



مقاله پژوهشی

پیش بینی نواحی موثر در تولید ماسه و تعیین افت فشار بحرانی با استفاده از مدل ژئومکانیکی تک بعدی در سازند آسماری

یوسف سمیعی^۱؛ محمد کاظم امیری^۲؛ میثم محمدزاده شیرازی^۲؛ بهنام شاهشونی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهره برداری نفت، دانشگاه شیراز

۲- استادیار، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۱۷ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۲۳

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/ggj.2025.521448.1251

واژگان کلیدی	چکیده
تولید ماسه، مدل ژئومکانیکی تک بعدی، افت فشار بحرانی، آنالیز حساسیت، نرم افزار تکلاگ (Techlog)	تولید ماسه یکی از چالش‌های اساسی در صنعت نفت و گاز است. این مشکل زمانی رخ می‌دهد که ماسه همراه با نفت و آب تولید شود و علاوه بر آسیب به تجهیزات، منجر به کاهش بهره‌وری چاه‌ها می‌شود. برای کاهش تولید ماسه، ساخت مدل و تحلیل ژئومکانیکی سازند ضروری است. این پژوهش با تمرکز بر سازند آسماری و استفاده از مدل یک بعدی ژئومکانیکی کالیبره شده با داده‌های آزمایشگاهی واقعی، دیدگاه جدیدی برای پیش‌بینی دقیق‌تر تولید ماسه در مخازن مشابه ارائه می‌دهد. برای تعیین دقیق پارامترهای ژئومکانیکی سنگ، از نرم‌افزار Techlog همراه با داده‌های لاگ چاه و مغزه استفاده شده است. پس از اعتبارسنجی مدل ژئومکانیکی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، از روش پروالاستیک برای پیش‌بینی نواحی محتمل، محاسبه افت فشار بحرانی و پیش‌بینی شرایط شروع تولید ماسه استفاده شده است. سپس، اثر انواع تکمیل چاه بر مقدار افت فشار بحرانی بررسی شد. نتایج این مطالعه نشان داد که چاه مد نظر در عمق ۲۳۵۷ متر، احتمال بالایی برای تولید ماسه دارد، چرا که افت فشار بحرانی مقدار منفی را نشان می‌دهد که حاکی از پتانسیل بالای شکست سنگ در این عمق است. همچنین، آنالیز حساسیت با در نظر گرفتن مقاومت فشاری تک‌محوری، اندازه دانه ماسه، قطر چاه، زاویه آزیموت و انحراف چاه و زاویه و قطر حفره مشبک انجام شد. در این مطالعه، تمرکز بر آنالیز حساسیت ژئومکانیکی بوده است و تأثیر پارامترهای هیدرومکانیکی سیال در فرایند مدل‌سازی لحاظ نشده است. شناسایی محدوده‌های با خطر بالا برای طراحی بهینه تکمیل چاه بر اساس هم‌پوشانی داده‌های ژئومکانیکی و پیش‌بینی افت فشار بحرانی در چاه مورد مطالعه انجام شد. همچنین رفتار تولید ماسه در حالت‌های عمودی، انحرافی و افقی در دو حالت مشبک کاری و حفره باز، تحلیل و با یکدیگر مقایسه گردید تا تأثیر نوع چاه بر پایداری سازند و میزان ریسک ماسه‌زایی به صورت جامع ارزیابی شود.

۱. پیش‌گفتار

چاه رخ دهد [۱،۲]. تولید ماسه زمانی رخ می‌دهد که دانه‌های ماسه‌ای که استحکام خود را از دست داده‌اند، همراه با سیال مخزن به سمت چاه منتقل می‌شوند [۳]. فرایند تولید ماسه، از مخزن تا سطح، یک فرایند پیچیده است که در سه مرحله رخ می‌دهد که شامل، تخریب سازند اطراف مشبک یا چاهی که تکمیل آن به صورت حفره باز باشد منجر به از دست رفتن یکپارچگی ژئومکانیکی سازند می‌شود. همچنین ذرات ماسه در اثر نیروی کشش هیدرودینامیکی ناشی از جریان سیال از

مخازن ماسه‌سنگی یکی از مهم‌ترین انواع مخازن هیدروکربنی در صنعت نفت و گاز به شمار می‌روند که درصد قابل توجهی از ذخایر جهانی را در خود جای داده‌اند. با این حال، یکی از چالش‌های اساسی در بهره‌برداری از این مخازن، تولید ماسه است که می‌تواند مشکلات متعددی را در مراحل مختلف تولید ایجاد کند. بیش از ۷۰ درصد از ذخایر نفت و گاز جهان در سازندهای تحکیم‌نیافته قرار دارند که احتمال تولید ماسه در آن‌ها بسیار بالا است و این مشکل می‌تواند در طول عمر

سنگ‌های ماسه‌ای جدا شده و در نهایت همراه با سیال تولیدی به سطح منتقل می‌شوند [۴]. پیش‌بینی تولید ماسه می‌تواند به شناسایی اقتصادی‌ترین روش‌های کنترل ماسه با نرخ تولید مطلوب کمک کند. برای تحلیل تولید ماسه، هندسه چاه، ویژگی‌های مخزن، کاهش فشار متوسط مخزن^۱ و افت فشار^۲ مورد بررسی قرار می‌گیرند و توجه ویژه‌ای بر توزیع تنش‌ها و شکست دانه‌های ماسه در اطراف مشبک و دیواره چاه قرار گرفته است. همچنین فشار جریان بحرانی در ته چاه^۳ و افت فشار بحرانی^۴ ارائه شده‌اند تا بتوان نرخ تولید را بهینه کرد و تولید ماسه را کاهش داد. تولید ماسه یک پدیده نامطلوب است که می‌تواند مشکلات متعددی را در عملیات تولید ایجاد کند، از جمله بی‌ثباتی دیواره چاه، سایش تجهیزات تولیدی، گرفتگی تجهیزات سطحی، کاهش بهره‌وری چاه و افزایش خطرات عملیاتی. به دلیل این اثرات منفی، کنترل تولید ماسه در مخازن ماسه‌سنگی اهمیت زیادی دارد. روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی و کنترل ماسه‌زایی مورد استفاده قرار می‌گیرند که شامل مدل‌سازی ژئومکانیکی، محاسبه افت فشار بحرانی و انتخاب روش‌های مناسب تکمیل چاه مانند تکمیل با مشبک کاری و سیستم‌های کنترل کننده ماسه است [۵].

۲. پیشینه مطالعات

مدل‌سازی ژئومکانیکی بخش مهمی از تحلیل مخازن نفت و گاز محسوب می‌شود که در مدیریت تنش‌ها و فشارهای اطراف چاه و بهینه‌سازی تولید نقش اساسی دارد. با استفاده از این مدل، می‌توان مناطق مستعد تولید ماسه را شناسایی کرده و ویژگی‌های مکانیکی سنگ، تنش‌های برجا و فشار منفذی را به‌طور دقیق ارزیابی کرد. این فرایند با ترکیب داده‌های متنوع، امکان پیش‌بینی رفتار مخزن و چاه را تحت شرایط مختلف تنش و فشار فراهم می‌سازد و به بهبود عملکرد مخزن کمک می‌کند [۶]. مدل‌سازی ژئومکانیکی با یکپارچه‌سازی داده‌های مختلف، نقش مهمی در کاهش عدم قطعیت‌های محاسباتی دارد و امکان شناسایی محدوده تولید ماسه را فراهم می‌کند. علاوه بر این، این مدل‌سازی دیدگاه عمیق‌تری نسبت به شرایط تنش مخزن و واکنش سنگ به تغییرات فشار و تنش ارائه می‌دهد که برای مدیریت ایمن و بهینه مخازن ضروری

است. هدف اصلی از این فرایند، ارائه توصیفی جامع از شرایط ژئومکانیکی منطقه مورد نظر است که شامل تحلیل تنش‌های برجا مانند تنش عمودی، تنش افقی کمینه و بیشینه، فشار منفذی و ویژگی‌های الاستیک سنگ از جمله مدول یانگ، ضریب پواسون، مقاومت فشاری تک‌محوره، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی سنگ می‌شود [۷]. نظری و ریاحی [۸] نشان دادند که مدل‌سازی ژئومکانیکی نقش کلیدی در پیش‌بینی پارامترهای الاستیک مانند مقاومت فشاری تک‌محوره، مدول یانگ و ضریب پواسون در چاه‌ها و حجم مخزن دارد. این مدل با بهره‌گیری از داده‌های چاه و روابط تجربی، پارامترهای الاستیکی را در قالب پنج واحد ژئومکانیکی دسته‌بندی کرده و یک مدل سه‌بعدی دقیق از ویژگی‌های ژئومکانیکی مخزن ارائه می‌دهد. کیو و همکاران [۹] به بررسی شبیه‌سازی ژئومکانیکی میدان مرزوق لیبی در مورد مشکلات ناپایداری حفر چاه افقی پرداختند. با تجزیه و تحلیل داده‌ها، بررسی مدل‌های پایداری چاه و شبیه‌سازی، علت ناپایداری چاه شناسایی و طراحی چاه، بهینه‌سازی شد. رمضان‌زاده و تخم‌چی [۱۰] با توسعه یک مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی برای مخزن مورد مطالعه، به ارزیابی وضعیت تنش در مخزن مورد مطالعه پرداختند. این مدل با استفاده از معیارهای شکست سنگ، وزن ایمن گل حفاری را برآورد می‌کند. تخم‌چی [۱۱] یک مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی برای یکی از مخازن نفتی ناحیه دزفول توسعه داد که با هدف تخمین تنش فشاری تک‌محور طراحی شده است. این مدل به بهبود دقت تحلیل داده‌ها و کاهش عدم قطعیت کمک می‌کند. اوسیسانیا و همکاران [۱۲] به ارائه راهکارهای عملی برای پیش‌بینی و مدیریت تولید ماسه در مخازن نفتی پرداختند. در این مطالعه، سه نوع تولید ماسه شامل گذرا، پیوسته و فاجعه‌بار تعریف شده است. تولید ماسه گذرا به حالتی اشاره دارد که میزان تولید ماسه به مرور زمان کاهش می‌یابد. تولید ماسه پیوسته زمانی رخ می‌دهد که مقدار ثابتی ماسه در جریان تولید باقی می‌ماند، درحالی‌که تولید ماسه فاجعه‌بار به ورود ناگهانی حجم زیادی ماسه اشاره دارد که می‌تواند باعث خفگی یا توقف تولید چاه شود. در این مطالعه، دو روش اصلی کنترل ماسه بررسی شده است که شامل روش مکانیکی و

³ Critical Bottomhole Flowing Pressure

⁴ Critical Drawdown Pressure

¹ Depletion

² Drawdown

روش شیمیایی است که روش مکانیکی مانند استفاده از گراول پک^۵ و لوله های آستری شیاردار^۶ برای جلوگیری از ورود ماسه به چاه است و روش شیمیایی که شامل تثبیت ماسه از طریق تحکیم شیمیایی به منظور افزایش استحکام سازند می شود و همچنین به عواملی که در انتخاب بهترین روش کنترل ماسه تأثیرگذارند، اشاره می کند. این عوامل شامل اندازه ذرات ماسه (ریز یا درشت)، تراوایی مخزن و میزان تغییرات آن، مدت زمان تولید و بهره برداری از مخزن، زاویه انحراف چاه و اثر آن بر تولید ماسه، و دسترسی به دکل تعمیراتی برای اجرای عملیات کنترل ماسه هستند. در نتیجه، این پژوهش می تواند در طراحی روش های بهینه کنترل ماسه برای مخازن مختلف استفاده شود و به کاهش مشکلات عملیاتی مرتبط با تولید ماسه کمک کند.

بردفور و همکاران یک روش جدید برای ارزیابی ریسک تولید ماسه در مخازن دریای شمال ارائه کردند که دقت بالایی در پیش بینی رفتار ماسه دهی دارد. در این مطالعه، از مدل الاستیک-پلاستیک کامل استفاده شد که امکان بررسی شکست سازند و تعیین نواحی مستعد ماسه دهی را فراهم می کند. یکی از نکات مهم این تحقیق، تأکید بر اهمیت مدل سازی الاستوپلاستیک^۷ در ارزیابی تولید ماسه و تأثیر آن بر پایداری چاه است. نتایج نشان دادند که استفاده از این مدل می تواند به بهینه سازی استراتژی های تولید و کاهش ریسک شکست دیواره چاه کمک کند [۱۸].

یو و همکاران [۱۳] به بررسی پیش بینی تولید ماسه در توسعه چندین میدان گازی پرداخته و از دو رویکرد تجربی و عددی استفاده کردند. رویکرد تجربی مبتنی بر داده های میدانی و آزمایشگاهی است که مدل ساده و سریع است ولی به شرایط خاص میدان وابسته است و برای تمام مخازن قابل تعمیم نیست ولی رویکرد عددی بر اساس مدل سه بعدی توسعه یافته است که قادر به شبیه سازی دقیق فرایندهای پتروفیزیکی است که منجر به پیش بینی تولید ماسه میشود و در نتیجه توانستند که نمودار $CDDP^A$ در برابر عمق را برای شناسایی مناطق ایمن از نظر تولید ماسه و نمودار $CDDP$ در برابر فشار مخزن در جهت طراحی سناریوهای بهینه تولید ارائه شده است. برای بررسی دقیق تر تولید ماسه و پایداری سازند، دایره

موهر به عنوان یکی از ابزارهای اصلی تحلیل تنش مورد استفاده قرار می گیرد، که امکان ارزیابی شرایط تنش را فراهم کرده و به درک بهتر رفتار سنگ مخزن تحت نیروهای مختلف کمک می کند. در مطالعه سبیه و همکاران [۱۴] از این مفهوم برای تعیین مرزهای شکست و بررسی پایداری مکانیکی سنگ در شرایط عملیاتی مختلف استفاده شده است. این تحلیل نشان داد که ترکیب دایره موهر با معیارهای شکست سنگ می تواند پیش بینی دقیقی از تولید ماسه ارائه دهد و به بهینه سازی طراحی تکمیل چاه کمک کند. همچنین براتلی و رینسنس [۱۵] پایداری و مکانیزم شکست قوس های ماسه ای را در پشت ناحیه های مشبک شده در مخازن ماسه ای غیرمتراکم مطالعه کردند. آن ها با بهره گیری از یک مدل تئوری، تنش های وارد بر ماسه را تحلیل کرده و اثر جریان سیالات را بر پایداری این قوس ها بررسی نمودند. نتایج پژوهش آن ها به درک بهتر شرایطی کمک می کند که در آن قوس های ماسه ای دچار ناپایداری شده و احتمال تولید ماسه افزایش می یابد. همچنین معیارهایی برای توصیف شرایط پایداری و شکست ماسه ارائه کردند. مدل تحلیلی شامل روش الاستیک منفذی و معیار ماسه زایی با شکست برشی، و همچنین روش الاستوپلاستیک منفذی و معیار ماسه زایی با شکست کششی است. این مدل ها برای هر دو شرایط تنش همسانگرد و ناهمسانگرد ارائه شده اند و شکست القایی در دیواره و حفره را در بر می گیرند که نتایج این مدل نشان می دهد که در نظر گرفتن تنش های تکتونیکی افقی و سایر پارامترهای ژئومکانیکی، علاوه بر تنش روباره، برای پیش بینی دقیق تر شروع تولید ماسه ضروری است. این مدل با در نظر گرفتن شرایط واقعی تر مخزن، امکان طراحی بهینه تر عملیات حفاری و تکمیل چاه را فراهم می کند [۱۶].

