته مبتنی بر مدل پیوند موازی استفاده شده است. مهم‌ترین مزیت این روش این است که رفتار ساختاری تجربی پیچیده را می‌توان

$$F_n = k_n \cdot U_n \quad (3)$$

نیروی مماسی (برشی):

$$F_s = F_s^{old} + k_s \cdot \Delta U_s \quad (4)$$

نیروی برشی توسط معیار اصطکاک کولن محدود می‌شود [۴۱]، [۴۵].

$$|F_s| \leq \mu \cdot F_n \quad (5)$$

۳.۱.۳. مدل پیوند موازی (Parallel Bond Model)

مدل پیوند موازی، یک اتصال الاستیک-شکننده با مقطع مستطیلی در دو بعد را بین دو ذره شبیه‌سازی می‌کند که قادر به انتقال نیرو و گشتاور است. پیوند تا زمانی که تنش‌های داخلی از مقاومت پیوند تجاوز نکنند، باقی می‌ماند [۴۸].

ویژگی‌های هندسی پیوند [۴۶، ۴۷]:

$$\bar{R} = \lambda \cdot \min(R_A, R_B) \quad \text{شعاع پیوند:}$$

$$t = 1 \text{ با } A = 2\bar{R} \cdot t \quad \text{مقطع عرضی:}$$

$$I = \frac{2}{3} \bar{R}^3 t \quad \text{ممان اینرسی سطح مقطع:}$$

$$J = \frac{4}{3} \bar{R}^3 t \quad \text{گشتاور قطبی:}$$

رفتار الاستیک پیوند:

$$\Delta \bar{F}_n = \bar{k}_n A \cdot \Delta U_n, \Delta \bar{F}_s = \bar{k}_s A \cdot \Delta U_s \quad (6)$$

$$\Delta \bar{M}_b = \bar{k}_n I \cdot \Delta \theta_b, \Delta \bar{M}_t = \bar{k}_s J \cdot \Delta \theta_t \quad (7)$$

تنش‌های بیشینه در حاشیه پیوند:

$$\bar{\sigma}_{max} = \frac{|\bar{F}_n|}{A} + \frac{|\bar{M}_b|}{I} \bar{R}, \bar{\tau}_{max} = \frac{|\bar{F}_s|}{A} + \frac{|\bar{M}_t|}{J} \bar{R} \quad (8)$$

معیار شکست پیوند:

$$\bar{\sigma}_{max} > \bar{\sigma}_c, \quad \text{شکست کششی: اگر}$$

$$\bar{\tau}_{max} > \bar{\tau}_c, \quad \text{شکست برشی: اگر}$$

پس از شکست، پیوند حذف شده و تماس به یک تماس خطی با اصطکاک تبدیل می‌شود [۴۷].

۴.۱.۳. روش حل عددی و گام‌زمانی

معادلات حرکت به روش انتگرال‌گیری صریح با گام‌های زمانی بسیار کوچک حل می‌شوند [۴۸]. گام زمانی بحرانی:

