

مقاله پژوهشی

ارزیابی تحلیلی فرایند تولید ماسه در چاه‌های نفت و گاز مخزن آسماری میدان اهواز

علی شیخ‌الاسلام^۱؛ سید محمداسماعیل جلالی^{۲*}؛ احمد رمضان‌زاده^۲؛ حسن شجاعی^۳
۱- دانشجوی دکترای تخصصی، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود
۲- استاد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود
۳- کارشناس ارشد، اداره مهندسی زمین‌شناسی، شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۰۱ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۲۹
شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/JPG.2023.408338.1203

واژگان کلیدی	چکیده
تولید ماسه، افت فشار بحرانی، مخزن آسماری، نرم‌افزار تکلاگ (Techlog)	به دلیل اهمیت مشکل تولید ماسه در مخازن هیدروکربوری ماسه‌سنگی، در این تحقیق به ارزیابی لایه‌های سازند آسماری میدان اهواز در چاه شماره ۴۶۹ از منظر علل و ظرفیت بالقوه تولید ماسه و آرایه راهکار مناسب برای کاهش آن از دیدگاه ژئومکانیکی پرداخته شده است. ارزیابی، با استفاده از نرم‌افزار Techlog صورت گرفته است. پارامترهای مورد نیاز برای ساخت مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی مخزن از داده‌های موجود برآورد شده‌اند. معیار شکست موهر-کلمب با در نظر گرفتن اثر مقیاس برای حفره‌های مشبک‌کاری شده (Perforated) در شرایط تنش غیر هیدرواستاتیک در نظر گرفته شده است. پس از ساخت مدل یک‌بعدی، نمودار افت فشار بحرانی (CDDP) در دو حالت چاه باز (Open Hole) و با حفره مشبک‌کاری شده ترسیم شده و نواحی مستعد تولید ماسه مشخص شده‌اند. لایه M2 به دلیل سستی، تخلخل و تراوایی چندین برابری نسبت به دیگر لایه‌ها، به عنوان یکی از مستعدترین نواحی تولید ماسه برای تحلیل حساسیت روی پارامترهای موثر انتخاب شده و تحلیل حساسیت بر اساس هندسه چاه، قطر غالب دانه‌های ماسه، شرایط تنش‌های میدانی و ویژگی‌های حفره مشبک‌کاری شده صورت گرفته است. با اندازه قطر غالب ۲۰۰ میکرون برای ماسه‌های سازندی در ناحیه محتمل برای تولید ماسه، تحلیل حساسیت در چاه باز و حفره مشبک‌کاری شده، به ترتیب، در عمق ۲۸۲۲ و ۲۸۳۷ متری صورت گرفته است. فشار بحرانی ته چاهی (CBHP) و فشار بحرانی مخزن (CRP) در حفره مشبک‌کاری شده در راستای تنش افقی حداکثر با قطر حفره ۰٫۴ اینچ، به ترتیب، ۱۸۹۸ و ۲۷۳۵ و در راستای عمود بر آن با قطر حفره ۰٫۳ اینچ، به ترتیب، ۸۶۱ و ۲۱۱۵ پوند بر اینچ مربع برآورد شده‌اند. با تعریف و تعیین زوایای انحراف انتقالی (TDA)، انحراف ایمن حداقل (MSDA) و جهت حفره بحرانی (CPOA) از روی تحلیل‌های حساسیت، روش طراحی نوینی برای عملیات مشبک‌کاری در مخازن درگیر با پدیده تولید ماسه آرایه شده است.

۱. پیش‌گفتار

محدوده وسیع‌تری از شرایط توسعه بخشید تا به کمک آن‌ها بتوان به بینشی از روابط علت و معلولی در چنین مباحث پیچیده‌ای دست پیدا کرد. استفاده از روش تحلیلی، ساده، سریع و همراه با محدودیت‌هایی است و تنها برای پیش‌بینی شروع تولید ماسه مناسب است که شامل محاسبه تنش در دیواره «سوراخ» (چاه و حفره مشبک‌کاری شده) است. سازوکار و جنبه‌های مهم فرایند تولید ماسه را می‌توان با این گونه روش‌ها پیش‌بینی نمود. این گونه مدل‌ها اغلب برای شرایطی با یک سازوکار ماسه‌دهی و تحت شرایط ساده شده

به دلیل اهمیت موضوع تولید ماسه، در سال‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای در این زمینه صورت گرفته است. این مطالعات به طور عمده پیرامون موضوع پیش‌بینی یا کمک به فهم مساله تولید ماسه به روش‌های مختلف تجربی، تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی صورت گرفته‌اند. در این مقاله، به بررسی ظرفیت بالقوه تولید ماسه به روش تحلیلی پرداخته شده است. این گونه مدل‌ها به طور خاصی برای اهداف اعتبارسنجی و غربالگری مطالعاتی مفید هستند و می‌توان آن‌ها را برای

دادند [۳]. آنتونیس و همکاران (۱۹۷۶) با بررسی توزیع تنش اطراف حفره و با استفاده از معیار موهر-کلمب به بررسی شروع شکست پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با محدود کردن مقدار کرنش برشی می‌توان معیار ناپایداری به دست آورد [۴]. نوردجرن (۱۹۷۷) برای دخیل کردن اثرات پلاستیسته در تنش‌های موثر بالا در شرایط تخلیه مخزن، با استفاده از تابع تسلیم سهموی برای شکست تراکمی از تحلیل الاستوپلاستیک استفاده کرد. ایشان به امکان قابلیت تبدیل تئوری ارایه شده به معیاری قابل اجرا برای اجتناب از مشکلات تولیدی اشاره کرد [۵]. ریزنس (۱۹۸۲) با تعریف شعاع در این تابع، این مطالعه را از حالت نزدیک به دیواره سوراخ به عمق سازند بسط داد. روش ارایه شده شرایط تنشی را ایده‌آل در نظر می‌گیرد، در نتیجه در شرایط حضور تنش‌های تکتونیک و انحراف چاه نیاز به بررسی‌های دیگر دارد. این روش می‌تواند به عنوان بخشی از روش کامل‌تری باشد [۶].