پاپامیچوس و فوری [۱۷] به توسعه سه معیار شکست تحلیلی برای ارزیابی شکست دیواره چاه و آغاز ماسه دهی پرداختند. این مدل ها با در نظر گرفتن ناهمسانگردی های تنش و شرایط تولیدی مختلف، به تحلیل شروع تولید ماسه و برآورد حجم آن می پردازند. در این مطالعه، معادلاتی برای مقاومت بحرانی سازند، تخلیه بحرانی و $CDDP$ استخراج شدند که به پیش بینی دقیق تر شروع ماسه دهی کمک

⁵ Gravel Pack

⁶ Slotted liner

⁷ Elastoplastic Modeling

⁸ Critical Drawdown Pressure

می‌کنند. نتایج نشان دادند که نمودارهای شکست ماسه در مواجهه با ناهمسانگردی‌های تنش و شرایط تولیدی متنوع، تطابق قابل قبولی با داده‌های میدانی دارند. همچنین، اثر دیواره چاه بر تنش‌های حفره‌ای با مقایسه نتایج روش‌های تحلیلی و عددی مورد بررسی قرار گرفت.

شیخ الاسلام و همکاران [۱۹] مشکل تولید ماسه را در لایه‌های سازند آسماری میدان اهواز، از دیدگاه ژئومکانیکی مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور، از نرم‌افزار تکلاگ جهت ارزیابی داده‌های مخزنی و ساخت مدل ژئومکانیکی تک‌بعدی استفاده کردند. در تحلیل‌ها، معیار شکست موهر-کلمب با در نظر گرفتن تأثیر مقیاس بر حفره‌های مشبک‌ها و شرایط تنش غیرهیدرواستاتیک لحاظ شد. پس از مدل‌سازی، نمودار افت فشار بحرانی برای چاه در دو حالت حفره باز و مشبک‌کاری شده ترسیم و مناطق مستعد تولید ماسه شناسایی شدند. نتایج نشان داد که سازند ماسه سنگی به دلیل ویژگی‌هایی مانند سستی، تخلخل و تراوایی بالا، بیشترین پتانسیل تولید ماسه را دارند. می‌توان با بررسی و استفاده از مدل‌های ژئومکانیکی، تولید ماسه را تحلیل و مدیریت کرد تا ریسک ماسه‌دهی در مخازن غیرمتراکم را کاهش داد. مصطفی ادیل و همکاران [۲] با ارائه نمودار فشار تخلیه بحرانی در برابر عمق، امکان تعیین بازه‌های عاری از تولید ماسه را فراهم کردند. همچنین، نمودار فشار تخلیه بحرانی در برابر فشار مخزن برای طراحی برنامه‌های تولیدی مختلف به منظور جلوگیری از تولید ماسه در این نوع مخازن ارائه شده است که سپس به بهینه‌سازی نوع تکمیل چاه و کاهش ریسک ماسه‌دهی در مخازن غیرمتراکم کمک می‌کند.

در این پژوهش، با استفاده از نرم‌افزار تکلاگ ابتدا یک مدل ژئومکانیکی تک‌بعدی برای یکی از میدانی جنوب غربی بر اساس محاسبه پارامترهای تنش، فشار منفذی، ویژگی‌های الاستیک سنگ و مقاومت آن ساخته شد و سپس با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و لاگ‌های موجود در سازند توسعه داده شد. همچنین، این مدل با بهره‌گیری از داده‌های آزمایشگاهی و میدانی مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. سپس با استفاده از نرم‌افزار تکلاگ به بررسی و پیش‌بینی نواحی مستعد تولید ماسه بر حسب عمق پرداخته شد. در ادامه، شرایط تولید ماسه در عمق ۲۳۵۷ متری که برابر با عمق مشبک‌کاری چاه است، در دو سناریوی مختلف تکمیل چاه به

صورت حفره باز و در حالت مشبک‌کاری مورد بررسی قرار گرفتند. پس از این مرحله، آنالیز حساسیت با در نظر گرفتن پارامترهای کلیدی انجام شد. این تحلیل شامل بررسی اثر بازه‌های مختلف مقاومت فشاری تک‌محوری، اندازه دانه ماسه، زاویه و قطر مشبک کاری، زاویه آزیموت و انحراف چاه بر پایداری سازند و احتمال تولید ماسه بود.

۳. میدان مورد مطالعه

میدان نفتی مورد بررسی در جنوب غربی ایران قرار دارد. در این منطقه، سازندهای ماسه‌سنگی نقش مهمی در ذخیره و تولید نفت ایفا می‌کنند. این سازندها معمولاً به صورت لایه‌ای در مخزن توزیع شده‌اند و به دلیل داشتن تخلخل و تراوایی بالا، شرایط ایده‌آلی برای نگهداری و انتقال هیدروکربن‌ها فراهم می‌کنند. ماسه‌سنگ‌ها از ترکیب دانه‌های ریز و درشت کوارتز تشکیل شده‌اند. یکی از چالش‌های اساسی در بهره‌برداری از این سازندها، مشکل تولید ماسه همراه با جریان نفت است [۲۰].

میدان مورد مطالعه در زون زاگرس چین خورده و در محدوده سازند آسماری واقع شده است. سنگ‌شناسی غالب این مخزن شامل ماسه‌سنگ‌های آواری همراه با درصدی از کانی‌های کربناته (کلسیت و دولومیت) و کوارتز است. ویژگی‌های رسوبی بیانگر نهشته شدن رسوبات در محیط دریای کم‌عمق و حاشیه دلتایی است که سبب ایجاد تناوبی از لایه‌های ماسه‌سنگ و شیل شده‌اند. این شرایط رسوبی در کنار تغییرات دیاژنزی بعدی، عامل اصلی کاهش سیمانی‌شدن برخی لایه‌ها و افزایش استعداد ماسه‌زایی در آن‌ها محسوب می‌شوند. از دیدگاه ژئومکانیکی، رژیم تنش حاکم بر منطقه تقریباً نرمال بوده، همچنین هرگونه کاهش مقاومت مکانیکی سازند در اثر افزایش فشار منفذی یا تولید می‌تواند منجر به شکست دانه‌های ماسه و حرکت ذرات ریز ماسه در اطراف چاه شود [۴۲]. داده‌های میدانی نیز وقوع ماسه‌زایی در تعدادی از چاه‌های تولیدی را تأیید می‌کنند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب کانی‌شناسی ماسه‌سنگی، محیط رسوبی خاص و شرایط تنش نرمال، عوامل کلیدی در بروز ماسه‌زایی در سازند آسماری و میدان مورد مطالعه- به شمار می‌روند [۱۹].

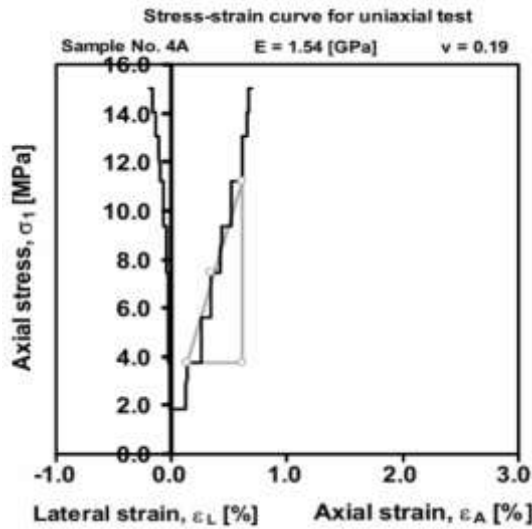
۱.۳. ویژگی‌های لایه ماسه‌سنگی

لایه ماسه‌سنگی مورد مطالعه، که بخشی از سازند آسماری

یش بینی نواحی موثر در تولید ماسه و تعیین افت فشار بحرانی با استفاده از مدل ژئومکانیکی تک بعدی در سازند آسماری

نشریه ژئومکانیک و ژئوانرژی؛ دوره ۸؛ شماره ۲؛ تابستان ۱۴۰۴

برابر تنش‌ها و تغییر شکل‌های احتمالی ایفا می‌کنند.



شکل ۱. تحلیل رفتار تنش- کرنش و محاسبه مدول مماسی

همچنین، جهت حفظ دقت در تحلیل نتایج و استاندارد سازی داده‌ها، طول و قطر نمونه‌ها نیز در جدول ۲ ارائه شده است. در شکل ۱ منحنی تنش-کرنش برای یکی از آزمایش‌های انجام شده، نشان داده شده است. محور عمودی نمایانگر تنش (σ) و محور افقی نمایانگر کرنش محوری (ϵ_A) و کرنش جانبی (ϵ_L) است. در این نمودار، حداکثر مقاومت به بالاترین مقدار تنش اشاره دارد که ماده می‌تواند تحمل کند. نتایج آزمایشات در شکل ۱ نشان می‌دهند که منحنی تنش-کرنش ماده به‌طور غیرخطی رفتار می‌کند. برای محاسبه مدول مماسی (E_t)، شیب بخش خطی منحنی در نقطه‌ای که تنش به ۵۰ درصد از حداکثر مقاومت رسیده است، محاسبه می‌شود. این نقطه مشخص می‌کند که در این شرایط، ماده همچنان در ناحیه الاستیک است، یعنی تغییر شکل‌ها برگشت پذیرند. در این تصویر، تغییرات در تنش ($\Delta\sigma$) و کرنش محوری در این نقطه به وضوح نمایش داده شده است [۲۲]. در تست‌های آزمایشگاهی انجام شده مقاومت و چسبندگی سنگ بر اساس لیتولوژی سازند تعیین می‌شود. مقاومت بالای برخی نمونه‌ها را می‌توان به میزان پیوند بین‌دانه‌ای و نوع کانی‌های سازنده نسبت داد، به‌طوری‌که حضور کانی‌هایی مانند کلسیت، دولومیت و حتی بخشی از ایلیت با ایجاد پیوندهای محکم بین دانه‌ها و کاهش سطح شکست، موجب افزایش استحکام و چسبندگی سنگ می‌شود.

محسوب می‌شود، به دوره الیگومیوسن تعلق دارد و یکی از مهم‌ترین سنگ‌های مخزنی در ناحیه نفت‌خیز جنوب غرب ایران به شمار می‌آید. این واحد زمین‌شناسی عمدتاً از ماسه‌سنگ تشکیل شده است و ترکیبات کربناته مانند آهک و دولومیت نیز در آن حضور دارند، که تأثیر بسزایی بر کیفیت مخزنی آن دارند. مطالعات انجام شده نشان می‌دهند که فرایندهای دیاژنزی، از قبیل فشردگی، سیمانی شدن و انحلال، تغییرات قابل توجهی در خصوصیات مخزنی این ماسه‌سنگ‌ها ایجاد کرده‌اند [۲۱].

۲.۳. آزمایش‌های مکانیک سنگ در سازند آسماری

در چاه مورد مطالعه چندین آزمایش مکانیک سنگ شامل مدول الاستیسیته بدون محدودیت، نسبت پواسون، و مقاومت فشاری سه‌محوری همراه با مدول الاستیسیته انجام شده است.

جدول ۱. نتایج آزمایش مدول الاستیسیته بدون محدودیت و نسبت پواسون

Sample	Depth (m)	σ_c (MPa)	E (GPa)	ν	L (mm)	D (mm)
4A	2214.1	15.04	1.54	0.19	77.345	36.93
5B	2241.6	15.99	2.48	0.14	77.425	36.99
6C	2246.2	3.76	2.53	0.34	75.42	36.82
7E	2261.5	76.05	14.65	0.05	81.585	37.195
8D	2284.2	34.44	6.52	0.10	79.985	37.27
9B	2304.5	24.8	2.00	0.18	81.57	37.125
1C	2180.8	34.3	5.40	0.14	78.575	37.32
2C	2183.6	34.61	6.09	0.09	79.045	37.175
3D	2187.8	20.8	2.78	0.05	75.255	37.12

این آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه *Uniaxial Stiff Machine* ساخت شرکت *Heico* با ظرفیت ۱۰۰۰ کیلونیوتن انجام شده است. نتایج حاصل از مدول الاستیسیته، مقاومت فشاری، و نسبت پواسون در جدول ۱ و ۲ ارائه شده است. برای ارزیابی خصوصیات مکانیکی و رفتار ژئومکانیکی سنگ، جدول ۲ نتایج آزمایش‌های مکانیک سنگ را که بر روی نمونه‌های مغزه‌ای از اعماق مختلف انجام شده است، نمایش می‌دهد. پارامترهایی نظیر مدول یانگ، ضریب پواسون، چسبندگی، زاویه اصطکاک، حداکثر تنش جانبی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این داده‌ها نقش مهمی در مدل‌سازی شرایط واقعی مخزن و پیش‌بینی واکنش سنگ در

جدول ۲. نتایج آزمایشات مقاومت فشاری سه محوره به اضافه تعیین مدول الاستیسیته

Sample	Depth (m)	σ_3 [MPa]	σ_1 [MPa]	C [MPa]	Φ [Degree]	H-B* Constant (m)	E [GPa]	ν [-]	Length (L) [mm]	Diameter (D) [mm]
8A	2284.09	10	76.42	2	47.63	50	6.87	0.09	76.86	37.41
8B	2284.13	15	110.99	2	47.63	50	7.18	0.088	77.19	37.41
8C	2284.20	20	142.99	2	47.63	50	14.02	0.07	79.98	37.27
7B	2261.39	10	133.68	20.72	39.92	13.78	13.62	0.05	80.35	37.27
7A	2261.33	15	156.41	20.72	39.92	13.78	14.37	0.04	75.94	37.27
7C	2261.44	20	179.08	20.72	39.92	13.78	16.57	0.04	80.46	37.27
6B	2246.15	0.5	6.57	1.29	36.53	50	0.39	0.04	76.53	36.84
6A	2246.07	2.5	15.90	1.29	36.53	50	1.1	0.35	76.49	36.9
6D	2246.27	5	24.41	1.29	36.53	50	1.40	0.35	77.98	36.83
5A	2241.55	5	22.3	2.29	29.58	50	3.79	0.13	77.31	36.99
5C	2241.69	10	38.9	2.29	29.58	50	5.42	0.12	75.67	37.09
5D	2241.77	15	51.83	2.29	29.58	50	4.56	0.12	76.3	37.09

گردآوری و یکپارچه سازی داده‌ها، انجام ارزیابی کیفی و کمی، و آماده سازی اطلاعات برای تجزیه و تحلیل دقیق، ضروری است.

۲- توسعه یک مدل مکانیک زمین که به طور خاص برای چاه هدف طراحی شده است و اعتبارسنجی آن با استفاده از داده‌های به دست آمده از آزمایش‌های مکانیکی مغزه و ویژگی‌های الاستیک و تنش‌های موجود در میدان.

۳- محاسبه فشار افت بحرانی در طول چاه برای سناریوهای مختلف کاهش فشار، به منظور شناسایی نقاط ضعیف و تعیین بهینه‌ترین بازه‌های مشبک کاری. این فرایند یک پروفایل در طول عمق از $CDDP$ ارائه می‌دهد که برای تخمین شکست سنگ مخزن بسیار حیاتی است. علاوه بر این، ارزیابی دقیقی از تأثیر کاهش فشار مخزن در طول عمر میدان نیز در اختیار می‌گذارد.

۴- انجام آنالیز حساسیت در فواصل انتخاب شده، به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر $CDDP$ ، از جمله قطر دانه‌های ماسه، انحراف و زاویه چاه، قطر و جهت‌گیری سوراخ‌های مشبک کاری، و مقاومت فشاری تک‌محوری. سپس بررسی سناریوهای مختلف برای تعیین مناسب‌ترین روش تکمیل چاه به منظور کاهش یا کنترل تولید ماسه انجام می‌شود.