$$\Delta t_c = \alpha \sqrt{\frac{m_{min}}{k_{max}}} \quad (9)$$

۳.۳. کالیبراسیون مدل عددی

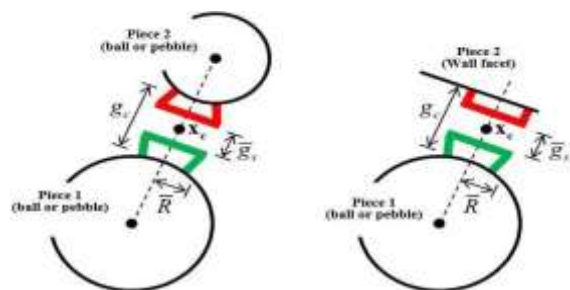
روش عددی المان مجزا را می‌توان برای تحلیل تنش و تغییر شکل در سازه‌های زیرزمینی با وجود ناپیوستگی درون محیط استفاده نمود. نرم افزار *PFC2D* علاوه بر شبیه‌سازی شروع و گسترش ترک، قادر به فراهم کردن امکان شمارش تعداد و پیگیری مکان ترک‌ها و مقایسه آن‌ها با ثبت و نمایش انرژی را دارد [۵۰]. از آن‌جا که مدل عددی در شبیه‌سازی آزمون‌های آزمایشگاهی نماینده سنگ واقعی است، لذا باید از ذرات دیسکی با اتصال تماسی - موازی بین دیسک‌ها استفاده شود. در توالی‌های مکرر پارامترهای میکرو مکانیکی بایستی اتصال‌های تماسی - موازی، نظیر مدول یانگ تماسی E ، نسبت سختی‌های نرمال و برشی در اتصال تماسی K_n/K_s ، مدول یانگ اتصال موازی $\bar{E}$ ، نسبت سختی‌های نرمال و برشی در اتصال موازی $\bar{K}_n/\bar{K}_s$ ، میانگین مقاومت نرمال اتصال موازی $(\sigma_c)_{Mean}$ ، میانگین مقاومت برشی اتصال موازی $(\tau_c)_{Mean}$ را تغییر دهد تا رفتار تک محوره، سه محوره و برزلی و کشش مستقیم مدل با نمونه‌های آزمایشگاهی یکسان شود. همچنین در آزمون عددی تک محوره بایستی مدول الاستیک، نسبت پواسون، تنش شروع ترک و مقاومت تک محوره و در آزمون عددی سه محوره پوش هوک - براون و در آزمون عددی برزلی و کشش مستقیم مقاومت کششی مدل با نمونه آزمایشگاهی کالیبره شود [۳۷].

این نرم‌افزار با داشتن منطقی وسیع، مدل‌سازی مصالح جامد را آسان نموده و آن‌ها را مانند مجموعه‌ای از ذرات در کنار هم مدل می‌نماید. این روند منطقی به وسیله مجموعه دستوراتی به صورت فیش در اختیار کاربر قرار می‌گیرد. عمده مزایای این نرم‌افزار نسبت به سایر نرم افزارهای المان مجزا عبارت است از [۵۰]:

- تشخیص تماس بین اجزا دیسکی ساده‌تر از تشخیص اتصال و تماس بین سطوح بلوکی شکل و گوشه‌دار (در نرم‌افزارهای UDEC و 3DEC) است.
- هیچ محدودیتی در رابطه با بزرگی جابجایی مدل وجود ندارد و باعث نزدیکی مدل ساخته شده با واقعیت می‌شود.

در این پژوهش از اطلاعات مرجع برای ارائه پارامترهای میکرو مکانیکی نمونه سنگ ماسه‌سنگ استفاده شد [۵۱]. با استفاده از آزمون عددی تک محوره، اعتبارسنجی مدل انجام شد و سپس از آن‌ها برای شبیه‌سازی برش سنگ استفاده شد.