تعداد معدودی از محققین با استفاده از روش‌های تحلیلی و شبه تحلیلی به مدل‌سازی شدت (نرخ) تولید ماسه پرداخته‌اند [۲]. این مطالعات با مفهوم پایداری قوسی توسط برتلی و همکاران (۱۹۸۱) شروع شدند. آن‌ها دریافتند که مکانیک شکستی که موجب مچاله‌شوندگی است زمانی که ناحیه پلاستیک کلمب به حد هندسی نزدیک می‌شود اتفاق می‌افتد. محدودیت این روش در نادیده گرفتن دیگر تنش‌های افقی تکتونیک، غیر از تنش روباره، بوده است [۷]. گیلیکمن و همکاران (۱۹۹۴) با استفاده از شکست برشی و کششی و به کارگیری موازنه جرم در حل رابطه بین جبهه تسلیم و تولید تجمعی ماسه این مفهوم را توسعه دادند. آن‌ها دریافتند که افزایش تولید سیال همراه با ماسه نه تنها به درون‌ریزی آبی ماسه بستگی دارد بلکه به ناحیه تسلیم اطراف دیواره چاه نیز وابسته است. [۸]. وینگارتن و همکاران (۱۹۹۵)، نتایج برتلی و همکاران [۷] را محافظه‌کارانه قلمداد کردند و مدعی احتمال نادرست بودن فرض جریان در نیم‌کره شدند. آن‌ها دریافتند که در افت فشارهای مشابه، هندسه کروی حفره دارای گرادبان‌های فشاری شدیدتری نسبت به هندسه استوانه‌ای آن است. آن‌ها دو نوع سازوکار شکست برشی و کششی را توسعه دادند و رابطه‌ای بین جریان توده‌ای در شعاع بی‌نهایت و شعاع مشخص ارایه دادند [۹].

هندسی و مرزی مناسب هستند و معمولاً برای برآورده‌سازی نیازهای یک مدل واقع‌بینانه و نزدیک به شرایط میدانی کافی نیستند. مدل‌های تحلیلی و شبه‌تحلیلی در شرایط خاص، مناسب‌تر و راحت‌تر از برخی روش‌ها مانند روش‌های عددی هستند. از طرفی، یک مدل تحلیلی همیشه برای اعتبارسنجی مدل‌های عددی مفید است [۱]. به همین دلیل، امروزه در اکثر نرم‌افزارهای تخصصی نفتی، مانند نرم‌افزار تکلاگ (Techlog) محصول شرکت شلمبرجر (Schlumberger)، بخش ارزیابی تحلیلی برای مدیریت ماسه گنجانده شده است. در این مقاله، ابتدا پیشینه کارهای تحلیلی انجام شده، بررسی و سپس به ارزیابی چاه شماره ۴۶۹ مخزن آسماری میدان اهواز از منظر ظرفیت تولید ماسه با نرم‌افزار «تکلاگ» پرداخته شده است. پس از بررسی مقادیر افت فشار بحرانی^۱ (CDDP) در طول محدوده مخزنی، لایه‌های مستعد تولید ماسه پیش‌بینی شده‌اند. در انتها، از جنبه شرایط هندسی چاه، قطر غالب دانه‌های ماسه، شرایط تنش‌های برجا و برخی ویژگی‌های حفره مشبک‌کاری شده، تحلیل حساسیت روی ۱۰ پارامتر تاثیرگذار صورت گرفته است. با بررسی برخی از اعماق مخزنی با کم‌ترین مقاومت سنگ و بیش‌ترین احتمال تولید ماسه، پیشنهادهایی برای کنترل تولید ماسه در مخزن مورد بررسی نیز ارایه شده است. در ادامه این تحقیق، استفاده از واژه «حفره» به «حفره مشبک‌کاری شده» اشاره دارد.

۲. پیشینه مطالعات

مدل‌های تحلیلی پیش‌بینی تولید ماسه از سال ۱۹۷۰ تاکنون توسط محققین بسیاری توسعه یافته‌اند و در مطالعات زیادی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این مدل‌های تحلیلی همواره با ساده‌سازی‌هایی از جمله در نظر گرفتن معیار شکست موهر-کلمب، توزیع تنش اطراف حفره و روش‌های مشابه پایداری چاه همراه بوده که در عمل متفاوت از ذات پیچیده این پدیده است [۲]. در ادامه به مهم‌ترین آن‌ها پرداخته شده است.

هال و همکاران (۱۹۷۰) از معیار موهر-کلمب به همراه نتایج آزمایشگاهی برای تحلیل شروع ماسه‌دهی و توسعه قوس ماسه استفاده کردند و دریافتند که قوس ماسه در ماسه سست بدون چسبندگی قابل توسعه نخواهد بود. ایشان پیشنهاد به در نظر گرفتن پایداری تنش و پلاستیسته در مطالعات

¹ Critical DrawDown Pressure, CDDP

بی (۲۰۰۳) با رفع محدودیت‌های مدل‌های پیشین، با فرض تقارن محوری سوراخ و تنش‌های وارده، همگن و همسانگرد بودن ویژگی‌های مکانیکی سنگ، تغییر شکل سنگ سازند در شرایط کرنش صفحه‌ای و رفتار الاستیک خطی-پلاستیک کامل ماده با معیار شکست موهر-کلمب، مدل عمومی تری را برای پیش‌بینی شروع تولید ماسه ارایه داد. مدل تحلیلی ایشان، روش الاستیک منفذی و معیار ماسه‌سازی با شکست برشی و روش الاستوپلاستیک منفذی و معیار ماسه‌سازی با شکست کششی را برای هر دو شرایط تنش‌های همسانگرد و ناهمسانگرد ارایه کرد. مدل‌های تحلیلی ارایه شده، هم شکست القایی دیواره سوراخ و هم شکست القایی در راس حفره را در بر می‌گیرند [۱].