شکل ۲. فرایند پیش‌بینی و تحلیل تولید ماسه

۴. تخمین پارامترهای مدل ژئومکانیکی سنگ و

ساخت مدل تک‌بعدی برای مدیریت ماسه

فرایند ساخت مدل ماسه شامل مراحل زیر است:

۱- به منظور اطمینان از دقت و صحت داده‌های ورودی،

یش بینی نواحی موثر در تولید ماسه و تعیین افت فشار بحرانی با استفاده از مدل ژئومکانیکی تک بعدی در سازند آسماری

نشریه ژئومکانیک و ژئوانرژی؛ دوره ۸؛ شماره ۲؛ تابستان ۱۴۰۴

موج رخ می‌دهد که این ویژگی باعث ایجاد تغییر شکل در محیط انتشار بدون تغییر حجم آن می‌شود که V_S برابر سرعت موج برشی در معادله زیر است:

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (۴)$$

فرایند ساخت مدل ژئومکانیکی با بهره‌گیری از امواج برشی و فشاری آغاز می‌شود. از آنجا که لاگ صوتی (سونیک) در چاه مورد مطالعه موجود است، امواج برشی و فشاری باید بر مبنای این داده‌ها استخراج و محاسبه شوند. این داده‌ها نقش اساسی در توسعه یک مدل ژئومکانیکی دقیق و قابل اعتماد ایفا می‌کنند. برای محاسبه امواج برشی و فشاری، داشتن لاگ صوتی DT_C ضروری است. سرعت موج فشاری را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$V_p = \frac{1}{DT_C} \quad (۵)$$

DT_C زمان گذر موج فشاری است.

۲.۴. پارامترهای مکانیکی سنگ

پارامترهای مکانیکی سنگ به دو دسته تقسیم می‌شوند: پارامترهای الاستیک سنگ و پارامترهای مقاومتی سنگ که در ادامه توضیح خواهیم داد [۲۵]:

۱.۲.۴. پارامترهای الاستیک سنگ

با پارامترهایی مانند مدول برشی، مدول حجمی، مدول یانگ و نسبت پواسون، رفتار سنگ در شکست تحت تنش را میتوان بیان کرد. برای محاسبه پارامترهای الاستیک استاتیک، از آزمایش‌های آزمایشگاهی (تک‌محوری یا سه محوری) و داده‌های تنش- کرنش طبق شکل ۱ استفاده می‌شود. به‌عنوان یک روش متعارف آزمایشگاهی، این آزمایش‌ها بر روی مغزه‌های حفاری در مقیاس مغزه انجام می‌شود تا پارامترهای الاستیک سنگ محاسبه گردد [۲۵].

برای تعیین مدول یانگ استاتیک و نسبت پواسون، از لاگ چگالی به همراه داده‌های مربوط به لاگ امواج فشاری و برشی استفاده می‌شود که در ادامه بر اساس معادلات ۷ و ۸ محاسبه می‌گردند.

$$E = \rho \cdot V_S^2 \frac{3V_p^2 - 4V_S^2}{V_p^2 - V_S^2} \quad (۷)$$

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_S^2}{2(V_p^2 - V_S^2)} \quad (۸)$$

E مدول یانگ و ν نسبت پواسون، دو ویژگی الاستیکی سنگ هستند. مدول یانگ، که با E نشان داده می‌شود، میزان سختی سنگ را در برابر تغییر شکل الاستیک تحت تنش

میتوان ۴ مرحله فوق را در شکل ۲ مشاهده کرد که این مراحل به‌صورت گام‌به‌گام فرایند ارزیابی و کنترل ریسک تولید ماسه را فراهم می‌کنند.

۱.۴. امواج صوتی

امواج صوتی در لاگ‌های چاه و ژئومکانیک مخزن نقش کلیدی در ارزیابی ویژگی‌های الاستیک و مکانیکی سنگ‌ها ایفا می‌کنند. این امواج اطلاعات ارزشمندی درباره رفتار دینامیکی سنگ‌ها فراهم می‌کنند که در مدل‌سازی‌های ژئومکانیکی و تحلیل‌های مهندسی مخزن کاربرد دارند. با انتشار درون حجم ماده، این امواج به مطالعه ساختارهای داخلی زمین و بررسی خصوصیات سنگ‌ها کمک شایانی می‌کنند [۲۳].

امواج درونی صوتی به دو دسته تقسیم بندی می‌شوند:

۱.۱.۴. امواج فشاری

این امواج با ایجاد نوسانات متناوب تراکم و انبساط در محیط، در راستای جهت انتشار حرکت می‌کنند. ویژگی برجسته آن‌ها توانایی عبور از محیط‌های جامد، مایع و گاز است، که آن‌ها را از امواج برشی متمایز می‌سازد.

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} \quad (۱)$$

سرعت امواج فشاری (V_p) تحت تأثیر مدول حجمی (K)، مدول برشی (G) و چگالی (ρ) قرار دارد و مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$K = \frac{P}{\frac{\Delta V}{V}} \quad (۲)$$

$$G = \frac{\tau}{\tan \theta} \quad (۳)$$

که در این رابطه P همان تنش حجمی و $\frac{\Delta V}{V}$ کرنش حجمی، که تغییر نسبی حجم ماده است. همچنین τ تنش برشی و $\tan \theta$ کرنش برشی است. این رابطه نشان می‌دهد که مدول حجمی بیانگر مقاومت یک ماده در برابر تغییر حجم تحت تأثیر فشار است. در این معادله، مدول حجمی بیانگر مقاومت ماده در برابر تغییر حجم تحت فشار یکنواخت از تمامی جهات است، درحالی‌که مدول برشی میزان مقاومت ماده در برابر تغییر شکل زاویه‌ای را مشخص می‌کند [۲۴].

۲.۱.۴. امواج برشی

این امواج ناشی از تنش‌های برشی هستند و باعث حرکت ذرات در مسیری عمود بر جهت انتشار موج می‌شوند و جابه‌جایی ذرات در این امواج به‌صورت متقاطع با مسیر حرکت

لاگ‌های چگالی، صوتی و همچنین خواص مخزن مانند تنش عمودی، ضریب پواسون، و فشار منفذی، پروفایل تنش در مخزن تعیین می‌شود [۲۵].

معادلات ۱۲ و ۱۳ به ترتیب کرنش تکتونیکی در جهت‌های x و y می‌باشند که به درک بهتر تغییر شکل و رفتار سازند تحت تأثیر نیروهای تکتونیکی کمک می‌نمایند. همچنین، با استفاده از معادله ۱۴ می‌توان ضریب تنش مؤثر را محاسبه کرد.

$$\epsilon_x = \frac{S_v \times v}{E} \left(\frac{1}{1-v} - 1 \right) \quad (12)$$

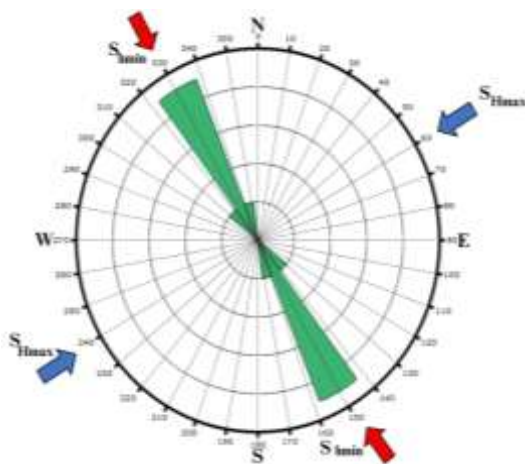
$$\epsilon_y = \frac{S_v \times v}{E} \left(1 - \frac{v^2}{1-v} \right) \quad (13)$$

$$\alpha = 1 - \frac{K_b}{k_g} \quad (14)$$

K_b و k_g به ترتیب ضریب حجمی دانه و ضریب حجمی توده سنگ می‌باشد.

۳.۲.۴. تعیین فشار منفذی و فشار برجا

بر اساس نمودار گل سرخی^۹ ارائه شده، جهت تنش‌های بیشینه و کمینه افقی در سازند مورد مطالعه مشخص شده است. نتایج نشان می‌دهد که امتداد این شکست‌ها عمدتاً در راستای $N30W-S30E$ و $N65W-S65E$ قرار دارد که با امتداد عمومی چین‌خوردگی‌های زاگرس مطابقت دارد. همچنین در برخی بخش‌های سازند، روندی با امتداد شرقی-غربی مشاهده می‌شود که با جهت بیشینه تنش افقی منطقه هم‌راستا است. این هم‌خوانی نشان‌دهنده تأثیر مستقیم ساختارهای زمین‌ساختی و رژیم تنش منطقه‌ای بر جهت‌گیری شکست‌ها و درزه‌ها در این سازند می‌باشد.



شکل ۲- نمودار گل سرخی سازند مورد مطالعه

محوری مشخص می‌کند و بیانگر نسبت تنش محوری به کرنش محوری در ناحیه الاستیک ماده است. نسبت پواسون، که با ν نمایش داده می‌شود، میزان تغییر شکل جانبی را نسبت به تغییر شکل طولی در اثر اعمال تنش محوری نشان می‌دهد و یک کمیت بی‌بعد محسوب می‌شود.

۲.۲.۴. پارامترهای مقاومتی سنگ

پارامترهای مقاومتی سنگ شامل مقاومت فشاری تک‌محوری و حداکثر و حداقل تنش در سازند هستند. در مطالعات ژئومکانیکی، مقدار UCS بر اساس روابط تجربی که از تحقیقات گوناگون روی انواع سنگ‌ها در میداین مختلف استخراج شده‌اند، تخمین زده می‌شود، به ویژه در شرایطی که داده‌های آزمایشگاهی مقاومت سنگ در دسترس نباشد. سپس، ارتباط بین UCS و ویژگی‌های فیزیکی سنگ‌ها با استفاده از داده‌های لاگ‌های چاه مورد بررسی قرار گرفته است [۲۶]. معادله ۹، که از نتایج آزمایشگاهی در میدان مورد مطالعه به دست آمده است، برای تعیین مقدار UCS قابل استفاده است.

$$UCS = 2.2915E + 6.8467 \quad (9)$$

که در این معادله E مدول الاستیک استاتیک است. میتوان این معادله را برای محاسبه UCS در ماسه‌سنگ‌های سست به کار برد. تنش حداکثر و تنش حداقل دو مورد از سه مؤلفه اصلی تنش هستند که برای هر مطالعه ژئومکانیکی، به ویژه در تحلیل پایداری دیواره چاه و مدیریت تولید ماسه، اهمیت دارند. تخمین تنش‌های افقی یکی از مراحل کلیدی در مدل‌سازی ژئومکانیکی محسوب می‌شود و دقت نتایج این مدل را ارزیابی می‌کند [۲۵].

کمینه و بیشینه تنش افقی را می‌توان از طریق معادلات ۱۰ و ۱۱، با استفاده از روابط پوروالاستیک، محاسبه کرد.

$$S_{h \text{ MIN}} = \frac{\nu}{1-\nu} S_V - \frac{\nu}{1-\nu} \alpha P_p + \alpha P_p + 10^3 \frac{E}{1-\nu^2} \epsilon_x + 10^3 \frac{\nu E}{1-\nu^2} \epsilon_y \quad (10)$$

$$S_{h \text{ MAX}} = \frac{\nu}{1-\nu} S_V - \frac{\nu}{1-\nu} \alpha P_p + \alpha P_p + 10^3 \frac{\nu E}{1-\nu^2} \epsilon_x + 10^3 \frac{E}{1-\nu^2} \epsilon_y \quad (11)$$

که در این معادلات P_p فشار منفذی، S_V تنش برجا، α ضریب بایوت، E مدول الاستیک استاتیک و ϵ_x ، ϵ_y به ترتیب کرنش تکتونیکی در راستای x و y می‌باشند که با استفاده از

⁹ Rose Diagram

اختیار داشتن این مقادیر، تنش برشی τ_f را نیز می‌توان محاسبه کرد که در مطالعات ژئومکانیکی برای بررسی شکست و تغییر شکل سازند بسیار حائز اهمیت است [۲۷].

$$\tau_f = c + \sigma_f * \tan\theta \quad (19)$$

در معادله بالا τ_f تنش برشی، c ضریب چسبندگی، σ_f استرس نرمال و θ زاویه اصطکاک داخلی است که می‌توان پارامترهای بالا را برحسب داده های لاگ چاه مورد مطالعه به صورت زیر نوشت:

$$\theta = 1395 \left(\left(\frac{V_p}{1000} \right)^{1.0088} \right) \quad (20)$$

$$C = \frac{UCS}{\left(2 \tan \left(45 + \left(\frac{\theta}{2} \right) \right) \right)} \quad (21)$$

با بهره‌گیری از داده‌های لاگ سونیک و تحلیل سرعت موج‌های فشاری و برشی، امکان انجام مدل‌سازی ژئومکانیکی برای چاه مورد نظر فراهم شده است. مقادیر لاگ صوتی فشاری و لاگ صوتی برشی از طریق روابط تجربی و با استفاده از نرم‌افزار *Techlog* قابل استخراج هستند.

در این مرحله، مدل ژئومکانیکی تک‌بعدی سازند ساخته شده است. اکنون به بررسی روش‌های مدیریت تولید ماسه پرداخته می‌شود. در شکل ۵ مشاهده می‌شود که لاگ‌ها با بهره‌گیری از روابط محاسباتی توسعه‌یافته ایجاد شده‌اند و شامل پارامترهایی مانند مدول الاستیسیته، تنش‌های افقی و عمودی، مقاومت فشاری تک‌محوره، فشار منفذی داده‌های *RFT*، ضریب پواسون و زاویه اصطکاک داخلی هستند. این لاگ‌ها به‌طور پیوسته با عمق تغییر کرده و برای تحلیل خصوصیات ژئومکانیکی لایه‌های مخزن مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با توجه به نظریه اندرسون و تحلیل داده‌های شبیه‌سازی مدل تک بعدی، مشخص شد که رژیم تنشی در سازند مورد مطالعه از نوع نرمال است. در شکل ۵ مشاهده می‌شود که مقدار تنش برجا از هر دو مؤلفه‌ی بیشینه و کمینه‌ی تنش افقی بیشتر بوده و فشار منفذی نیز کمتر از آن‌ها است که نشان می‌دهد نیروی قائم غالب بوده و گسل‌های احتمالی از نوع نرمال خواهند بود.

در شکل ۵، مجموعه‌ای از نقاط رنگی بر روی لاگ‌ها مشاهده می‌شود که بیانگر نتایج داده‌های آزمایشگاهی به‌دست‌آمده از نمونه‌های ماسه‌سنگ سست هستند. تطابق قابل توجه میان

تنش برجا ناشی از وزن سنگ‌ها و سیالاتی است که بر یک نقطه خاص در زیرزمین اثر می‌گذارد، بنابراین چگالی سیال تأثیر قابل‌توجهی بر آن دارد. مقدار این تنش را می‌توان از طریق معادله ۱۵ و ۱۶ محاسبه کرد [۲۵]:

$$S_v = \int \rho g dz \quad (15)$$

که در آن z برابر با عمق سازند و g شتاب گرانش است. حال می‌توان میزان فشار منفذی در سازند را با استفاده از معادله ۱۶ محاسبه کنیم.