با تماس ذرات ساده جایگزین کرد. پوتایندی و همکاران در ایتسکا با معرفی مدل ذرات پیوند یافته، نشان دادند که چگونه می‌توان از تکنیک مدل‌سازی ناپیوسته برای شبیه‌سازی رفتار سنگ‌ها از جمله پوسته شدن (نوعی از شکست ناشی از تنش در اطراف دهانه‌های زیرزمینی) استفاده نمود. در این گونه مسائل مهم‌ترین و تأثیرگذارترین پارامتر، کالیبره کردن خواص مدل ذرات پیوند یافته است [۵۰]. در این روش، تحلیل مبتنی بر ذرات دایره‌ای شکل برای شبیه‌سازی فرآیندهای ترک خوردگی در نمونه‌های حاوی یک نقص باز یا بسته از قبل موجود انجام می‌شود. در ادامه قوانین حاکم بر مدل پیوند موازی خطی بیان شده است. این مدل می‌تواند در هر دو تماس گوی-گوی (ذره-ذره) و گوی-دیواره (ذره-دیواره) قرار گیرد. مولفه پیوند موازی به موازات مولفه خطی عمل می‌کند و تعامل الاستیکی بین ذرات (گوی‌ها) ایجاد می‌کند. یک پیوند موازی را می‌توان به عنوان مجموعه‌ای از فنرهای الاستیک با سختی نرمال و برشی ثابت، بصورت یکنواخت بر روی یک مقطع عرضی (به صورت مستطیل شکل در حالت دو بعدی و دایره‌ای در حالت سه بعدی) که روی صفحه تماس و در مرکز نقطه تماس قرار گرفته فرض کرد. این فنرها به موازات فنرهای با مولفه خطی عمل می‌کنند. حرکت نسبی در تماس، پس از ایجاد پیوند موازی رخ می‌دهد، که باعث ایجاد نیرو و ممان در درون ذرات پیوند خورده شده می‌شود. این نیرو و ممان بر روی دو ذره تماس یافته تأثیر گذاشته و می‌تواند مربوط به حداکثر تنش‌های نرمال و برشی باشد که در داخل ذره پیوند خورده در حاشیه پیوند عمل کند. اگر هر یک از این تنش‌های حداکثر از مقاومت پیوند متناظر آن فراتر رود، پیوند موازی شکسته شده و مولفه‌های نیرو، گشتاور و سختی موجود در ذره پیوند خورده از مدل حذف می‌شود.



شکل ۳. سیمان شدگی بین ذرات در نرم افزار PFC (با نمایش گپ‌های بین ذرات و شعاع پیوند)

جدول ۳، پارامترهای میکرومکانیکی استفاده شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

جدول ۳. پارامترهای میکرو مکانیکی استفاده شده برای مدل عددی PFC2D در

میکروپارامترها	ماسه سنگ	سنگ آهک
نوع ذره	دیسکی	دیسکی
دانشیته kg/m^3	۲۰۵۰	۲۶۲۰
مینیمم شعاع دیسک D_{min}	۰/۲	۰/۳
نسبت بیشینه شعاع ماکزیمم به شعاع مینیمم دیسک D_{max}/D_{min}	۱/۶۶	۱/۶۶
ضریب میرایی (α)	۰/۷	۰/۵
مدول یانگ تماسی E (GPa)	۱۲/۱	۸۳
نسبت سختی‌های اتصال تماسی $(\frac{k_n}{k_s})$	۳/۰۸	۳/۸
مدول یانگ اتصال موازی $\bar{E}$ (GPa)	۱۲/۱	۸۳
نسبت سختی‌های اتصال موازی $(\frac{k_n}{k_s})$	۳/۰۸	۳/۸
ضریب اصطکاک	۰/۵	۰/۵
مقاومت نرمال اتصال موازی $\bar{\sigma}_c$ (MPa)	۵۱/۹	۹۱
مقاومت برشی اتصال موازی $\bar{\tau}_c$ (MPa)	۵۱/۹	۹۱
چسبندگی اتصال موازی (MPa)	۳۲	۵۵
زاویه اصطکاک اتصال موازی (degree)	۳۵	۰

تخلخل نمونه‌ی عددی معادل تخلخل سنگ مخزن (حدود ۱۰ درصد مطابق با جدول ۱) در نظر گرفته شده است. در نرم‌افزار PFC2D، تخلخل به صورت نسبت مساحت کل حفره‌ها به مساحت کل نمونه محاسبه می‌شود. این پارامتر در فرآیند کالیبراسیون با تنظیم شعاع اولیه ذرات، به گونه‌ای تعیین گردیده که ضمن تطابق با تخلخل واقعی سنگ، پاسخ‌های ماکرومکانیکی مدل با نتایج آزمایشگاهی همخوانی داشته باشد.