هوک و گیلیکمن با تمرکز بر زمان مشکل‌ساز شدن تولید ماسه، به توسعه و عمومی‌سازی مدل‌های پیش‌بینی شروع تولید ماسه گیلیکمن و همکاران [۸]، گیلیکمن و دوسالت [۱۵] و گیلیکمن و همکاران [۱۶] پرداختند که نیاز به تخمین حجم‌ها و نرخ‌های تولید ماسه به صورت تابعی از شرایط فشاری ته چاهی، افت فشار و زمان داشتند. مدل ارایه شده شامل ویژگی‌هایی مانند شکست ماسه دست نخورده، پایداری پس‌شکستی دیواره سوراخ و ویسکوپلاستیسیته غیر وابسته بوده است. هر چند ناحیه زهکشی در میادین خیلی فراتر از ناحیه پلاستیک است، در مطالعات آزمایشگاهی می‌توان آن را به شعاع ناحیه پلاستیک محدود کرد. این ویژگی از قابلیت‌هایی است که در این مدل گنجانده شد [۱۷]. فیچر و همکاران (۲۰۰۴) مدل تحلیلی ساده‌سازی شده‌ای را بر پایه یکی از مدل‌های عددی پاپامپچوس و همکاران [۱۸] برای تولید ادامه‌دار ماسه ارایه دادند که به طور گسترده‌ای موید پیش‌بینی‌های موریتا [۱۰] است. این مدل بر این فرض استوار است که سازوکار محرک برای تولید مداوم ماسه، فرسایش از مواد پلاستیزه شده در مجاورت سوراخ تولید است. مدل ارایه شده گویای این مساله است که ماسه به طور معمول با از هم پاشیدگی تولید می‌شود. تنها در مقیاس زمانی طولانی‌تر است که تولید ماسه به طور ادامه‌دار ظاهر می‌شود. نتایج بیان‌گر وابستگی نرخ ماسه‌دهی به میزان کم‌تر بودن فشار چاه از فشار دیواره چاه بحرانی^۳ (CBHP) تولید ماسه، نرخ جریان سیال و گرانیروی آن و سیمان سنگ هستند. مدل

موریتا (۱۹۹۴) به بررسی دقت مدل‌های مقاومت سازندی مختلف در محث تولید ماسه پرداخت. در کار ایشان از هر دو روش تحلیلی و عددی استفاده شد به طوری که روش عددی، بر خلاف روش تحلیلی، تحت تاثیر داده‌های ورودی و دیگر ساده‌سازی‌های مدل ریاضی با درصد قابل قبولی خطا مواجه بود. داده‌های نادقیق در روش عددی با بررسی پایداری دیواره چاه و تصحیحات لازم در روش تحلیلی با تابع تصحیح بهبود یافتند. تابع تصحیح، با توجه به داده‌های آماری تولید ماسه منطقه‌ای نیاز به پارامترهای مختلفی داشت که خود نیازمند حفر چندین چاه قبل از انجام تحلیل بوده‌اند [۱۰]. بردفورد و همکاران (۱۹۹۶) یک روش ارزیابی مورد اطمینان غیر محتاطانه را برای تولید ماسه توسعه دادند. نتایج با استفاده از مدل مناسب جدید الاستیک-پلاستیک کامل برای داده‌های چاهی محاسبه شدند و داده‌های شکست سازند را برای ایجاد نقشه‌ای از ظرفیت‌های ماسه‌دهی در مخازن اورست (Everest) فراهم کرد [۱۱].

رت و ریزنس (۲۰۰۲) با در نظر گرفتن مسیر تنش^۲ در روابط موجود، مدل‌های کمی را برای پیش‌بینی شکست برشی دیواره چاه در شرایط مخزن تخلیه شده یا تحت فشار قرار گرفته شده توسعه دادند. به دلیل استفاده از مدل‌های الاستیک در تعریف مدل، مدل ارائه شده مدلی محافظه‌کارانه بوده و نیازمند تطابق تاریخچه‌ای با مشاهدات میدانی است که با بررسی تنش‌های برجا در طول تولید قابل بهبود است. این مدل برای هر دو شرایط حفاری فراتعدالی و فروتعدالی و چاه افقی یا قائم مناسب بوده است [۱۲]. ویلسون و همکاران (۲۰۰۲) [۱۳] و پالمر و همکاران (۲۰۰۳) [۱۴] با تقسیم تحلیل به سه بخش مجزای شروع شکست، ماسه‌دهی گذرا و ماسه‌دهی ادامه‌دار، مدل تحلیلی پیش‌بینی تولید ماسه را برای بخش اول ارایه دادند. ویلسون و همکاران مدلی برای پیش‌بینی نرخ تولید ماسه ادامه‌دار توصیف کردند که با مقایسه نتایج آن با نتایج شش چاه در دو میدان مختلف و در شرایط جریانی مختلف اعتبارسنجی شد. از آن جا که این مدل تنها برای تولید ادامه‌دار ماسه است، پیش‌بینی‌های بیش از حد (اغلب با ضریب ۲ تا ۴ بیش‌برآورد کرده است) آن با تولید در نرخ‌های بالاتر در شرایط گذرا در کوتاه مدت قابل چشم‌پوشی است [۱۳].