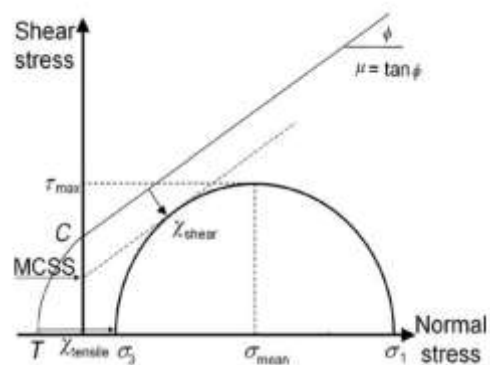
$$P_p = S_v (S_v - P_h) \left(\frac{\Delta t_n}{\Delta t} \right)^n \quad (16)$$

P_h گرادیان فشار هیدرواستاتیک و Δt زمان عبور موج صوتی فشاری (سونیک) و Δt_n زمان سفر محاسبه‌شده از روند تراکم نرمال و در آخر نیز n توان ایتون است که می‌توان فشار منفذی را برحسب داده های لاگ چاه مورد مطالعه به صورت زیر نوشت:

$$P_p = [(S_v - (S_v - P_g) \times \left(\frac{50 + 135 * 2.27182^{(0.00137 * DEPTH)}}{DT} \right)^{0.5}] \quad (17)$$

$$P_g = \frac{DEPTH}{1000} * 10 \quad (18)$$

P_g گرادیان فشار هیدرواستاتیک است. پس از تعیین کمینه و بیشینه تنش افقی و همچنین تنش برجا، می‌توان نوع رژیم تنشی منطقه را بررسی کرد. با استفاده از معادلات به‌دست‌آمده، می‌توان ضریب چسبندگی c و زاویه اصطکاک داخلی θ را تعیین کرد [۲۷].



شکل ۴. شماتیک معیار شکست موهر-کلمب [۲۹]

شکل ۴ شماتیک موهر-کلمب را با استفاده از ضریب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی برای تعریف محدوده شکست سنگ نشان می‌دهد. این پارامترها در تحلیل پایداری و رفتار مکانیکی سنگ نقش اساسی دارند. در نهایت، با در

این داده‌های تجربی و مقادیر حاصل از مدل، دقت بالای مدل‌سازی و صحت روابط تجربی به‌کاررفته در توسعه مدل ژئومکانیکی را تأیید می‌کند. بر این اساس، مدل ارائه‌شده از اعتبار مناسبی برخوردار بوده و قابلیت اطمینان بالایی در تحلیل پایداری سازند و پیش‌بینی تولید ماسه تحت شرایط میدانی دارد [43].

۵. مدل تولید ماسه

۱.۵. مدل‌های پوروالاستیک برای پیش‌بینی تولید

ماسه

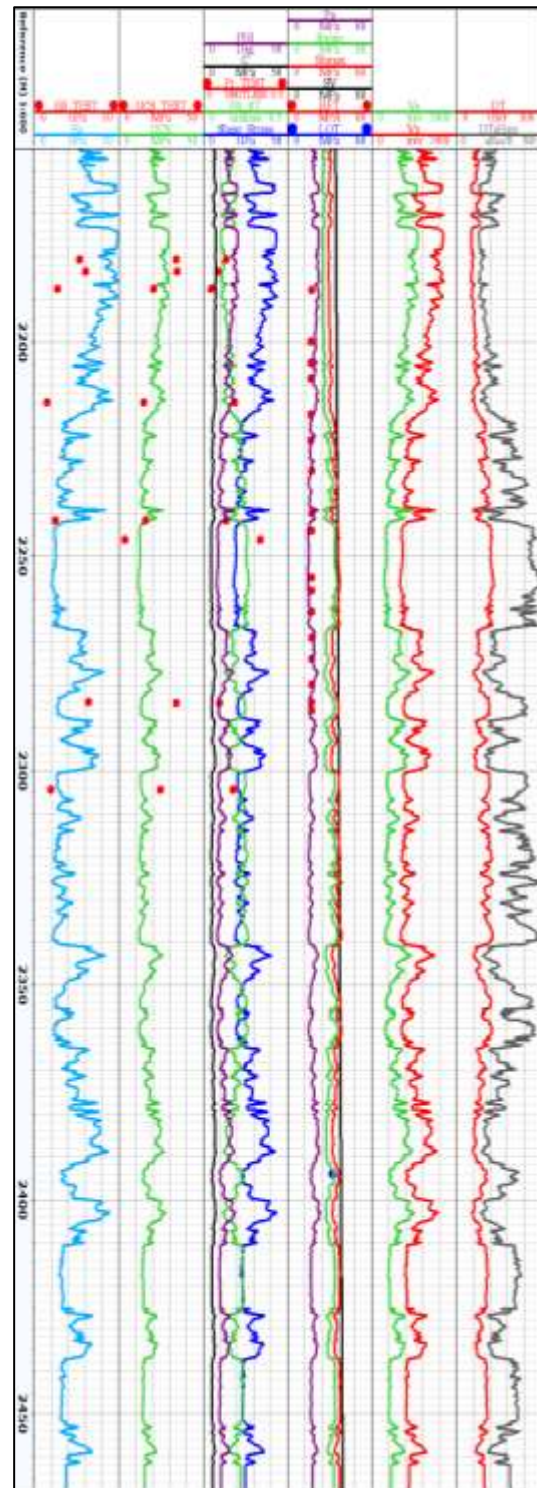
مدل‌های پورو الاستیک یک گام فراتر از مدل‌های الاستیک هستند و تأثیر فشار سیال منفذی را بر رفتار مکانیکی سنگ در نظر می‌گیرند. این مدل‌ها با ترکیب معادلات تعادل مکانیکی و معادلات جریان سیال در محیط متخلخل، امکان تحلیل دقیق‌تری از تنش‌ها و تغییر شکل‌های ایجاد شده در اطراف چاه و تونل‌های ایجاد شده در مشبک کاری را فراهم می‌کنند. در سازند‌های متخلخل ماسه سنگی، تغییرات فشار منفذی در طول تولید می‌تواند منجر به تغییرات تنش مؤثر، تغییر شکل‌های قابل توجه، و با ناپایداری چاه سبب تولید ماسه می‌شود.

۲.۵. افت فشار بحرانی در چاه

یک روش برای محاسبه فشار جریان بحرانی ته چاهی که منجر به تولید ماسه می‌شود، بر اساس معیار مقاومت ظاهری و رفتار الاستیک خطی از سنگ توسعه داده شده است. این مدل به دیواره چاه یا سوراخ‌های مشبک اطراف آن اعمال می‌شود. در این محاسبات، جهت چاه یا سوراخ مشبک و تنش‌های اصلی وارد بر سنگ در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از تنش‌های میدانی و حداکثر تنش‌های مماسی روی دیواره چاه، محاسبات انجام می‌گردد [۳]. معادله زیر برای محاسبه تنش‌های مماسی حداکثر بر روی دیواره چاه استفاده می‌شود:

$$S_{t2} = 3\sigma_{\max} - \sigma_{\min} - p_w(1 - a) - ap_R \quad (22)$$

که S_{t2} برابر است با حداکثر تنش‌های مماسی در دیواره^{۱۰} و p_w فشار دهانه چاه^{۱۱} است.



شکل ۵. خروجی مدل ژئومکانیکی تک‌بعدی

¹¹ Wellbore pressure

¹⁰ Maximum tangential stresses

یش بینی نواحی موثر در تولید ماسه و تعیین افت فشار بحرانی با استفاده از مدل ژئومکانیکی تک بعدی در سازند آسماری

نشریه ژئومکانیک و ژئوانرژی؛ دوره ۸؛ شماره ۲؛ تابستان ۱۴۰۴

، قابلیت^{۱۴} پیش‌بینی تولید ماسه را دارد. این مدل اثرات پلاستیسیته را بر مقاومت ماسه‌های اطراف چاه در روش‌های تکمیل چاه باز یا مشبک‌کاری شده، حین تولید و افت فشار در نظر می‌گیرد و در این مطالعه، از نرم‌افزار برای ارزیابی امکان تولید ماسه استفاده شده است.

در شکل ۶ میتوان در ستون ۱ عمق چاه را مشاهده کرد که از بازه ۲۲۰۰ تا ۲۴۵۰ متر است، درستون ۲ میتوان زون بندی را در ستون چاه مشاهده کرد که به سه بخش تقسیم شده است که شامل نواحی زون پایدار، ناپایدار و نیمه پایدار از نظر تولید ماسه است. ستون ۳ مربوط به انحراف و زاویه حفره چاه می باشد.

ستون ۴ به ترتیب نشان‌دهنده مقاومت فشاری تک‌محوری و ضریب پواسون هستند. ستون ۵ بیشینه و کمینه تنش افقی، فشار منفذی و تنش عمودی را نمایش می‌دهد. همچنین میتوان تخمین مدل اولیه از ظرفیت تولید ماسه که با نرخ تخلیه ۰، ۱۵، ۲۵، ۳۵ درصد انجام شده است را در ستون ۶ و ۷ مشاهده کرد. درستون ۶ میزان افت فشار بحرانی ماسه در حالتی که چاه به با آستری است و در عمق ۲۳۵۷ متر مشبک شده است، را نشان میدهد و ستون ۷ هم برای حالتی است که تکمیل چاه به صورت حفره باز است.

میزان بازه ی تولید ماسه را میتوان از ستون ۵ و ۶ مشاهده کرد. میزان فاجعه آمیز تولید ماسه زمانی است که $CDPP$ کمتر از صفر باشد. پس در حالت حفره باز به وضوح تولید ماسه را مشاهده میکنیم.

در زون‌بندی ارائه‌شده در شکل ۶ زون پایدار، شامل بخش‌هایی از سازند است که دارای مقاومت فشاری بالا و رفتار مکانیکی قابل اطمینان هستند، در این زون‌ها احتمال تولید ماسه بسیار پایین بوده است، که این زون با رنگ سبز نمایش داده شده است. همچنین زون نیمه پایدار، به نواحی‌ای اطلاق می‌شود که ویژگی‌های مکانیکی آن‌ها در حد میانی قرار داشته و در افت ناگهانی فشار ته چاهی امکان تولید ماسه وجود دارد که با رنگ زرد در شکل نمایش داده شده است. زون ناپایدار، شامل بخش‌هایی است که دارای مقاومت بسیار پایین و بیشترین پتانسیل تولید ماسه را دارند که با رنگ قرمز در شکل نمایش داده شده است.

برای جلوگیری از تولید ماسه، حداکثر تنش مماسی مؤثر باید کمتر از مقاومت مؤثر سازند در نزدیکی دیواره چاه باشد [۳].

$$S_{t2} - p_w \leq U \quad (23)$$

با جایگذاری معادلات و حل آن برای p_w می‌توان فشار جریان بحرانی ته چاهی بدون تولید ماسه^{۱۲} ($CBHFP$) را به صورت زیر استخراج کرد.

$$p_w \geq CBHFP = \frac{3\sigma_{max} - \sigma_{min} - U}{2-a} - p_R \frac{a}{2-a} \quad (23)$$

مقاومت مؤثر سازند (U) از طریق آزمایش سیلندر دیواره ضخیم^{۱۳} (TWC) قابل محاسبه است. این آزمایش به عنوان معیار اصلی برای اندازه‌گیری مقاومت چاه‌های حفره باز و مشبک کاری شده استفاده می‌شود [۳۰].

$$U = 3.1 * TWC \quad (24)$$

در اینجا TWC به عنوان مقاومت تعیین‌شده در آزمایش سیلندر دیواره ضخیم تعریف می‌شود. ضریب ۳.۱ شامل تبدیل مقیاس از آزمایشگاه به مقیاس میدانی است. بر اساس داده‌های جهانی مربوط به آزمایش‌های TWC و مقاومت فشاری تک‌محوره که بر روی ماسه‌سنگ‌ها انجام شده است [۳۱].

$$TWC = 11.46UCS^{0.53} \quad (25)$$

با استفاده از معیار پورو الاستیک و معیار شکست موهر-کولمب برای تجزیه و تحلیل شکست برشی در تونل مشبک شده، معادله زیر به دست آمده است که فشار بحرانی ته چاه را برای حفظ پایداری تونل مشبک پیش‌بینی می‌کند و فشار افت کل بحرانی قابل محاسبه است [۳۲].

$$CDPP = \frac{1}{1-a} [2P_R - (3\sigma_{max} - \sigma_{max} - U)] \quad (26)$$

۶. تخمین تولید ماسه

نرم‌افزار تک‌لاگ با استفاده از یک مدل راهنمای مدیریت ماسه

¹⁴ Sand Management Advisor

¹²Critical bottom hole flowing pressure

¹³ Thin wall cylinder

شکل ۶. تأثیر کاهش فشار مخزن بر CDPP در ستون چاه برای در نرخ‌های کاهش ۰٪، ۱۵٪، ۲۵٪ و ۳۵٪

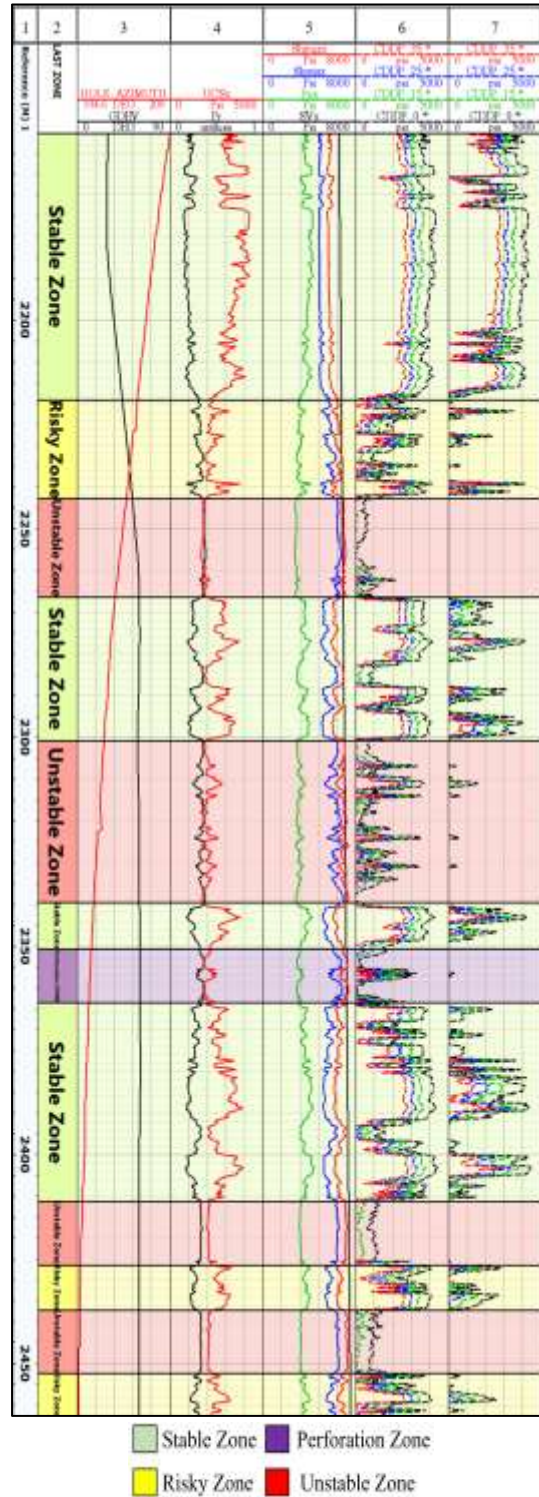
۱.۶. بررسی شرایط تولید ماسه در عمق مشخص

در نمودار تحلیل تولید ماسه در عمق مشخص که در شکل ۷ میتوان مشاهده کرد، محاسبات فشار جریان در ته چاه نسبت به فشار مخزن رسم شده است. ناحیه سبز در نمودار محدوده‌ای از فشار جریان در ته چاه را نشان می‌دهد که در آن انتظار نمی‌رود تولید ماسه رخ دهد، در حالی که ناحیه قرمز نشان‌دهنده‌ی احتمال وقوع تولید ماسه است. چاه مورد مطالعه با لوله جدارگی تکمیل شده است. بنابراین، تحلیل عمق‌های مشبک‌کاری‌شده‌ی این چاه برای شناسایی فواصل مستعد تولید ماسه و ارائه‌ی راهکار مناسب ضروری است. برای این چاه، فواصل مشبک‌کاری‌شده شامل ۲۳۵۳ تا ۲۳۶۲ متر هستند که در شکل ۶ به رنگ بنفش درآمده است.