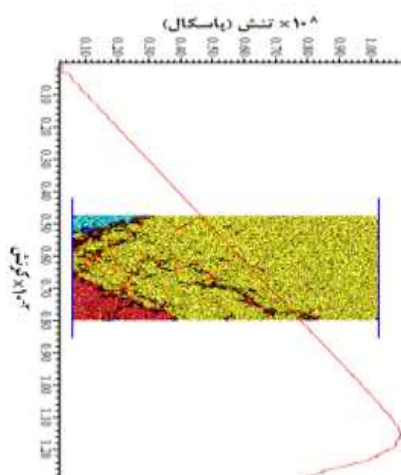
در واقع برای اعتبارسنجی مدل سازی عددی آزمون عددی تک محوره ساخته شده و نتایج آن با داده‌های تجربی قیاس

شد. نتایج شبیه‌سازی عددی در قیاس با نتایج تجربی نشان می‌دهد که تطابق مناسبی وجود دارد. نتایج این قیاس در جدول ۴ بیان شده است. همچنین نمودار تنش- کرنش حاصل از شبیه‌سازی عددی ماسه سنگ در شکل ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴. پارامترهای ماکرومکانیکی مورد استفاده در تحلیل نرم افزار PFC2D (ماسه سنگ)

نتایج ماسه سنگ	مقاومت فشاری تک محوره (MPa)	نسبت پواسون	مدول یانگ (GPa)
آزمایشگاهی (Joodi et al, 2012)	۴۹	-	۱۴
شبیه‌سازی عددی مقاله (Joodi et al, 2012)	۴۸/۸	۰/۳۶	۱۴/۳
شبیه‌سازی عددی در این مقاله	۵۴	۰/۳۶	۱۴/۳

دقت مدل عددی با مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۵۱] ارزیابی شده است. خطای نسبی پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوره حدود ۱۰/۵ درصد و خطای مدول یانگ و نسبت پواسون نیز در محدوده‌ی قابل قبولی قرار دارد که نشان‌دهنده‌ی تطابق مناسب مدل با رفتار واقعی سنگ ماسه سنگ می‌باشد.



شکل ۴. نمودار تنش-کرنش، حاصل از مدل سازی عددی در

نرم افزار PFC2D (ماسه سنگ)

۴. بحث و بررسی

مطالعات و نتایج تجربی نشان می‌دهد که بیشترین مقدار شکست در اطراف چاه در بازه طولی ۳ یا ۴ متر تشکیل می‌شود. لذا در این تحقیق، مدل عددی با شعاع ۳ متر ساخته شد. مدل عددی ساخته شده برای هر مقطع، شامل حدود ۱۵۰,۰۰۰ ذره دیسکی با توزیع اندازه غیریکنواخت (نسبت حداکثر به حداقل شعاع ۱/۶۶ مطابق با جدول ۳) می‌باشد که با استفاده از منحنی دانه‌بندی تعریف شده در فرآیند کالیبراسیون، تولید شده‌اند. پارامترهای ورودی مدل‌سازی مطابق با جداول ۳ و ۴ در نرم‌افزار اعمال شد. شرایط اولیه مطابق با اطلاعات ورودی و شرایط مرزی مطابق با شرایط واقعی چاه به مدل اعمال شد. شرایط مرزی به این صورت است که در مرز بیرونی فشار مخزن و تنش‌های برجا و در مرز داخلی چاه، فشار تکمیل و فشار تولید سیال اعمال شد. مدل‌سازی برای سه ناحیه مشخص شده بصورت مجزا انجام شد. که در ادامه، مدل ساخته شده بعد از شکست برای مقطع ۱ در شکل ۵ نشان داده شده است. همچنین، مدل عددی برای مقاطع ۲ و ۳ به ترتیب در شکل ۶ و ۷ آورده شده است. نتایج این مدل‌سازی نشان می‌دهد که مقطع ۱ بیشترین شکست یا انتشار ترک را دارد و مقطع ۳ کمترین میزان انتشار ترک را می‌رساند.