³ Critical Bottom (Bore) Hole Pressure, CBHP

² Stress path or Stress change ratio

فولر و همکاران (۲۰۱۷) با در نظر گرفتن اثر مقیاس در مدل‌های پیش‌بینی تولید ماسه دریافتند که هرچند پدیده تولید ماسه پدیده‌ای پیچیده و متغیر است که یک روش ساده قادر به پیش‌بینی آن نیست، اثر مقیاس، که نسبت بین اندازه دانه و قطر دیواره سوراخ است، در شکست سازند ماسه‌ای نقش چشمگیری دارد. آن‌ها برای اجتناب از تولید ماسه در افت فشار مورد نظر در طول عمر میدان، از روش‌های متعادل‌سازی انرژی برای تخمین بهترین اندازه حفره استفاده کردند [۲۶]. مقیاس‌بندی اندازه حفره بر پایه روش‌های شکستگی و کمانش پیش‌تر نیز مورد مطالعه بوده است [۲۷].

مدل‌های ساده تحلیلی شروع ماسه‌دهی به مقایسه تنش مماسی در دیواره سوراخ با مقاومت سازند می‌پردازند و نقش مهم تنش برشی و محوری را در نظر نمی‌گیرند. در مطالعه پاپامیچوس و فوری (۲۰۱۸)، سه معیار شکست تحلیلی برای شکست دیواره سوراخ و شروع ماسه‌دهی در شرایط میدانی فرمول‌نویسی شده‌اند که برای تحلیل‌های شروع تولید ماسه و حجم ماسه مناسب هستند. عباراتی برای مقاومت بحرانی سازند، *CDDP* و تخلیه بحرانی^۵ برای شروع فرایند ماسه‌دهی از آن استخراج شدند. نتایج حاصل نشان از رضایت‌بخش بودن نمودارهای شکست ماسه‌ای در ناهمسانگردی‌های تنشی و شرایط تولیدی مختلف در میدان دارد. در نهایت اثر دیواره چاه بر تنش‌های حفره با مقایسه نتایج روش تحلیلی و عددی بررسی شد. بررسی روی چاه باز قایم نشان از موجه بودن فرض کرنش صفحه‌ای در مدل‌های تحلیلی برای محاسبه تنش محوری دارد. به طور مشابه، بررسی چاه جداری و مشبک‌کاری شده موید آشفستگی محدود میدان تنشی اطراف حفره‌ها از دیواره چاه است. فرض عدم آشفستگی در مدل‌های تحلیلی، با توجه به محدود بودن این آشفستگی به ناحیه نزدیک به ورودی حفره توجیه‌پذیر است [۲۸]. پاپامیچوس در مطالعه دیگری (۲۰۱۹) تفاوت بین نتایج مدل‌های آرایه شده را تشریح کرد. مدل دراگر-پراگر به طور رضایت‌بخشی برای ایجاد اثر تنش محوری بر شکست سوراخ مشاهده شده در آزمایشگاه نیاز است، هرچند که نیاز به اعتبارسنجی یک پارامتر عنصری اضافه دارد که با آزمایش‌های منشور توخالی بارگذاری ناهمسانگرد قابل دستیابی است. مدل موهر-کلمب ساده شده چنین اثری رو نشان نمی‌داد در صورتی که مدل

تحلیلی آن‌ها به برآورد پارامتری تاثیرگذار و مرتبط با تولید ماسه، در آزمایشگاه یا از روی داده‌های میدانی، نیاز دارد [۱۹]. در این راستا، فیجر و پاپامیچوس (۲۰۰۸) مدل تحلیلی بهبودیافته دیگری برای نرخ ماسه‌زایی آرایه دادند. با توجه به نوع سنگ، شرایط فشار منفذی و تنش برجا، فشار چاه و نرخ جریان سیال، پیش‌بینی‌ها تفاوت چشمگیری داشتند [۲۰].

سوبیا و همکاران (۲۰۰۸) بر اساس مطالعه پاپاناستازیو [۲۱]، از روش ساده‌ای برای شروع تولید ماسه استفاده کردند که طبق آن، شکست سازند زمانی رخ می‌دهد که تنش مماسی موثر، که به عنوان تنش حلقوی اطراف سوراخ نیز شناخته می‌شود، از مقاومت تک‌محوره سازند بیش‌تر شود. آن‌ها از هر سه تنش میدانی دوردست و جهت تنش برای ارزیابی تکامل تنش حاصل از تخلیه در پیش‌بینی شروع شکست سازند منجر به تولید ماسه استفاده کردند [۲۲].

پاپامیچوس و همکاران (۲۰۱۰) با بررسی آزمایشگاهی پایداری سوراخ در رخنمون ماسه‌سنگی ضعیف با درجات مختلف ناهمسانگردی تنش محوری و جانبی با معیار شکست ون-مایسز مدل تحلیلی را آرایه دادند. مدل آن‌ها برای استفاده در ابعاد میدانی، برای دیواره سوراخ، بسط داده شد و عبارتی برای *CDDP* در تولید ماسه از آن استخراج شد [۲۳].

سوبیا (۲۰۱۴) به چگونگی استفاده از ژئومکانیک در طراحی روش تکمیل چاه، چاه باز^۴ و با جداری همراه با بسته گراولی برای حصول نرخ‌های تولید اقتصادی‌تر بدون ماسه پرداخت. در مطالعه ایشان، تاریخچه ماسه‌دهی چاه به صورت دقیقی پیش‌بینی شد و مشخص گردید که در صورت گذر از یک حد تخلیه، تولید ماسه اتفاق می‌افتد. در مطالعه موردی ایشان، روش تکمیل چاه از نظر هندسی مورد بررسی قرار گرفت تا پایدارترین جهت‌های سوراخ مشخص شوند. [۲۴].

غلامی و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از سه معیار شکست مختلف به تعریف ضریبی بر پایه هندسه چاه برای تخمین حجم تولید ماسه در حین حفاری و تولید پرداختند. نتایج بیان‌گر اهمیت در نظر گرفتن اثر تنش میانی در معیار شکست سه‌بعدی مورد استفاده در پیش‌بینی شکست برشی و حجم تولید ماسه است. با توجه به نیاز به تعیین پارامترهای ژئومکانیکی قبل از تخلیه مخزن، استفاده مستقیم از این روش در ماسه‌زایی حین تولید چالش‌برانگیز است [۲۵].