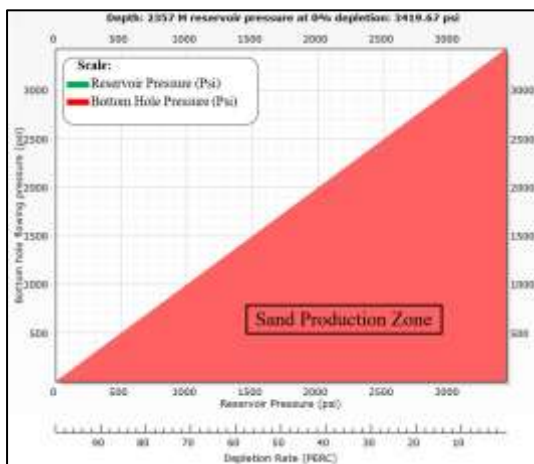
بر اساس مقادیر پایین $CDDP$ و UCS ، احتمال وقوع مشکل تولید ماسه در فواصل مشبک‌کاری‌شده‌ی فعلی چاه، خصوصاً در شرایطی که نرخ افت فشار مخزن صفر باشد، وجود دارد. زون تولیدی دارای اشباع بالای نفت بوده و نسبتاً فاقد شیل است که منجر به ایجاد ویژگی‌های پتروفیزیکی مطلوب می‌شود. برای دستیابی به منطقه‌ای بدون تولید ماسه، لازم است که این پارامترها بهینه‌سازی شوند که این کار از طریق آنالیز حساسیت فاکتورهای مؤثر متعدد امکان‌پذیر است.

در شکل ۷ میتوان مشاهده کرد در شرایط مشبک کاری شده در عمق ۲۳۵۷ است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، نقاط زرد رنگ مشخص‌شده نمایانگر فشار مخزن ثابت برابر با $psi\ 3100$ هستند، در حالی که فشارهای ته‌چاهی در سه حالت متفاوت A ، B و C به ترتیب برابر با ۲۵۰۰، ۳۱۰۰ و $psi\ 850$ در نظر گرفته شده‌اند که نشان می‌دهد فشار ته‌چاهی یکی از عوامل بسیار تأثیرگذار در تولید ماسه است. در نقطه A ، فشار ته‌چاهی با فشار مخزن برابر است ($psi\ 3100$) و روی خط $BHFP$ قرار دارد. در واقع این نقطه نشان‌دهنده‌ی بالاترین فشار ته‌چاهی ممکن است. یعنی فشار ته‌چاهی نمی‌تواند بیشتر از فشار مخزن باشد.

در نقطه B ، فشار ته‌چاهی برابر با $psi\ 2500$ است و در ناحیه سبز رنگ نمودار قرار دارد. این ناحیه نشان‌دهنده محدوده‌ای است که در آن نمی‌توان تولید بدون ماسه را انتظار داشت.



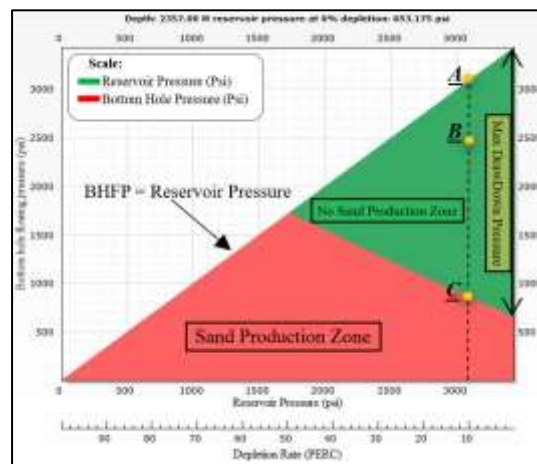
نتیجه، احتمال تولید ماسه افزایش می‌یابد. این مسئله می‌تواند بر عملکرد چاه تأثیر منفی بگذارد و نیاز به اتخاذ تدابیر مناسب برای کنترل تولید ماسه را ضروری می‌سازد. زمانی که چاه با لوله آستری و مشبک تکمیل شود، فشارهای اعمال شده بر دیواره‌ی چاه متعادل باقی می‌ماند و از ریزش سازند و آزاد شدن ماسه جلوگیری می‌شود. در نتیجه، انتخاب روش تکمیل چاه، همراه با کنترل دقیق فشارهای اعمالی بر سازند، نقش کلیدی در جلوگیری از تولید ماسه ایفا می‌کند. این موضوع باید به عنوان یکی از عوامل مهم در ارزیابی‌های ژئومکانیکی مورد توجه قرار گیرد تا پایداری چاه و افزایش بهره‌وری مخزن تضمین شود.



شکل ۸. نمودار CDDP برای چاه در عمق ۲۳۵۷ متری در حالت حفره باز

اما در نقطه C، فشار ته‌چاهی به ۸۵۰ psi کاهش یافته و مرز بین ناحیه سبز رنگ و ناحیه قرمز رنگ است. این ناحیه به عنوان مرز بحرانی شناخته می‌شود، چرا که اگر فشار از این مقدار کمتر شود، تولید ماسه اتفاق می‌افتد. بنابراین، فشارهای پایین‌تر از این نقطه، خطر تولید ماسه را به همراه دارند، در حالی که فشارهای بالاتر از آن شرایط ایمن‌تری برای تولید بدون ماسه فراهم می‌کنند.

همچنین در شکل ۸ میتوان شرایط تولید ماسه را در حالت حفره باز بررسی کرد که نشان میدهد در هر فشار مخزن و فشار ته چاهی از نقطه نظر ژئومکانیکی تولید ماسه رخ خواهد داد. می‌توان مشاهده کرد که، تکمیل چاه به مشبک‌کاری به شدت برای پایداری چاه مخصوصاً در مقادیر پایین پارامترهای ژئومکانیکی موثرتر است و کاهش این پارامترها در تکمیل چاه حفره باز موجب افت استحکام سازند در این عمق شده و در



شکل ۷. نمودار CDDP برای چاه در عمق ۲۳۵۷ متری در حالت مشبک کاری شده

۲.۶. آنالیز حساسیت

آنالیز حساسیت بر حسب عمق برای بررسی تغییرات CDDP و تولید بدون ماسه در عمق‌های خاص انجام شد [۳۳]. با در نظر گرفتن عدم قطعیت در پارامترهای مدل زمین‌مکانیکی تک‌بعدی، پیش‌بینی تولید ماسه در یک بازه عمقی گسترده انجام شد. زمانی که فشار مخزن کاهش می‌یابد، تنش درون مخزن ممکن است تغییر کند و باعث تولید ماسه در نواحی مستعد شود. برای بهینه‌سازی تولید ماسه، یک آنالیز

آنالیز حساسیت بر حسب عمق برای بررسی تغییرات CDDP و تولید بدون ماسه در عمق‌های خاص انجام شد [۳۳]. با در نظر گرفتن عدم قطعیت در پارامترهای مدل زمین‌مکانیکی تک‌بعدی، پیش‌بینی تولید ماسه در یک بازه عمقی گسترده انجام شد. زمانی که فشار مخزن کاهش می‌یابد، تنش درون مخزن ممکن است تغییر کند و باعث تولید ماسه در نواحی مستعد شود. برای بهینه‌سازی تولید ماسه، یک آنالیز

¹⁵ Hole Azimuth

یش بینی نواحی موثر در تولید ماسه و تعیین افت فشار بحرانی با استفاده از مدل ژئومکانیکی تک بعدی در سازند آسماری

نشریه ژئومکانیک و ژئوانرژی؛ دوره ۸؛ شماره ۲؛ تابستان ۱۴۰۴

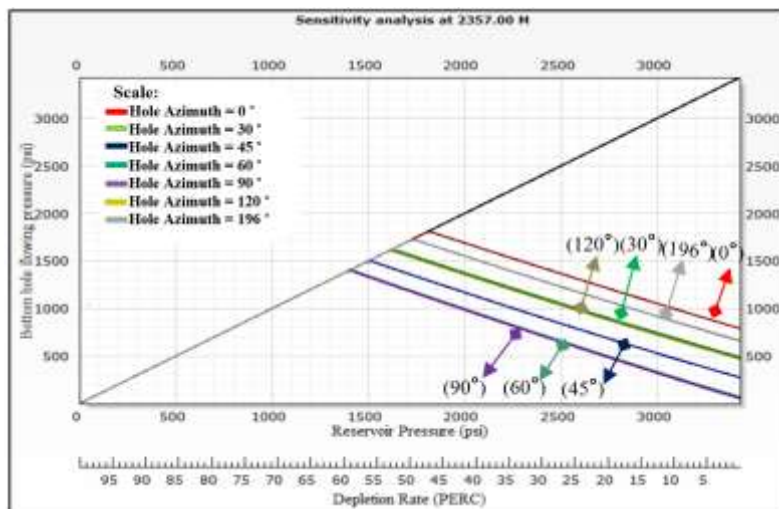
این امر بر میزان افت فشار بدون ماسه^{۱۷} تأثیر می‌گذارد. برای بهینه‌سازی تولید ماسه، یک آنالیز حساسیت در عمق ۲۳۵۷ بر تکمیل چاه حفره باز و تکمیل با مشبک در زمانی که مقدار *CDDP* در نرخ کاهش فشار صفر، انتخاب شده است.

قطر دانه‌های ماسه، قطر و زاویه مشبک کاری^{۱۶} و *UCS* در حالت مشبک کاری شده انجام شده است. با کاهش فشار مخزن، تنش درون مخزن تغییر می‌کند که متر انجام شد، همان‌طور که در شکل ۶ داده شده است. پارامترهای مورد استفاده در این تحلیل بر اساس تأثیر آن‌ها

۱.۲.۶. زاویه آزمون چاه

اما از آزمون ۹۰ تا ۱۹۶ درجه، فشار بحرانی مجدداً افزایش می‌یابد، به‌ویژه در آزمون ۱۹۶ درجه که شرایط واقعی چاه است، فشار بحرانی به‌طور محسوسی بالاتر است. این نشان‌دهنده کاهش محدوده ایمن بهره‌برداری و افزایش حساسیت چاه به تولید ماسه است. دلیل آن، هم‌راستایی راستای چاه با جهت بیشینه تنش افقی و در نتیجه تمرکز بیشتر تنش‌ها اطراف دیواره چاه است. در حالت حفره باز فقط در آزمون ۰ درجه، محدوده تولید بدون ماسه کمی وجود داشت همچنین با افزایش تنش‌های برجای نقطه، این آنالیز حساسیت زاویه آزمون چاه، محدوده سبز و پایدار بزرگتر می‌شود [۱۹].

در شکل ۹ آنالیز حساسیت بر زاویه آزمون چاه که از ۰ تا ۱۹۶ متغیر است را میتوان مشاهده کرد. با افزایش اختلاف تنش‌های وارد بر دیواره چاه، پایداری چاه کاهش می‌یابد. این آنالیز در چاه مشبک کاری انجام شده است و در هر فشار مخزن و فشار ته چاهی تولید ماسه داریم. نمودار نشان می‌دهد که با افزایش آزمون چاه از ۰ تا ۹۰ درجه، فشار بحرانی ته‌چاهی کاهش می‌یابد؛ یعنی چاه در برابر تولید ماسه مقاوم‌تر می‌شود. در این بازه، فاصله زاویه‌ای بین راستای چاه و جهت بیشینه تنش افقی افزایش می‌یابد که به پخش مناسب‌تر تنش‌ها و پایداری بیشتر سنگ اطراف چاه منجر می‌شود [۱۹].



شکل ۹. آنالیز حساسیت جهت حفره چاه

۲.۲.۶. انحراف چاه

اگر فقط از نظر ژئومکانیکی به بررسی پایداری بپردازیم و از عوامل هیدرودینامیکی صرف نظر کنیم، هرچه انحراف چاه بیشتر شود، ناپایداری دیواره و احتمال تولید ماسه افزایش

در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود با افزایش زاویه انحراف چاه در حالت حفره باز، محدوده تولید ماسه گسترش می‌یابد. آنالیز حساسیت انجام‌شده در بازه ۰ تا ۹۰ درجه نشان می‌دهد که

¹⁷ Sand-free drawdown

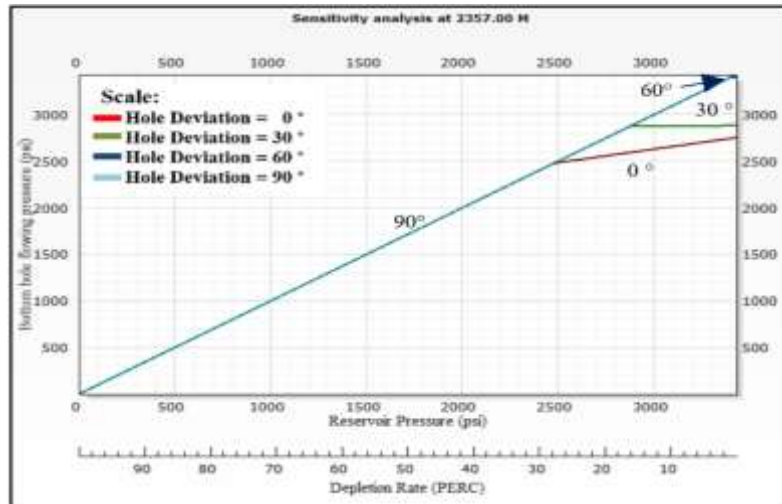
¹⁶ Hole deviation

یش بینی نواحی موثر در تولید ماسه و تعیین افت فشار بحرانی با استفاده از مدل ژئومکانیکی تک بعدی در سازند آسماری

نشریه ژئومکانیک و ژئوانرژی؛ دوره ۸؛ شماره ۲؛ تابستان ۱۴۰۴

می‌یابد. این مسئله نشان می‌دهد که چاه‌های با انحراف بالا تحت تنش‌های بیشتری قرار گرفته و احتمال شکست سازند

و تولید ماسه در آن‌ها بیشتر است. در این مطالعه، انحراف چاه ۶۰ درجه است که نقش مهمی در پایداری آن دارد.



شکل ۱۰. آنالیز حساسیت زاویه چاه در حالت حفره باز

۳.۲.۶. قطر چاه

آنالیز حساسیت انجام شده در بازه ۲.۳۷۵ تا ۸.۵ اینچ برای قطر چاه در تکمیل چاه حفره باز نشان می‌دهد که افزایش قطر چاه تأثیر مستقیمی بر ناپایداری دیواره چاه و تولید ماسه دارد. نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که با افزایش قطر چاه، محدوده تولید ماسه گسترده‌تر شده و احتمال تولید ماسه افزایش می‌یابد. افزایش قطر حفره چاه تأثیر مستقیمی بر پایداری مکانیکی دیواره چاه دارد و این افزایش قطر می‌تواند شرایط را برای کنده شدن دانه‌های ماسه و تولید آن‌ها فراهم‌تر سازد. دلیل اصلی این پدیده، تغییر در نسبت انرژی مکانیکی موجود به انرژی لازم برای جدا شدن یک دانه ماسه از دیواره چاه است [۳۸].