شکل ۶. مدل عددی شکست مقطع ۲ چاه مورد مطالعه در نرم افزار PFC2D



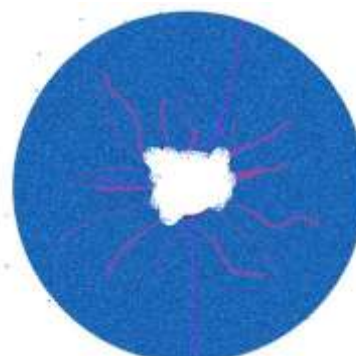
شکل ۷. مدل عددی شکست مقطع ۳ چاه مورد مطالعه در نرم افزار PFC2D

همانطور که در اهداف این پژوهش بیان شد، بعد از ایجاد شکافت هیدرولیکی، فرآیند تولید ماسه بر روی مدل‌های عددی انجام می‌شود تا به نحوی تأثیر شکافت هیدرولیکی بر تولید ماسه مشخص شود. از همین‌رو بر روی مقاطع عددی ساخته شده تست تولید ماسه اعمال و تأثیر شکافت هیدرولیکی بر تولید ماسه مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج مدل‌سازی عددی بعد از گذشت دو روز بدست آمد که به صورت اشکال ۸ الی ۱۰ می‌باشد. همان‌طور که از شکل‌ها مشخص شده است تولید ماسه در مقاطع ۲ و ۳، نسبت به مقطع ۱ بیشتر است. در پایان این دوره‌ی ۲ روزه، نرخ تولید ماسه در هر سه مقطع به شدت کاهش یافته و سیستم به حالت پایدار (*Steady State*) نزدیک شده است. با توجه به کاهش چشمگیر نرخ تولید، شبیه‌سازی تا زمان توقف کامل ادامه نیافته است، اما نتایج موجود نشان‌دهنده‌ی



شکل ۵. مدل عددی شکست مقطع ۱ چاه مورد مطالعه در نرم‌افزار PFC2D

همگرایی مناسب مدل می‌باشد.



شکل ۸. مدل عددی تولید ماسه مقطع ۱ چاه مورد مطالعه در نرم افزار PFC2D



شکل ۹. مدل عددی تولید ماسه مقطع ۲ چاه مورد مطالعه در نرم افزار PFC2D



شکل ۱۰. مدل عددی تولید ماسه مقطع ۳ چاه مورد مطالعه در نرم افزار PFC2D

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر شبکه‌ی ترک‌های ناشی از شکافت هیدرولیکی بر پتانسیل تولید ماسه در یک چاه نفتی واقع در

میدان آزادگان، با استفاده از روش المان مجزا (*DEM*) و نرم‌افزار *PFC2D* مورد بررسی قرار گرفت. مدل عددی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی سه‌محوره کالیبره شد و خطای نسبی پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوره حدود ۵/۱۰ درصد به‌دست آمد.

نتایج شبیه‌سازی در سه مقطع با شدت شکستگی متفاوت (مقطع ۱ با بیشینه، مقطع ۲ با متوسط و مقطع ۳ با کمینه شکستگی) نشان داد که:

۱. در مقطع ۱ با بیشترین تراکم و طول شکستگی، میزان تولید ماسه تجمعی پس از دو روز به‌طور قابل‌توجهی کمتر از مقطع ۳ با کمترین شکستگی بود. این یافته نشان می‌دهد که در شرایط ژئومکانیکی مورد مطالعه، وجود شکافت هیدرولیکی گسترده با کاهش تولید ماسه همراه است.

۲. سازوکار اصلی این کاهش، تشکیل قوس‌های تنش پایدار در پشت نواحی شکسته است که نیروی درگ سیال را خنثی کرده و از جدایش ذرات جلوگیری می‌کند.

۳. تطابق نتایج مدل‌سازی با گزارشات میدانی (هرزروی گل و تولید ذرات جامد) نشان‌دهنده‌ی قابلیت اطمینان رویکرد یکپارچه‌ی ارائه‌شده برای پیش‌بینی تولید ماسه در چاه‌های دارای ناپیوستگی می‌باشد.