⁵ Critical depletion, CDEPL or CDP

⁴ Open Hole, OH

غیرخطی ASA نسبت به آن دو معیار بوده است [۳۲]. آن‌ها اعتبار این مدل را با به کار گرفتن آن در مدل‌سازی شکست تدریجی حفره و شکل حاصل از آن و پایدارسازی تنش مربوطه با روش المان محدود به سبک حذف سلولی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی و میدانی ثابت کرده‌اند [۳۳].

به کار گیری توامان دو روش تحلیلی و عددی به طور غیروابسته و اعتبارسنجی آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی و میدانی سطح اطمینان به ارزیابی ماسه‌زایی و تصمیمات مربوطه را بالا خواهد برد. به همین دلیل اسدی و خاکسار (۲۰۲۲) به مقایسه این دو روش در یکی از مخازن ماسه‌ای سست حاوی گاز با نرخ بالای تولید پرداختند. در این مطالعه از مدل الاستیک منفذی با یک ضریب تجربی مقاومت موثر سنگ در روش تحلیلی و از مدل الاستوپلاستیک با معیار شکستی بر پایه حد کرنش بحرانی، در روش عددی استفاده شده است. آن‌ها پس از اعتبارسنجی مدل تحلیلی، به دلایلی همچون سادگی و سرعت تحلیل آن، از این روش برای ارزیابی تولید ماسه در شرایط مختلف فشاری مخزن و در طول عمر آن استفاده کردند و دریافتند که خطر ماسه‌زایی در سازندهای با تخلخل بالا پس از تخلیه مخزن اهمیت بالایی دارد. [۳۴].

به دلیل غیر قابل اطمینان بودن داده‌های میدانی، اعتبارسنجی پیش‌بینی‌های انجام شده برای شروع ماسه‌دهی یا نرخ آن برای میدان کار ساده‌ای نیست. به همین علت پاپامچوس و همکاران (۲۰۲۲) با تمرکز بر اثرات اشباع سیال نمونه‌های آزمایشگاهی و اثرات ناهمسانگردی تنش به بررسی واقع‌بینانه‌ترین حالت ممکن شرایط میدانی در آزمایشگاه پرداختند. آن‌ها مدل شبه‌تحلیلی و مدل عددی المان محدود غیرخطی توسعه‌یافته را با نتایج آزمایشگاهی برای مطالعات پیش‌بینی شروع و حجم-نرخ تولید ماسه تنظیم کردند. روابط، به توابع تولید ماسه وابسته به اشباع سیال و ناهمسانگردی تنش مربوط بوده و توجیه‌کننده رفتار فیزیکی مشاهده شده در آزمایشگاه هستند. مدل‌ها برای تحلیل‌های موردی میدانی با مطالعات پارامتری روی پارامترهای عملیاتی و روش کنترلی مختلف مقایسه شدند که نشان از اهمیت اشباع سیال و ناهمسانگردی تنش در مقیاس‌افزایی از داده‌های آزمایشگاهی به میدانی دارد. مقایسه پیش‌بینی‌ها نشان از ثبات نسبی در پیش‌بینی شروع تولید ماسه دارد. در حالی که نتایج حجم و

موهر-کلمب عادی تنها در تنش‌های محوری بالا این اثر را ایجاد می‌کند. مدل‌ها شامل یک پارامتر ناهمسانگردی تنش جانبی و یک ضریب اعتبارسنجی میدانی برای تقریب بهتر داده‌های آزمایشگاهی یا میدانی نیز هستند [۲۹].

انتخاب روش و فناوری مناسب کلید پیش‌بینی، تحلیل و حل دقیق مساله تولید ماسه است. به همین منظور سوبیا و همکاران (۲۰۲۰) به ارزیابی برخی روش‌های ساده تحلیلی و مدل‌های پیشرفته عددی المان محدود قابل استفاده برای طراحی روش کنترل تولید ماسه در طول فرآیند پرداختند. آن‌ها دریافتند اگر چه روش‌های المان محدود بهترین روش برای حل مساله هستند، انتخاب روش مناسب باید بر اساس میزان خطر و اهمیت پدیده تولید ماسه صورت گیرد [۳۰]. با این حال، نیاز به یک تحلیل ژئومکانیکی مناسب به منظور بهینه‌سازی و انتخاب روش تکمیل چاه مشهود است. در این فرایند استفاده از مدل ساختاری شکست مناسب و توانمند برای مدل‌سازی شروع شکست و پس‌شکست ماده بسیار مهم است. در حال حاضر اغلب معیارهای شکست توان در نظر گرفتن تمام طیف‌های تکامل تنش و کرنش مانند پس‌شکست ماده را ندارند. سوبیا و همکاران (۲۰۲۱) مدل ساختاری الاستوپلاستیک جدیدی به نام ASA^* را با کمک نتایج آزمایشگاهی برای عناصر ضعیف توسعه دادند که با استفاده از یک تساوی، نرم‌شوندگی و سخت‌شوندگی عنصر را در نظر گرفته و این ضعف رو پوشش می‌دهد. با مقایسه مدل ارزیابی شده با معیار موهر-کلمب بهتر بودن نتایج مدل جدید در ارضا تمام رفتار الاستوپلاستیک، مانند رفتار پس‌شکست، اثبات شد و معیار موهر-کلمب معیاری محافظه‌کارانه قلمداد شد. در نتیجه مدل ساختاری جدید به کمک تساوی منفردی قادر به ارضا تمام طیف‌های تکامل تنش کرنشی غیرخطی بوده و در مقایسه با معیار شکست معمول برتری دارد [۳۱]. در پدیده تولید ماسه که به طور معمول در تنش‌های موثر متوسط بالا روی می‌دهد انتخاب چنین معیار شکست غیرخطی با قابلیت در نظر گرفتن پایدارسازی شکست حاصل از آزادسازی تنش، کلید ارزیابی خطر ماسه‌زایی برای بهینه‌سازی است. سوبیا و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه دیگری نتایج مدل ارزیابی شده را برای سنگ‌های سست ماسه‌ای با معیارهای شکست موهر-کلمب و دراکر-پراگر مقایسه کردند که موید بهتر بودن مدل