به انرژی مورد نیاز برای جدا شدن دانه افزایش می‌یابد و دانه‌ها راحت‌تر از دیواره جدا می‌شوند و در نتیجه، احتمال تولید ماسه و ناپایداری دیواره چاه افزایش می‌یابد. این نتیجه‌گیری اهمیت در نظر گرفتن ابعاد چاه در طراحی‌های مکانیکی و ژئومکانیکی را به‌وضوح نشان می‌دهد [۳۸].

افزایش قطر حفره چاه باعث تغییر در توزیع تنش‌های اعمالی بر دیواره چاه می‌شود، به‌طوری که با بزرگ‌تر شدن قطر چاه، تمرکز تنش‌ها در اطراف دیواره بیشتر شده و احتمال شکست مکانیکی و تولید ماسه افزایش پیدا می‌کند [۳۹].

هرچند افزایش قطر باعث کاهش سرعت سیال خروجی از سازند می‌شود و پایداری چاه افزایش می‌یابد، ولی در این شبیه‌سازی از انرژی سیال برای کنده شدن ماسه صرف‌نظر شده است، زیرا نرم‌افزار مورد استفاده امکان بررسی آن را ندارد. در این مطالعه، قطر انحراف چاه ۵ اینچ است و با شکل ۸ همخوانی دارد، زیرا در آنالیز حساسیت در این قطر چاه در حالت تولید ماسه قرار دارد. می‌توان نتیجه گرفت که از دیدگاه ژئومکانیکی، در چاه انحرافی هرچه قطر چاه کوچک‌تر باشد، از نظر محدوده تولید بدون ماسه بهتر است.

$$E_{required} = \sigma_{hoop} * r_g^2 * \mu * 2r_g \quad (27)$$

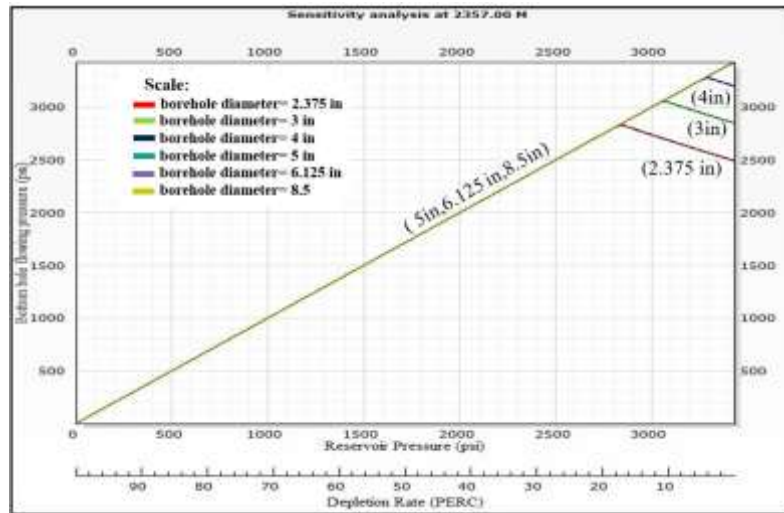
$$E_{available} = \sigma_{hoop} * 2\pi r_w * 2r_g * 2r_g \quad (28)$$

$$\frac{E_{available}}{E_{required}} \propto \frac{r_w}{r_g} \quad (29)$$

در این رابطه، شعاع حفره چاه، $2r_g$ قطر دانه ماسه، σ_{hoop} مولفه تنش استوانه ای و μ ضریب اصطکاک است. این معادله نشان می‌دهد که با افزایش قطر نسبت انرژی موجود

یش بینی نواحی موثر در تولید ماسه و تعیین افت فشار بحرانی با استفاده از مدل ژئومکانیکی تک بعدی در سازند آسماری

نشریه ژئومکانیک و ژئوانرژی؛ دوره ۸؛ شماره ۲؛ تابستان ۱۴۰۴

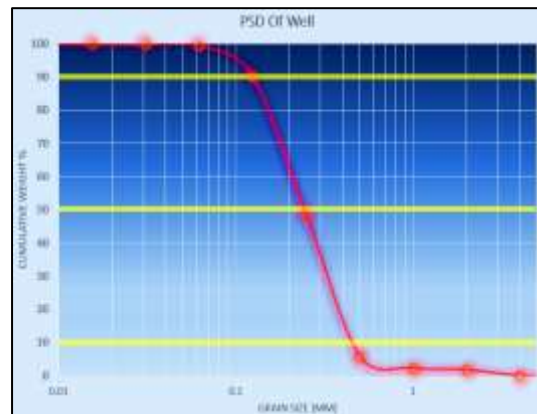


شکل ۱۱. آنالیز حساسیت در شرایط تولید ماسه نسبت به قطر چاه

۴.۲.۶. اندازه قطر دانه های ماسه

در این تحلیل، به بررسی حساسیت قطر دانه‌های ماسه بر عملکرد چاه و پایداری سازند پرداخته می‌شود. این پارامتر می‌تواند تأثیر زیادی بر پایداری چاه، شکست ژئومکانیکی سازند و تولید ماسه از دیواره چاه داشته باشد. این پارامتر رابطه‌ای مستقیم با ویژگی‌های سنگ دارد. با بررسی و تحلیل توزیع اندازه قطر دانه‌های ماسه^{۱۸}، می‌توان درک دقیق‌تری از رفتار سازند در برابر تولید ماسه به دست آورد و راهکارهای مؤثرتری برای کنترل آن ارائه داد. سازند مورد مطالعه توزیع

اندازه ذرات مختلفی (PSD^{۱۹}) از ماسه را داراست که این تنوع در توزیع اندازه ذرات می‌تواند بر پایداری چاه و احتمال تولید ماسه تأثیرگذار باشد. در شکل ۱۲ یک نمونه از این توزیع اندازه ذرات را میتوان مشاهده کرد. شکل ۱۳، که آنالیز حساسیت قطر دانه‌های ماسه را نشان می‌دهد، حاکی از آن است که با افزایش اندازه دانه‌های ماسه، محدوده تولید ماسه کاهش یافته و احتمال تولید بدون ماسه افزایش می‌یابد. آنالیز حساسیت انجام‌شده در بازه ۵۰ تا ۵۰۰ میکرومتر نشان می‌دهد که دانه‌های ماسه درشت‌تر پایداری بیشتری در سازند ایجاد کرده و در نتیجه، چاه در برابر تولید ماسه مقاوم‌تر خواهد بود. نتایج این آنالیز حساسیت نشان می‌دهد که در دانه‌های ریزتر (حدود ۵۰ تا ۱۵۰ میکرومتر)، محدوده تولید ماسه وسیع‌تر بوده و احتمال تولید ماسه بیشتر است. اما با افزایش اندازه دانه‌ها به ۲۰۰ میکرومتر و بالاتر، این محدوده کوچک‌تر شده و سازند پایدارتر می‌شود. این روند بیانگر آن است که در مخازنی با دانه‌های ماسه درشت‌تر، احتمال ناپایداری دیواره چاه کاهش یافته و شرایط تولید ایمن‌تر فراهم خواهد شد و یا اینکه در مخزن که ماسه با اندازه‌های مختلف مخلوط هستند، تولید ذرات ریزتر راحت‌تر از ذرات درشت‌تر است. از این رو انتخاب استراتژی‌های مناسب برای کنترل تولید ماسه، با در

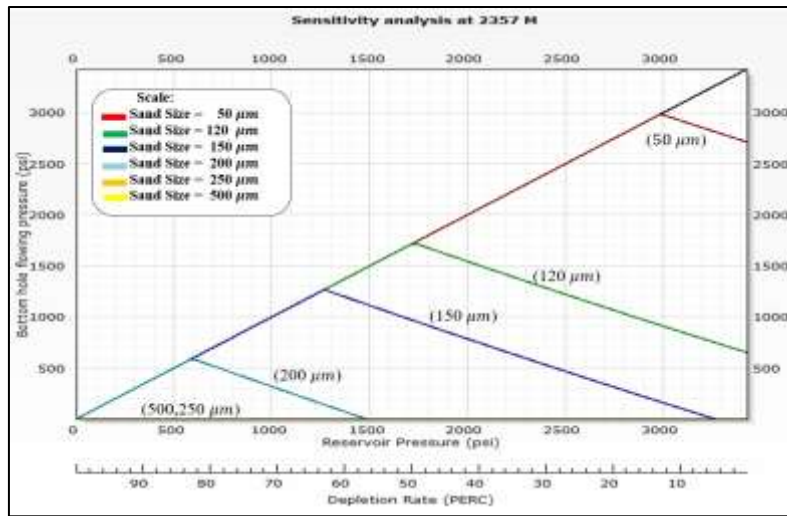


شکل ۱۲. توزیع اندازه دانه‌های ماسه در چاه مورد مطالعاتی

¹⁹ Particle Size Distribution

¹⁸ Particle Size Distribution

نظر گرفتن اندازه دانه‌های ماسه، اهمیت بالایی در بهینه‌سازی تولید چاه دارد.

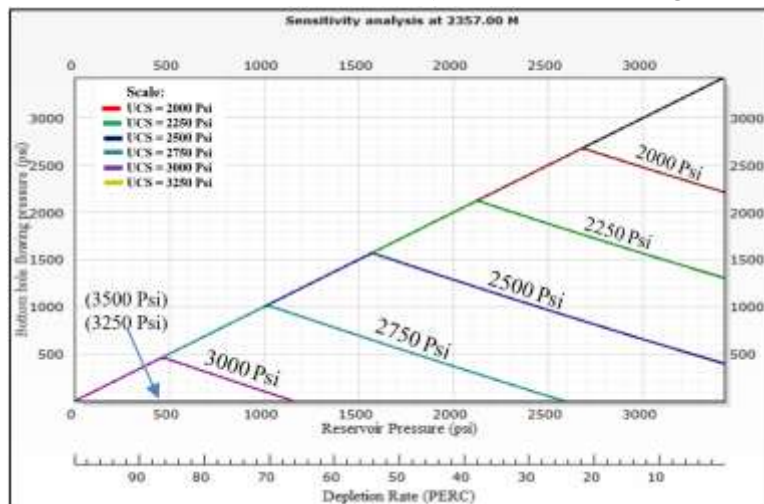


شکل ۱۳. آنالیز حساسیت در شرایط تولید ماسه نسبت به اندازه قطر دانه های ماسه

۵.۲.۶. مقاومت فشاری تک محوره

آنالیز حساسیت انجام شده در بازه ۲۰۰۰ تا ۳۵۰۰ psi نشان می‌دهد که هرچه مقدار UCS کمتر شود، محدوده تولید ماسه افزایش می‌یابد. به‌طور خاص، اگر مقدار مقاومت فشاری تک محوره از ۱۷۰۰ psi کمتر شود، کل محدوده به ناحیه تولید ماسه تبدیل خواهد شد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، در شرایطی که مقدار UCS به شرایط بحرانی برسد، تمام زون مورد بررسی ناپایدار شده و تولید ماسه در کل محدوده اتفاق می‌افتد. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر مستقیم

کاهش مقاومت فشاری تک‌محوره بر افزایش ریسک تولید ماسه و ناپایداری چاه است. برای افزایش UCS در مخازن نفتی، باید از روش‌هایی مانند شکاف هیدرولیکی به‌طور کنترل‌شده استفاده کرد. این روش با ایجاد شکاف‌های میکروسکوپی در سنگ باعث توزیع یکنواخت تنش‌ها در اطراف چاه شده و بار قابل تحمل سنگ را کاهش می‌دهد [۳۴]. همچنین، باید از تزریق مایعات فشار بالا مانند CO₂ با دقت استفاده کرد تا از حل شدن مواد سیمانی و



شکل ۱۴. آنالیز حساسیت شرایط تولید ماسه نسبت به مقاومت فشاری تک محوره

یش بینی نواحی موثر در تولید ماسه و تعیین افت فشار بحرانی با استفاده از مدل ژئومکانیکی تک بعدی در سازند آسماری

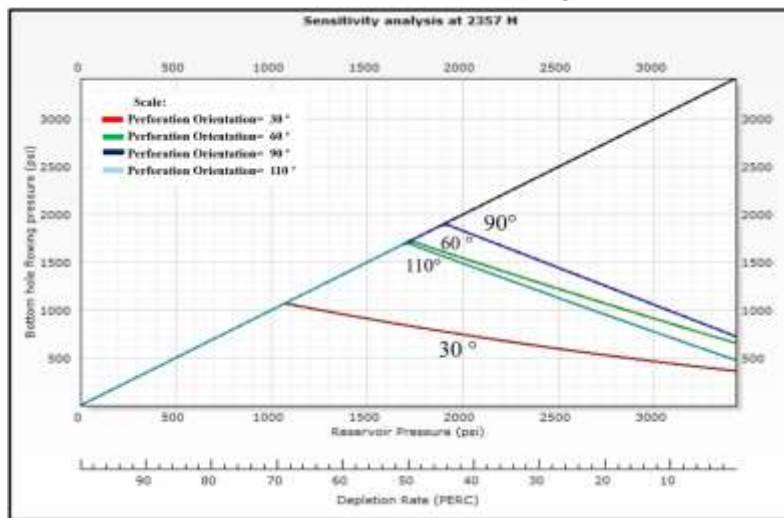
نشریه ژئومکانیک و ژئوانرژی؛ دوره ۸؛ شماره ۲؛ تابستان ۱۴۰۴

ورود آب به لایه‌های بالاتر شده که باعث افزایش تولید آب و در نتیجه کاهش قدرت سنگ خواهد شد. بنابراین، باید از حفر چاه در این نواحی خودداری کرد تا تاثیر منفی بر روی عملکرد مخزن و کاهش مقاومت فشاری تک محوره جلوگیری شود [۳۷].