از منظر مهندسی، این پژوهش یک چارچوب تحلیلی توانمند برای بهینه‌سازی همزمان طراحی شکافت هیدرولیکی و مدیریت تولید ماسه در مخازن ماسه‌سنگی با درجه سیمان‌شدگی متوسط ارائه می‌دهد. مهندسان نفت می‌توانند با استفاده از این رویکرد، قبل از اجرای عملیات تحریک مخزن، سناریوهای مختلف را شبیه‌سازی کرده و مناسب‌ترین استراتژی را برای کاهش خطر تولید ماسه انتخاب نمایند.

پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، تأثیر پارامترهایی نظیر زاویه‌ی ترک‌ها، نرخ تولید، خواص سیال، و حضور پروپانت در شکاف‌ها بر تولید ماسه در مخازن با درجات مختلف سیمان‌شدگی، با استفاده از مدل‌های جفت‌شده‌ی *CFD-DEM* مورد بررسی قرار گیرد.

۶. مراجع

- [10] Unander, T. E., Papamichos, E., Trovoll, J., & Skjaerstein, A. (1997). Flow geometry effects on sand production from an oil producing perforation cavity. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, *34*(3), 1–15. (DOI: 10.1016/S1365-1609(97)00062-4)
- [11] Papamichos, E., & Malmanger, E. M. (2001). A sand production model. *SPE European Formation Damage Conference*. (DOI: 10.2118/68957-MS)
- [12] Vaziri, H., Barree, B., Xiao, Y., Palmer, I., & Kutas, M. (2002). What is the magic of water in producing sand? *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. (DOI: 10.2118/77683-MS)
- [13] Willson, S. M., Moschovidis, Z. A., Cameron, J. R., & Palmer, I. D. (2002). New model for predicting the rate of sand production. *SPE/ISRM Rock Mechanics Conference*. (DOI: 10.2118/78348-MS)
- [14] Nouri, A., Vaziri, H., Kuru, E., & Islam, R. (2006). A comparison of two sanding criteria in weak and unconsolidated formations. *SPE Journal*, *11*(3), 311–320. (DOI: 10.2118/89855-PA)
- [15] Critical review of DEM simulation for sand production during geo-energy development: Models, parameters, and future directions. (2024). *ScienceDirect*.
- [16] Taiwo, A., et al. (2025). Modeling of sand production in unconsolidated reservoirs: An integrated framework for prediction, control, and sustainable management. *Journal of Engineering Research*.
- [17] Liu, Y. (2025). A discrete element model for simulating the coupled hydraulic-mechanical dynamic mechanical behaviors of rocks. *ScienceDirect*.
- [18] He, Q., Suorineni, F. T., & Oh, J. (2016). Review of hydraulic fracturing for preconditioning in cave mining. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, *49*(12), 4893–4910. (DOI: 10.1007/s00603-016-1028-2)
- [19] Nadimi, S., Miscevic, I., & McLennan, J. (2016). A 3D peridynamic simulation of hydraulic fracture process in a heterogeneous medium. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, *145*, 444–452. (DOI: 10.1016/j.petrol.2016.06.001)
- [1] Duran, O., Sanei, M., Devloo, P. R. B., et al. (2020). An enhanced sequential fully implicit scheme for reservoir geomechanics. *Computational Geosciences*, *24*, 1557–1587. (DOI: 10.1007/s10596-020-09954-1)
- [2] Sanei, M., Duran, O., Devloo, P. R. B., & Santos, E. S. R. (2021). Analysis of pore collapse and shear-enhanced compaction in hydrocarbon reservoirs using coupled poro-elastoplasticity and permeability. *Arabian Journal of Geosciences*, *14*(7). (DOI: 10.1007/s12517-021-07081-2)
- [3] Dusseault, M. B., & Santarelli, F. J. A. (1989). Conceptual model for massive solids production in poorly-consolidated sandstones. *Rock at Great Depth*, *2*(1), 789–797.
- [4] Fjaer, E., Holt, R. M., Horsrud, P., Raaen, A. M., & Risnes, R. (1992). *Petroleum related rock mechanics*. Elsevier.
- [5] Sanei, M., Durán, O., Devloo, P. R. B., & Santos, E. S. R. (2022). Evaluation of the impact of strain-dependent permeability on reservoir productivity using iterative coupled reservoir geomechanical modeling. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, *54*(2). (DOI: 10.1007/s40948-022-00390-2)
- [6] Nouri, A., Kuru, E., & Vaziri, H. (2009). Elastoplastic modelling of sand production using fracture energy regularization method. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, *48*(4), 64–71. (DOI: 10.2118/09-04-64)
- [7] Bianco, L. C. (1999). *Phenomena of sand production in non-consolidated sandstones* (Doctoral dissertation). Penn State University.
- [8] Bianco, L. C., & Halleck, P. M. (2001). Mechanisms of sand production: An experimental study. *SPE International Symposium on Oilfield Chemistry*. (DOI: 10.2118/65009-MS)
- [9] Geilikman, M. B., & Dusseault, M. B. (1997). Dynamics of wormholes and enhancement of fluid production. *Proceedings of the 48th Annual Technical Meeting of the Petroleum Society*, 8–11.