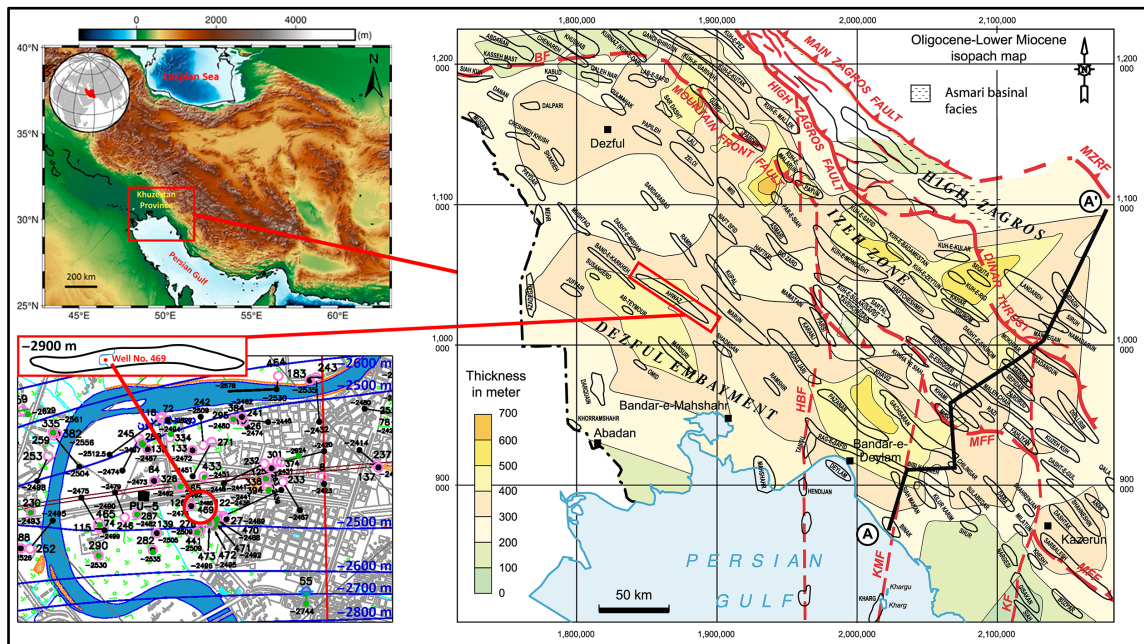
⁶ *Assef-Surej-Ariffin, ASA*

مخزن شامل ۱۱ لایه (A1-A11) است که به لایه‌های A8 و A9 اصطلاحاً لایه M2 گفته می‌شود؛ لایه M2 مهم‌ترین لایه مخزنی شامل حدود ۳۰ درصد از کل ذخیره مخزن است [۳۹]. ستون‌های ۱ تا ۳ از شکل ۲ عمق این لایه‌ها را به همراه ستون سنگ‌شناسی متناظر آن‌ها نشان می‌دهد. در قاعده رسوبات این توالی ماسه‌سنگ‌های بسیار دانه‌ریزی وجود دارند که به دلیل استحکام ضعیف سبب از هم پاشیده شدن مغزه‌ها شده‌اند [۳۸]. هفت بخش بالایی آسماری (A1-A7) شامل رسوبات اغلب کربناتی و میان‌لایه‌های ماسه‌سنگی و شیلی است. در حالی که رسوبات بخش‌های عمیق‌تر سازند (M2-A11) سیلیسی کلاستی و همراه با لایه‌های ماسه‌سنگی و شیل است. دو لایه A6 و M2 دارای بیش‌ترین حجم فواصل ماسه‌سنگی هستند، در نتیجه بیش‌ترین حجم تولید هیدروکربور از این دو لایه است [۳۹]. این دو لایه بیش‌تر دارای ماسه سست با تخلخل بین دانه‌ای زیاد با اندازه دانه‌های بین ۰٫۲ تا ۰٫۵ میلی‌متر با جورشدگی ضعیف تا متوسط در بخش شرقی هستند؛ ماسه‌های ریزتر زاویه‌دار بوده و گردشگی ضعیفی دارند و ماسه‌های درشت‌تر نیمه‌گردشده تا گردشده هستند [۳۸]. در گزارش‌های اخیر، لایه‌های A5، A4 و M2 مشکل‌سازترین لایه‌های تولیدی از منظر تولید ماسه در شرق میدان هستند [۴۰]. علت اصلی سست بودن ماسه‌ها همچنان مبهم است اما سیمانی نشدن آن‌ها محتمل‌تر از انحلال ثانویه سیمان بین آن‌ها است. در کل حدود ۵۰ درصد از ذخیره نفت مخزن در دو لایه A6 و M2 و ۸۰ درصد از ذخیره گازی مخزن در لایه‌های A1 و A2 متمرکز است [۳۹]. با توجه به مطالعات صورت گرفته، ناحیه قرار گرفته در اطراف قوس رودخانه کارون به عنوان ناحیه با بیش‌ترین احتمال ماسه‌دهی در نظر گرفته شده است. به دلیل پراکندگی داده‌های موجود در دسترس در این ناحیه، چاه قائم شماره ۴۶۹ به دلیل داشتن مجموعه داده‌های مورد نیاز کافی و قرار گرفتن در مرکزیت این ناحیه از لحاظ موقعیت مکانی انتخاب شده است. در این چاه، مخزن آسماری به ضخامت حدود ۴۴۱ متر در حد فاصل عمق ۲۵۰۹ تا ۲۹۵۰ متر قرار دارد [۴۰]. موقعیت میدان اهواز در فروافتادگی دزفول و محل تقریبی چاه شماره ۴۶۹ در این میدان در شکل ۱ نشان داده شده است (ضخامت رسوبگذاری در نقشه هم‌ضخامت مربوط به محدوده زمان زمین‌شناسی الیگوسن-میوسن پایینی است).