۶.۲.۶. زاویه جهت حفره مشبک

بر اساس شکل ۱۵، که آنالیز حساسیت زاویه جهت حفره مشبک کاری را نشان می‌دهد، زاویه مشبک‌کاری یکی از عوامل مهم در عملکرد مکانیکی چاه محسوب می‌شود. به‌طور کلی، جهت‌گیری سوراخ‌ها نسبت به تنش‌های مؤثر و شرایط ژئومکانیکی سازند، نقش تعیین‌کننده‌ای در توزیع فشار دارد. بنابراین، انتخاب زاویه مناسب در عملیات مشبک‌کاری می‌تواند به بهبود پایداری چاه و کاهش ریسک‌های مرتبط با بهره‌برداری کمک کند

تضعیف پیوند دانه‌ها جلوگیری شود. این اقدامات می‌توانند به حفظ یا افزایش مقاومت فشاری سنگ کمک کنند [۳۵]. همچنین تزریق اسید (اسیدکاری) با حل سیمان‌های سیلیسی یا کربناتی بین ذرات سنگ، مقاومت فشاری تک محوره را کاهش می‌دهد که در برخی شرایط ممکن است برای تسهیل استخراج مفید باشد. اما باید توجه داشت که این کار می‌تواند منجر به کاهش قدرت سنگ و کاهش UCS شود که برای افزایش مقاومت و کارایی، باید از این روش‌ها اجتناب کرد یا با دقت بیشتری اعمال شوند [۳۶]. همچنین، تزریق آب برای افزایش فشار منفذی می‌تواند باعث کاهش تنش مؤثر قائم و مقاومت برشی سنگ شود، که به کاهش مقاومت فشاری تک محوره منجر می‌شود و برای حفظ و افزایش قدرت سنگ، باید از این اقدامات با احتیاط استفاده کرد. برای حفر چاه در مناطق ماسه‌سنگی، باید دقت کرد که چاه در مناطقی با آبدهی قوی زیرزمینی حفر نشود. زیرا اگر چاه در چنین مناطقی حفر شود، تولید نفت می‌تواند منجر به



شکل ۱۵. آنالیز حساسیت در شرایط تولید ماسه نسبت به جهت حفره مشبک

زاویه انحراف مشبک تا ۹۰ درجه، تمرکز تنش‌های کششی در اطراف مشبک‌ها در سازند بیشتر می‌شود، بنابراین ناحیه تولید ماسه بزرگ‌تر خواهد بود و هرچه از این زاویه دورتر می‌شویم، توزیع تنش به نحوی تغییر می‌کند که مشبک‌ها در جهت فشاری نسبت به تنش‌های مؤثر قرار می‌گیرند. باتوجه به اینکه هرچه زاویه جهت مشبک به جهت تنش بیشینه افقی نزدیک‌تر باشد، پایداری حفره افزایش می‌یابد، می‌توان گفت بهترین زاویه جهت مشبک ۳۰ درجه و بدترین

نتایج این آنالیز حساسیت نشان می‌دهد که در زوایای کمتر (۳۰ درجه)، فشار بحرانی کمتر بوده و نسبت به سایر زوایا، محدوده تولید بدون ماسه بیشتری داریم. در زاویه ۶۰ درجه، فشار بحرانی و عملکرد تولیدی در حد متوسط قرار دارد و محدوده تولید بدون ماسه نیز نسبت به ۳۰ و ۹۰ درجه، میانگین است. اما در زوایای ۹۰ درجه و بیشتر، فشار بحرانی افزایش یافته و در نتیجه عملکرد تولیدی چاه کاهش پیدا می‌کند و محدوده تولید بدون ماسه کاهش می‌یابد. با افزایش

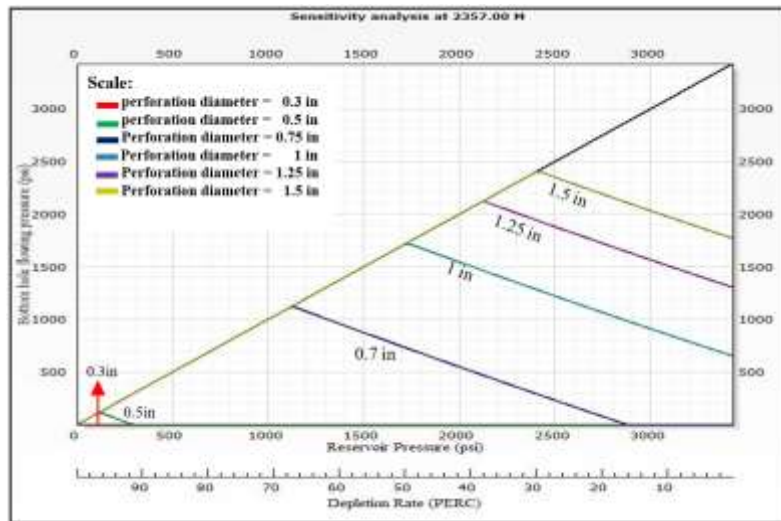
درجه در نظر گرفته شده است.

زاویه ۹۰ درجه است. جهت تنش بیشینه در این تحلیل ۶۰

۷.۲.۶. قطر سوراخ‌های مشبک‌کاری

ماسه بیشتر می‌شود. این روند نشان می‌دهد که از نظر ژئومکانیکی استفاده از قطرهای بزرگ برای مشبک‌کاری ممکن است اثر منفی داشته باشد، زیرا کاهش بیش از حد افت فشار باعث تسهیل حرکت ذرات ماسه و افزایش احتمال ورود آن‌ها به چاه می‌شود. بنابراین، انتخاب قطر مشبک‌کاری باید به گونه‌ای باشد که علاوه بر حفظ فشار مناسب، از تولید ماسه نیز جلوگیری کند [۴۱، ۴۰].

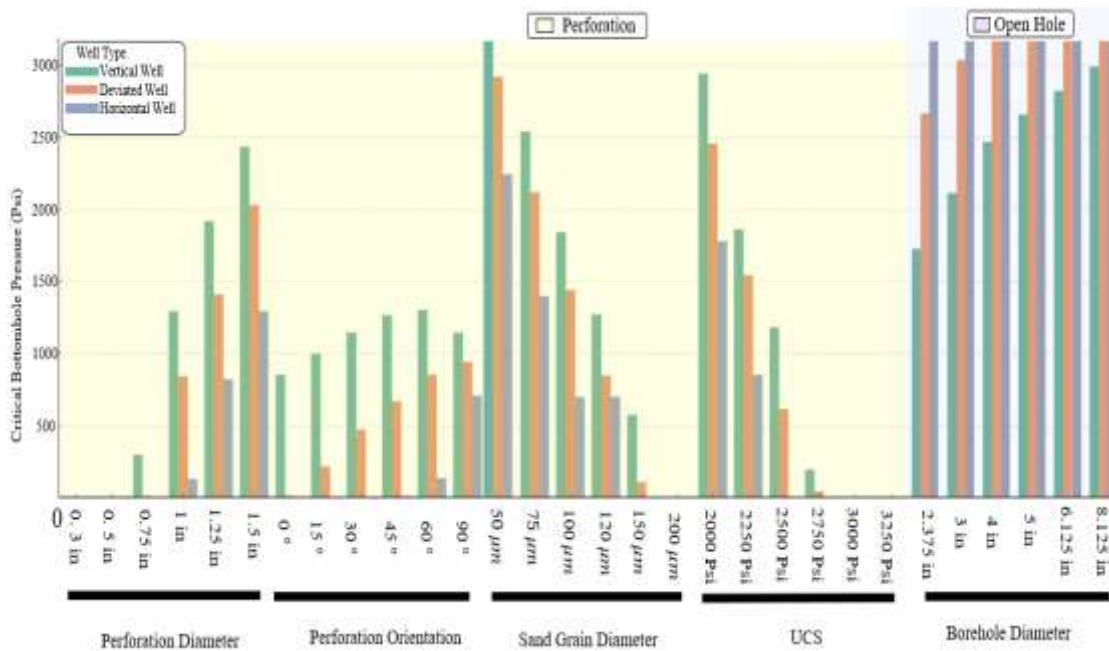
شکل ۱۶ تأثیر قطر مشبک‌کاری بر فشار جریان ته چاه و فشار مخزن برای تولید ماسه را نشان می‌دهد. در این تحلیل، زاویه مشبک‌کاری برابر با ۶۰ درجه در نظر گرفته شده است و قطر سوراخ‌های مشبک‌کاری در بازه ۰.۳ تا ۱.۵ اینچ بررسی شده است. هر چند که تاکنون از نظر عملیاتی انجام سوراخ‌کاری تا قطر حداکثر ۰.۷۷ اینچ به ثبت رسیده است. بر اساس این نمودار، مشاهده می‌شود که با افزایش قطر مشبک‌کاری، فشار بحرانی ته چاه افزایش می‌یابد و این یعنی احتمال تولید



شکل ۱۶. آنالیز حساسیت در شرایط تولید ماسه نسبت به قطر سوراخ مشبک‌کاری

گرفته‌اند. از آنجا که مدل‌سازی با نرم‌افزاری انجام شده که تعریف و شبیه‌سازی رفتار سیال را پشتیبانی نمی‌کند، اثرات سیال و پدیده‌های هیدرومکانیکی به‌طور کامل از حوزه تحلیل حذف شده‌اند. با بهره‌گیری از مدل‌سازی ژئومکانیکی و تخمین تولید ماسه انجام‌شده در نرم‌افزار تک‌لاگ، می‌توان به‌صورت دقیق نواحی مستعد تولید ماسه را در چاه‌های نفتی شناسایی نمود. این مدل‌ها امکان پیش‌بینی رفتار مکانیکی سازند را در شرایط مختلف تکمیل چاه، از جمله مشبک‌کاری یا تکمیل به‌صورت حفرة باز، فراهم می‌کنند. این دستاوردها نقش مهمی در کاهش ریسک‌های بهره‌برداری، افزایش طول عمر چاه و جلوگیری از آسیب به تجهیزات دارند.

در این مطالعه، همچنین آنالیز حساسیت فشار بحرانی ته چاهی برای تولید ماسه در سه نوع چاه عمودی، انحرافی و افقی تحت فشار مخزن ۳۱۰۰ psi مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۱۷ می‌توان مشاهده کرد که فشار بحرانی ته چاهی به‌طور مستقیم تحت تأثیر پارامترهایی نظیر قطر و زاویه سوراخ‌کاری، قطر دانه‌های ماسه، مقاومت فشاری تک‌محوره و قطر چاه است. فشار بحرانی ته چاهی هرچه بالاتر باشد میزان محدوده تولید ماسه (قرمز رنگ) بیشتر می‌شود. پس بالا بودن این پارامتر خطرناک است و همچنین چاه‌های عمودی در اکثر شرایط دارای فشار بحرانی بالاتری نسبت به چاه‌های انحرافی و افقی هستند. تمامی تحلیل‌های حساسیت انجام‌شده در این تحقیق صرفاً بر مبنای پارامترهای ژئومکانیکی سازند صورت



شکل ۱۷. آنالیز حساسیت فشار بحرانی ته چاهی برای پیش بینی تولید ماسه در چاه های عمودی، انحرافی و افقی در فشار مخزن ۳۱۰۰ پام

۷. نتیجه گیری

نقش غالب در کنترل تنش‌ها را دارند.

- مقایسه دو روش تکمیل چاه نشان داد که در حالت تکمیل چاه به صورت حفره باز، میزان محدوده تولید ماسه با استفاده از تغییرات در تنش های چاه به شدت افزایش می‌یابد، درحالی‌که در حالت تکمیل چاه با آستری و مشبک‌کاری، تولید ماسه در فشارمخزن و فشار ته چاهی بالا رخ نمی‌دهد. این امر تأثیر مستقیم تکمیل چاه بر پایداری مکانیکی سازند را نشان می‌دهد. به‌طور خاص، در عمق ۲۳۵۷ متر، کاهش پارامترهای ژئومکانیکی منجر به افت استحکام سازند و افزایش احتمال تولید ماسه شده است.
- کاهش فشار مخزن باعث تغییر تنش‌های درون مخزن شده و احتمال تولید ماسه را در نواحی مستعد افزایش می‌دهد. بنابراین، می‌توان مکان مشبک‌کاری را با در نظر گرفتن نرخ‌های تخلیه در آینده، طی چندین سال بعد، بهینه‌سازی و تغییر داد.
- با توجه به آنالیز حساسیت میتوان دریافت افزایش آزیموت چاه تا حدود ۹۰ درجه موجب افزایش پایداری چاه و کاهش

در این مطالعه، پیش‌بینی و تحلیل تولید ماسه در چاه مورد بررسی با استفاده از نرم‌افزار تک‌لاگ و مدل مدیریت ماسه انجام شد. نتایج حاصل نشان داد که تولید ماسه به‌شدت تحت تأثیر مقاومت فشاری تک‌محوره، پارامترهای ژئومکانیکی، و شرایط تکمیل چاه قرار دارد. بررسی داده‌ها نشان داد که در عمق‌های مشخص‌شده، به خصوص در فواصل مشبک‌کاری شده بین ۲۳۵۳ تا ۲۳۶۱ متر، مقدار CDDP پایین بوده و احتمال بروز مشکل تولید ماسه وجود دارد.

- در لاگ ایجاد شده توسط مدل تک بعدی ژئومکانیکی تغییرات تنش‌های اصلی شامل فشار منفذی، بیشینه تنش افقی، کمینه تنش افقی و تنش عمودی مؤثر را در عمق مشخص نشان می‌دهد. مقادیر ثبت شده از تستهای LOT و RFT در کنار منحنی‌ها قرار گرفته‌اند تا محدوده عملیاتی و رفتار واقعی سنگ را ارزیابی کنند.
- با توجه به شکل و مقادیر مشاهده شده، طبق نظریه اندرسون، رژیم تنش در این سازند تقریباً نرمال است [۲۸]. به این معنا که تغییرات در تولید نفت از سازند و فشار منفذی

خطر تولید ماسه می شود. اما در آزمون های بالاتر، خصوصاً نزدیک به آزمون ۱۹۶ درجه تمرکز تنش ها افزایش یافته و پایداری چاه کاهش می یابد.

• افزایش زاویه انحراف چاه از ۰ تا ۹۰ درجه باعث افزایش تنش های جانبی وارد بر دیواره چاه می شود که این امر ناپایداری مکانیکی و احتمال تولید ماسه را افزایش می دهد. در چاه های با انحراف بالا، مانند چاه مورد بررسی با زاویه ۶۰ درجه، تنش های بیشتری به دیواره وارد شده و ناحیه تولید ماسه گسترده تر می شود. این وضعیت نشان می دهد که طراحی و بهره برداری از چاه های انحرافی نیازمند دقت بیشتری در مدیریت پایداری سازند است، به ویژه در شرایط حفره باز که خطر تولید ماسه بیشتر است.

• در آنالیز حساسیت قطر چاه مشخص شد که با افزایش قطر از ۲.۳۷۵ تا ۸.۵ اینچ، نسبت انرژی موجود به انرژی لازم برای جدا شدن دانه های ماسه افزایش می یابد، که این موضوع جدایش ماسه از دیواره و تولید آن را تسهیل می کند. قطر بزرگتر باعث تمرکز بیشتر تنش در اطراف دیواره شده و در نتیجه پایداری مکانیکی را کاهش می دهد. در مطالعه حاضر، قطر ۵ اینچ بررسی شده که در محدوده ناپایدار از نظر تولید ماسه قرار می گیرد. بنابراین از دیدگاه ژئومکانیکی، استفاده از قطر کمتر می تواند به کاهش احتمال تولید ماسه و افزایش پایداری چاه کمک کند. هر چند در نظر گرفتن عوامل هیدرودینامیکی ممکن است نتایج را بر عکس کند.

• اندازه دانه های ماسه با توجه به آنالیز حساسیت نشان می دهد که هرچه سایز ذرات کاهش یابد میزان محدود تولید ماسه افزایش می یابد. طبق آنالیز حساسیت دانه های ماسه در حدود کمتر از ۱۲۰ میکرومتر موجب افزایش محدود تولید ماسه شده، در حالی که دانه های درشت تر (۲۰۰ میکرومتر و بالاتر) پایداری بیشتری در سازند ایجاد می کنند و این بدان معنی است که در ماسه های مخزن که مخلوطی از ذرات با اندازه ی مختلف است، تولید ذرات با اندازه کمتر از نظر ژئومکانیکی راحت تر است.

• افزایش زاویه جهت حفره مشبک کاری تا حدود ۳۰ درجه موجب کاهش محدوده تولید بدون ماسه می شود. بنابراین، هرچه جهت گیری مشبک کاری فاصله بیشتری از آزمون چاه و جهت پیشینه استرس افقی داشته باشد، پایداری چاه افزایش یافته و محدوده تولید بدون ماسه گسترده تر می گردد.