- modeling of explosion-induced fracture extension in jointed rock masses. *Journal of Mining and Environment*, Shahrood University of Technology.
- [30] Yazdani, M., Fatehi Marji, M., Najafi, M., & Sanei, M. (2025). Simulating the hydraulic fracturing mechanism around the hydrocarbon wellbores with emphasizing its effects on the sand production. *Journal of Mining and Environment*, *16*(1), 241–258.
- [31] Integrating mechanical and chemical perspectives: Assessing and enhancing cement sheath integrity in CO₂ geological storage wells. (2025). *ScienceDirect*. (DOI: 10.1016/j.jrmge.2025.11.006)
- [32] Underestimated risks for application of hydraulic fracturing into hydrate exploitation: In the perspective of formation deformation and sand production. (2025). *ScienceDirect*.
- [33] Numerical simulation of hydraulic fracture propagation in unconsolidated sandstone reservoirs. (2024). *Processes* (MDPI).
- [34] Zeerak, M. R., Fatehi Marji, M., Sanei, M., Najafi, M., & Abdollahipour, A. (2026). Numerical modeling of hydraulic fracturing for crack growth mechanism investigation in rocks using XFEM with a BEM-based verification. *Journal of Mining and Environment*, *17*(2), 717–742.
- [35] Zeerak, M. R., Fatehi Marji, M., Sanei, M., Najafi, M., & Abdollahipour, A. (2026). Application of extended finite element method for simulating crack initiation and propagation mechanism in hydraulic fracturing process. *Petroleum Geomechanics*.
- [36] Gu, C., Li, X., Zou, Y., Feng, Y., Sanei, M., Yan, W., & Mosleh, M. H. (2025). Integrating mechanical and chemical perspectives: Assessing and enhancing cement sheath integrity in CO₂ geological storage wells. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. (DOI: 10.1016/j.jrmge.2025.11.006)
- [37] Cundall, P. A. (1971). A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems. *Proceedings of the International Symposium on Rock Mechanics*, Nancy, France, 129–136.
- [38] Itasca Consulting Group, Inc. (2019). *PFC — Particle Flow Code, Ver. 7.0* [Computer
- [20] Carter, B. J., Desroches, J., Ingraffea, A. R., & Wawrzynek, P. (2000). Simulating fully 3D hydraulic fracturing. In *[Book title not provided]* (pp. 525–557). John Wiley & Sons.
- [21] Gandossi, L., & Von Estorff, U. (2015). *An overview of hydraulic fracturing and other formation stimulation technologies for shale gas production*. European Commission, Joint Research Centre. (DOI: 10.2790/348886)
- [22] Economides, M. J., & Nolte, K. G. (2000). *Reservoir stimulation*. John Wiley & Sons.
- [23] Bakhshi, E., Golsanami, N., & Chen, L. (2020). Numerical modeling and lattice method for characterizing hydraulic fracture propagation: A review of the numerical, experimental, and field studies. *Archives of Computational Methods in Engineering*. (DOI: 10.1007/s11831-020-09457-7)
- [24] Zhao, H. J., Ma, F. S., & Guo, J. (2020). Investigation of hydraulic fracturing mechanism by using a coupled continuous-discontinuous hydromechanical model. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *570*, 042042. (DOI: 10.1088/1755-1315/570/4/042042)
- [25] Shi, L.-Y. (2023). Hydraulic fracture propagation in rock mass with XFEM. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, *60*(5), 436–443. (DOI: 10.1007/s11204-023-09915-1)
- [26] Numerical modeling of hydraulic fracturing for crack growth mechanism investigation in rocks using XFEM with a BEM-based verification. (2025). *Journal of Mining and Environment*. Retrieved from https://jme.shahroodut.ac.ir/article_3459.html
- [27] Ren, G., Jiang, J., & Younis, R. M. (2016). A fully coupled XFEM-EDFM model for multiphase flow and geomechanics in fractured reservoirs. *SPE Journal*. (DOI: 10.2118/179695-PA)
- [28] Fatehi Marji, M., Lak, M., & Sanei, M. (2023). The explosive fracturing technique analysis for highly low permeable reservoirs using analytical, displacement discontinuity and finite difference coupled method. *Journal of Petroleum Geomechanics*, *6*(3), 43–57.
- [29] Lak, M., Fatehi Marji, M., Yarahamdi Bafghi, A., & Abdollahipour, A. (2018). Discrete element

- [49] Hillerborg, A., Modéer, M., & Petersson, P. E. (1976). Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cement and Concrete Research*, *6*(6), 773–782. (DOI: 10.1016/0008-8846(76)90007-7)
- [50] Itasca Consulting Group, Inc. (2019). *PFC — Particle Flow Code, Ver. 7.0* [Computer software]. Itasca.
- [51] Joodi, B., Sarmadivaleh, M., Rasouli, V., & Nabipour, A. (2012). Simulation of the cutting action of a single PDC cutter using DEM. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, *81*, 143–150. (DOI: 10.2495/PMR120141)
- [39] Cundall, P. A., & Strack, O. D. L. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, *29*(1), 47–65. (DOI: 10.1680/geot.1979.29.1.47)
- [40] Borges, B. S. (2012). *Estudo da interação solo-geogrelha pelo método dos elementos discretos* (Master's thesis). Universidade de Brasília.
- [41] Kuhn, M. R., Suzuki, K., & Daouadji, A. (2020). Linear-frictional contact model for 3D discrete element (DEM) simulations of granular systems. *arXiv*, arXiv:2002.10231.
- [42] Itasca Consulting Group, Inc. (2023). *PFC2D Documentation — Contact Models — Linear Model* [User manual]. Itasca.
- [43] Potyondy, D. O., & Cundall, P. A. (2004). A bonded-particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, *41*(8), 1329–1364. (DOI: 10.1016/j.ijrmms.2004.09.011)
- [44] Itasca Consulting Group, Inc. (2019). *PFC — Particle Flow Code, Ver. 7.0* [Computer software]. Itasca. (Parallel Bond Model section).
- [45] Cho, N., Martin, C. D., & Sego, D. C. (2007). A clumped particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, *44*(7), 997–1010. (DOI: 10.1016/j.ijrmms.2007.02.002)
- [46] Potyondy, D. O. (2015). The bonded-particle model as a tool for rock mechanics research and application: Current trends and future directions. *Proceedings of the 49th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, San Francisco, CA.
- [47] Ergun, S. (1952). Fluid flow through packed columns. *Chemical Engineering Progress*, *48*(2), 89–94.
- [48] Sanei, M., Durán, O., Devloo, P. R. B., & Santos, E. S. R. (2022). Evaluation of the impact of strain-dependent permeability on reservoir productivity using iterative coupled reservoir geomechanical modeling. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, *54*(2). (DOI: 10.1007/s40948-022-00390-2)