• نتایج تحلیل ها نشان می دهد که قطر سوراخ های مشبک کاری تأثیر قابل توجهی بر فشار بحرانی ته چاه و میزان تولید ماسه دارد. افزایش قطر مشبک کاری موجب افزایش سطح مقطع و در نتیجه افزایش فشار ته چاه در یک فشار مخزن ثابت می شود، اما هم زمان خطر ناپایداری سازند و تولید ماسه را افزایش می دهد. در مقابل، قطرهای کوچکتر باعث افت فشار بیشتر و کاهش ورود ماسه به چاه شده و پایداری سازند را بهبود می بخشد. بنابراین، انتخاب بهینه قطر مشبک کاری باید به گونه ای باشد که تعادلی بین حفظ فشار مناسب و جلوگیری از تولید ماسه برقرار شود.

• افزایش مقاومت فشاری تک محوره از ۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰ psi تأثیر مستقیمی بر تولید ماسه دارد. در مقادیر پایین تر از ۲۵۰۰ psi، احتمال ناپایداری چاه و تولید ماسه به شدت افزایش می یابد. در UCS برابر ۱۷۵۰ psi، کل ناحیه بررسی شده ناپایدار شده و تولید ماسه در تمام محدوده رخ می دهد. برای حفظ مقاومت فشاری سنگ و جلوگیری از تضعیف ساختار آن، باید تزریق سیال فشار بالا، اسیدکاری و افزایش فشار ته چاهی با دقت انجام شود و از حفر چاه در مناطق با آبدهی قوی پرهیز گردد.

۸. پیشنهادات

با توجه به اینکه تحلیل های حساسیت در این پژوهش صرفاً مبتنی بر پارامترهای ژئومکانیکی سازندی انجام شده و اثرات سیال و پدیده های هیدرومکانیکی لحاظ نشده اند، پیشنهاد می شود در مطالعات آتی از نرم افزارها یا روش هایی استفاده شود که امکان مدل سازی هم زمان رفتار مکانیکی سازند و جریان سیال را فراهم می کنند. چنین رویکردی می تواند درک دقیق تری از تعامل بین فشار سیال، تنش های مؤثر و پتانسیل تولید ماسه ارائه داده و به بهینه سازی راهکارهای تکمیل چاه کمک نماید. همچنین پیشنهاد می شود مدل سازی های انجام شده در این تحقیق به میادین دیگری با ویژگی های زمین شناسی متفاوت تعمیم داده شود. این اقدام علاوه بر سنجش قابلیت تطبیق مدل، می تواند به توسعه بانک دانش ژئومکانیکی و ارتقاء توان تصمیم گیری در پروژه های مشابه کمک کند.

۹. فهرست نماد

نماد	واحد	شرح	نماد	واحد	شرح
CDDP	<i>Psi</i>	افت فشار بحرانی	DT_C	$\mu s/m$	زمان گذر موج فشاری
UCS	<i>Mpa</i>	نیرو	E_S	<i>GPa</i>	مدول الاستیک استاتیک
Depth	m^2	سطح اعمال نیرو	Sh_{MIN}	<i>MPa</i>	بیشینه تنش افقی
σ	<i>Mpa</i>	تنش	Sh_{MAX}	<i>MPa</i>	کمینه تنش افقی
E	<i>Mpa</i>	مدول یانگ	α	-	ضریب بایوت
γ	-	ضریب پواسون	P_p	<i>MPa</i>	فشار منفذی
H-B* Constant	<i>Meter</i>	پارامتر مدل هوک-براون	ϵ_x	-	کرنش تکتونیکی در راستا x
Length	<i>mm</i>	طول مغزه	ϵ_y	-	کرنش تکتونیکی در راستا y
Diameter	<i>mm</i>	قطر مغزه	S_v	<i>MPa</i>	تنش برجا
ϵ_A	<i>Mpa</i>	کرنش محوری	k_g	<i>GPa</i>	حجمی دانه سنگ
ϵ_L	<i>Mpa</i>	کرنش جانبی	K_b	<i>GPa</i>	حجمی توده سنگ سنگ
$\Delta\sigma$	<i>Mpa</i>	تغییرات تنش	g	m/s^2	شتاب گرانش
p_R	<i>Psi</i>	فشار مخزن	p_h	<i>MPa</i>	گرادیان فشار هیدرواستاتیک
G	<i>GPa</i>	مدول برشی	p_w	<i>Psi</i>	فشار ته چاهی
K	<i>GPa</i>	مدول حجمی	Δt	$\mu s/m$	زمان عبور(سفر)
ρ	kg/m^3	چگالی	n	-	توان ایتون
V_S	m/s	سرعت موج برشی	pg	kg/m^3	گرادیان فشار هیدرواستاتیک
U	<i>Mpa</i>	مقاومت مؤثر سازند	c	<i>MPa</i>	ضریب چسبندگی
S_{t2}	<i>MPa</i>	تنش مماسی حداکثر	θ	°	زاویه اصطکاک داخلی
r_w	μm	شعاع چاه حفرشده	σ_f	<i>MPa</i>	استرس نرمال
r_g	μm	شعاع دانه ماسه	τ_f	<i>MPa</i>	تنش برشی
$E_{available}$	N/m^2	انرژی ذخیره شده در ناحیه اطراف دانه	TWC	<i>Mpa</i>	مقاومت آزمایش سیلندر دیواره ضخیم
$E_{required}$	N/m^2	انرژی مورد نیاز برای جدا کردن دانه ماسه	$CBHFP$	<i>Psi</i>	فشار جریان بحرانی چاهی بدون تولید ماسه ته
			μ	-	ضریب اصطکاک

۱۰. مراجع

- [11] Tokhmechi, B., New approaches in 3D geomechanical earth modeling. *Journal of Petroleum Geomechanics*, 2019. 3(1): p. 45-64. DOI:10.22107/JPG.2019.88410
- [12] Isehunwa, S. and O. Olanrewaju, A simple analytical model for predicting sand production in a Niger Delta oil field. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2010. 2(9): p. 4379-4387.
- [13] Yeow, L.-M., et al. Sand production prediction study using empirical and laboratory approach for a multi-field gas development. in *SPE Asia Pacific Conference on Integrated Modelling for Asset Management*. 2004. SPE. DOI:10.2118/87004-MS
- [14] Subbiah, S.K., et al., Root cause of sand production and methodologies for prediction. *Petroleum*, 2021. 7(3): p. 263-271 <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2020.09.007>
- [15] Bratli, R.K. and R. Risnes, Stability and failure of sand arches. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1981. 21(02): p. 236-248. <https://doi.org/10.2118/8427-PA>
- [16] Yi, X., Numerical and analytical modeling of sanding onset prediction. 2003: Texas A&M University. <https://hdl.handle.net/1969.1/369>
- [17] Papamichos, E. and K. Furui, Analytical models for sand onset under field conditions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019. 172: p. 171-189. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.09.009>
- [18] Bradford, I., et al. Benefits of assessing the solids production risk in a North Sea reservoir using elastoplastic modelling. in *SPE/ISRM rock mechanics in petroleum engineering*. 1998. SPE. <https://doi.org/10.2118/47360-MS>
- [19] Sheikholeslam, A., et al., Analytical Evaluation of Sand Production Process for Oil and Gas Wells in the Asmari Reservoir of the Ahwaz Field. *Journal of Petroleum Geomechanics*, 2024. 6(4): p. 25-50. [10.22107/jpg.2023.408338.1203](https://doi.org/10.22107/jpg.2023.408338.1203)
- [20] Vijouyeh, A.G., M.H. Sedghi, and D.A. Wood, Prediction of wellbore sand production potential from analysis of petrophysical data coupled with field stress: a case study from the Shah-Deniz gas field (Caspian Sea Basin). *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2024. 14(3): p. 761-784. DOI:10.1007/s13202-023-01738-8
- [21] Khdersolh, H. and B. Soleimani, Reservoir Characteristics and Geomechanical Parameters Derived from Dipole Sonic log in the Asmari
- [1] Tyiasning, S. and D. Cooke, Anisotropy signatures in the Cooper Basin of Australia: Stress versus fractures. *Interpretation*, 2016. 4(2): p. SE51-SE61. <https://doi.org/10.1190/INT-2015-0131.1>
- [2] Adil Issa, M., F. Ali Hadi, and R. Nygaard, Coupled reservoir geomechanics with sand production to minimize the sanding risks in unconsolidated reservoirs. *Petroleum Science and Technology*, 2022. 40(9): p. 1065-1083. DOI:10.1080/10916466.2021.2014522
- [3] Willson, S., et al. New model for predicting the rate of sand production. in *SPE/ISRM rock mechanics conference*. 2002. SPE. DOI:10.2523/78168-MS
- [4] Qatari, A. A Workflow to Estimate Critical Drawdown Pressure Utilizing 1-D Geomechanics Modelling. in *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference*. 2023. SPE. <https://doi.org/10.2118/213325-MS>
- [5] Mohamad-Hussein, A. and Q. Ni, Numerical modeling of onset and rate of sand production in perforated wells. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2018. 8(4): p. 1255-1271.
- [6] Al-Wardy, W. and O.P. Urdaneta. Geomechanical modeling for wellbore stability during drilling Nahr Umr shales in a field in petroleum development Oman. in *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*. 2010. SPE. DOI:10.2118/138214-MS
- [7] Al-Ruwaili, S.B. and O. Chardac. 3D model for rock strength & in-situ stresses in the Khuff formation of Ghawar field, methodologies & applications. in *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference*. 2003. SPE. <https://doi.org/10.1007/s13202-022-01577-z>
- [8] Dudley, J.W., A. van der Linden, and G.F. Mueller. Geomechanical modelling of a pore collapsing carbonate: Compaction and subsidence of a field in Oman. in *International Petroleum Technology Conference*. 2005. IPTC. <https://doi.org/10.2118/197308-MS>
- [9] Qiu, K., et al. Geomechanics enables the success of horizontal well drilling in Libya: A case study. in *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*. 2008. SPE. <https://doi.org/10.2118/111384-MS>

[۱۰] علامه، م. ا. رمضان زاده، ب. تخم چی، مدل سازی ژئومکانیکی

یک بعدی در یکی از چاه های میدان لالی مخزن آسماری (مطالعه

موردی)، دومین کنفرانس ملی داده کاوی در علوم زمین، ۱۴۰۰.

<https://civilica.com/doc/982959/>

- Rep 15, 10182 (2025). doi.org/10.1038/s41598-025-94764-x
- [35] Liu, Liming, et al. "Investigation of the CO₂ Pre-Fracturing Mechanism for Enhancing Fracture Propagation and Stimulated Reservoir Volume in Ultra-Deep Oil Reservoirs." *Energies* 2024: 96. doi.org/10.3390/en18010096
- [36] Mahdi, Doaa Saleh, and Ayad A. Alhaleem A. Alrazzaq. "Prediction of Uniaxial Compressive Strength of Sandstone Formations Using Artificial Neural Network." Paper presented at the Asia Pacific Unconventional Resources Symposium, Brisbane, Australia, November 2023. doi: <https://doi.org/10.2118/217293-MS>
- [37] Yagiz, Saffet. "Predicting uniaxial compressive strength, modulus of elasticity and index properties of rocks using the Schmidt hammer." *Bulletin of engineering geology and the environment* 68 (2009): 55-63. DOI:[10.1007/s10064-008-0172-z](https://doi.org/10.1007/s10064-008-0172-z)
- [38] Fuller, J., et al. "Balancing productivity and sanding risk in weak sandstones through a size dependent approach." ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. ARMA, 2017.
- [39] Huang, Hao Yong, et al. "Study of the Effect of Borehole Size on Wellbore Stability." *Applied Mechanics and Materials* 574 (2014): 214-218. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.574.214>
- [40] Araki, Naoto, and Nobuo Morita. "Quantitative analysis of the effect of perforation interaction on perforation stability using the finite element method." *SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control*. SPE, 2020. <https://doi.org/10.2118/199328-PA>
- [41] Wong, Teng-fong, Christian David, and Wenlu Zhu. "The transition from brittle faulting to cataclastic flow in porous sandstones: Mechanical deformation." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 102.B2 (1997): 3009-3025. <https://doi.org/10.1029/96JB03281>
- [42] Nemati, N., K. Ahangari, K. Goshtasbi and R. Shirinabadi (2024). "An investigation of the effect of drawdown pressure on sand production in an Iranian oilfield using a hybrid numerical modeling approach." *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* 14(4): 1017-1033. DOI:[10.1007/s13202-024-01751-5](https://doi.org/10.1007/s13202-024-01751-5)
- [43] سمیعی، ی.، et al.، ساخت و اعتبارسنجی مدل ژئومکانیکی در ماسه سنگ های سست سازند آسماری با استفاده از داده های لاگ و آزمایشگاهی جهت استفاده در پیش بینی تولید ماسه، اولین کنفرانس بین المللی ژئوانرژی و پنجمین کنفرانس ملی ژئومکانیک نفت ۱۴۰۳. <https://civilica.com/doc/2475285/>
- Formation, Ramshir Oil field, SW Iran. *Journal of Petroleum Research*, 2019. 29(98-2): p. 84-99.
- [22] Bjorlykke, K., et al., Introduction to Geomechanics: stress and strain in sedimentary basins. *Petroleum Geoscience: from sedimentary environments to rock physics*, 2010: p. 281-298. [10.22078/pr.2019.3377.2552](https://doi.org/10.22078/pr.2019.3377.2552)
- [23] Kearey, P., M. Brooks, and I. Hill, An introduction to geophysical exploration. Vol. 4. 2002: John Wiley & Sons.
- [24] Ganat, T.A.-A.O., Fundamentals of reservoir rock properties. 2020: Springer. [10.1007/978-3-030-28140-3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-28140-3)
- [25] Han, Y., et al. Advanced wellbore stability analysis for drilling naturally fractured rocks. in SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference. 2019. SPE. DOI:[10.2118/195021-MS](https://doi.org/10.2118/195021-MS)
- [26] Amani, A. and K. Shahbazi, Prediction of rock strength using drilling data and sonic logs. *International Journal of Computer Applications*, 2013. 81. DOI:[10.5120/13982-1986](https://doi.org/10.5120/13982-1986)
- [27] Zoback, M.D., Reservoir geomechanics. 2010: Cambridge university press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511586477>
- [28] Anderson, E.M., The dynamics of faulting. *Transactions of the Edinburgh Geological Society*. 8: p. 387 - 402. DOI:[10.1144/transed.8.3.387](https://doi.org/10.1144/transed.8.3.387)
- [29] Bourne, S.J. and E.J. Willemse, Elastic stress control on the pattern of tensile fracturing around a small fault network at Nash Point, UK. *Journal of Structural Geology*, 2001. 23(11): p. 1753-17. DOI:[10.1016/S0191-8141\(01\)00027-X](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(01)00027-X)
- [30] Palmer, I., et al. Predicting and managing sand production: A new strategy. in SPE Annual Technical Conference and Exhibition? 2003. SPE. DOI:[10.2523/84499-MS](https://doi.org/10.2523/84499-MS)
- [31] Wu, B. and C. Tan. Relationship between thick-walled cylinder and unconfined compressive strength for application in sanding prediction. in ARMA North America Rock Mechanics Symposium. 2000. ARMA.
- [32] Zhang, J., W. Standifird, and X .Shen. Optimized perforation tunnel geometry, density and orientation to control sand production. in SPE European Formation Damage Conference and Exhibition. 2007. SPE. <https://doi.org/10.2118/107785-MS>
- [33] Ashtiani Abdi, H. and W. Alward. Role of Geomechanical Modeling and Analysis in Sand Management and Control. in SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference. 2023. SPE. <https://doi.org/10.2118/213368-MS>
- [34] Zhang, Y., Tian, Y., Sun, L. et al. Research and application of rock fracturing pressure prediction method for deep oil reservoirs. *Sci*