نرخ، سطح ثابتی را نشان نداده‌اند که بیان‌گر اثر متفاوت نوع مدل روی میزان پیش‌بینی‌ها است. این تفاوت در نتایج، نیاز به تمرکز روی دلایل موجود پشت این اختلاف‌ها و چگونگی بهبود این مدل‌ها را نشان می‌دهد. ثبات بهتر نتایج، اطمینان بیش‌تری در پیش‌بینی‌های میدانی حاصل می‌کند [۳۵]. با فراگیر شدن و بهبود روزافزون روش‌های یادگیری ماشین در سال‌های اخیر، استفاده از این روش‌ها و بهینه‌سازی آن‌ها در رابطه با موضوع تولید ماسه عصر جدیدی از مطالعات این پدیده را ایجاد می‌کند. سوبیا و همکاران (۲۰۲۲) با ترکیب این روش‌ها و داده‌های دریافتی در محل چاه، طرحی را برای پیش‌بینی آینده تولید جامدات از آن به ثبت رسانده‌اند. در این طرح، پس از قرار گرفتن دیواره ابزار مربوطه در تماس با سیال مخزنی، داده‌های سری زمانی به عنوان ورودی به یک مدل یادگیری ماشین آموزش داده شده برای پیش‌بینی وقوع این پدیده در آینده پردازش می‌شوند و در نهایت این طرح زمان وقوع چنین پدیده‌ای را پیش‌بینی خواهد کرد [۳۶].

۳. معرفی محدوده انجام مطالعات

میدان نفتی اهواز، بزرگ‌ترین میدان نفتی ایران و سومین میدان نفتی بزرگ جهان است که در حوضه زاگرس و ناحیه فروافتادگی دزفول در زیر شهر اهواز واقع شده است و دارای نفت با درجه API برابر با ۳۲٫۶ است [۳۷]. این میدان از شمال و غرب با میداین مارون و رامین، از جنوب با میداین شادگان و منصوری و از شرق با میداین آب‌تیمور و سوسنگرد مجاور است [۳۸]. در عمق ۲۵۰۰ متری از سطح دریا در میدان اهواز، سرسازند آسماری واقع می‌شود که دارای ساختمان تاقدیسی با روند شمال غربی-جنوب شرقی به موازات رشته کوه زاگرس، ۶۷ کیلومتر طول، ۴ الی ۶ کیلومتر عرض، به طور متوسط ۴۰۰ متر ضخامت، و عموماً شیب ۵ تا ۱۰ درجه است [۳۹]. این تاقدیس در افق آسماری به صورت دو تاقدیس مجزا (زین اسبی) در می‌آید (شرقی و غربی) [۳۸]. در این میدان بخش ماسه‌سنگی حدود ۵۰ درصد ستون سنگی را تشکیل می‌دهد و به طرف شرق و جنوب شرق نازک می‌شود در نتیجه حدس بر این است که منشا ماسه‌ها باید از جنوب بوده باشد. قطر دانه‌های کوارتز به ندرت از ۲ میلی‌متر تجاوز می‌کنند و اغلب در دامنه ماسه متوسط تا ریز قرار گرفته و گرد شده تا زاویه‌دار هستند [۳۹].



شکل ۱. موقعیت میدان اهواز در فروافتادگی دزفول و چاه شماره ۴۶۹

۴. تعیین پارامترها و برآورد مقادیر آن‌ها

مدل‌سازی یک‌بعدی ژئومکانیکی در پنج بخش مجزا آورده شده است. برخی از داده‌های مورد نیاز در این تحقیق با توجه به داده‌های موجود برآورد شده‌اند. شکل ۲، نمای نموداری این داده‌ها را در طول ناحیه مخزنی نشان داده است. در ادامه به روابط مربوط به برآوردها در هر بخش پرداخته شده است.

۱.۴. برآورد مقادیر پارامترهای مکانیکی سنگ

برای انجام محاسبات ژئومکانیکی نیاز به مقادیر استاتیکی پارامترهای مکانیکی سنگ است که با توجه به عدم در اختیار داشتن مغزه سالم در قالب این تحقیق ممکن نبوده است. با فرض سازند الاستیک همگن و همسانگرد می‌توان ابتدا مقادیر دینامیکی این پارامترها را از روابط موجود مبتنی بر سرعت یا زمان عبور موج‌های فشاری و برشی به همراه چگالی سنگ سازند اندازه‌گیری شده با ابزارهای چاه‌نگاری برآورد کرده و سپس با روابط تجربی موجود، مقادیر دینامیکی را به استاتیکی تبدیل کرد. با محاسبه دو پارامتر دینامیکی از روی داده‌های چاه، دو پارامتر دیگر را می‌توان با استفاده از روابط موجود بین پارامترهای مکانیکی سنگ محاسبه کرد [۴۱]:

$$G_d = 92903.04 \frac{\rho_b}{DTSM^2} \quad (1)$$

$$K_d = 92903.04 \frac{\rho_b}{DTCO^2} - \frac{4}{3} G_d \quad (2)$$

به طور معمول نسبت پواسون استاتیکی را با ضربی خطی از مقدار دینامیکی آن می‌توان تخمین زد. با توجه به اهمیت بخش‌های سست سازند آسماری در این تحقیق و مقادیر به نسبت بالاتر این نسبت در سنگ‌های سست [۴۱]، ضرب ۱/۳۵ برای این تبدیل در ناحیه محتمل برای تولید ماسه در نظر گرفته شده است [۴۰]:

$$\theta_s = 1.35 \theta_d \quad (3)$$

از آن جا که مقاومت مکانیکی سنگ‌ها، به خصوص در محیط متخلخل با تخلخل بالا غیر وابسته به سرعت صوت است، نمودارهای صوتی مرسوم در برآورد مقادیر پارامترهای مکانیکی سنگ در مقایسه با آزمون‌های آزمایشگاهی نتایج نامناسبی ارائه می‌دهند [۴۲]. معادله فولر یکی از معتبرترین روابط تجربی آزمایشگاهی برای برآورد مدول یانگ استاتیکی بر اساس مدول یانگ دینامیکی در سنگ‌های ماسه‌سنگی است [۴۳]:

$$E_s = 0.032 E_d^{1.632} \quad (4)$$

ستون‌های ۴ و ۵ از شکل ۳ مقادیر برآورد شده پارامترهای استاتیکی مکانیکی سنگ را نشان می‌دهند.

برای تعیین تصحیحی برای مقاومت سنگ تعیین کرد. از مقاومت سنگ تصحیحی به همراه یک معیار شکست برای پیش‌بینی شرایطی که تحت آن انتظار تولید آوار از سنگ سازند می‌رود استفاده شد. نتایج این پیش‌بینی برای بررسی پایداری دیواره چاه در هنگام حفاری یا بهینه‌سازی پارامترهای تولید برای یک مخزن هیدروکربنی قابل استفاده است [۲۱]:

$$UCS_{app} = 2 UCS_{ucs} \left(\frac{D_{perf}}{D_{gr}} \right)^{-n} \quad (6)$$

بر اساس داده‌های برازش شده و نوع محاسبات در مطالعه ایشان، پارامترهای برازشی a_{ucs} و n به ترتیب، ۱۶۱۰۶۴ و ۰٫۳۳۷۴ تعیین شده‌اند. با محاسبه و قرار دادن مقاومت فشاری تک‌محوره تصحیح یافته در معیار شکستی که از مقاومت فشاری تک‌محوره استفاده می‌کند و بهینه‌سازی ریاضی استاندارد، می‌توان برآورد بهتری از بیش‌ترین مقاومت سنگ سازند، و در نتیجه بیش‌ترین افت فشار کرد [۲۱].

مقدار مقاومت کششی را می‌توان کسری از مقدار مقاومت فشاری تک‌محوره برآورد کرد [۴۵]. در این مطالعه، این کسر برابر با ۰٫۰۸ در نظر گرفته شده است [۴۰]:

$$T = 0.08 UCS \quad (7)$$

در ستون ۷ از شکل ۳، مقادیر برآورد شده پارامترهای مقاومتی نشان داده شده است.

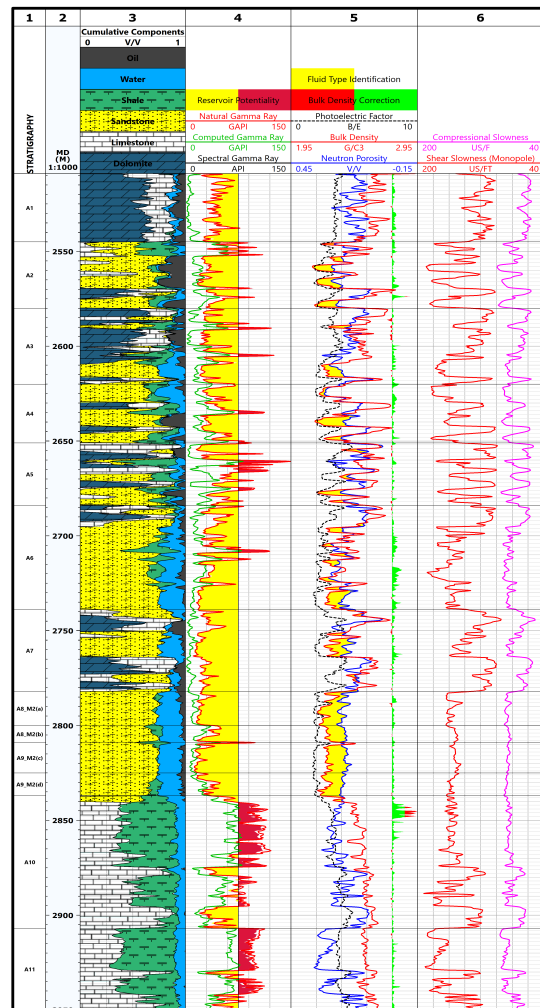
۳.۴. برآورد مقادیر فشار منفذی و تنش‌های برجا

در سازند آسماری میدان اهواز به دلیل ماسه‌ای، متخلخل و تراوا بودن مخزن می‌توان شرایط فشار منفذی را هیدرواستاتیک در نظر گرفت [۴۶]. با توجه به نتایج موجود ابزار آزمون گر بخشی دینامیک سازند در ناحیه مخزنی [۴۰]، گرادیان فشاری ۰٫۴۳۲ پوند بر اینچ مربع (پام) بر فوت، انطباق خوبی با مقادیر برجا فشار منفذی دارد (ستون ۸ از شکل ۳):

$$P_p = 0.02262 TVD \nabla P \quad (8)$$

برای محاسبه تنش قائم در چاه مورد نظر لازم است چگالی سنگ‌های تشکیل‌دهنده سازند از سطح تا عمق مورد نظر مشخص شوند. در این مطالعه، چگالی با معادله (۹) با برازش هندسی تا خط گل برون‌یابی شده است [۴۴]:

$$P_{extrapolated} = \rho_{mudline} + A_0(TVD - AirGap - WaterDepth)^a \quad (9)$$



شکل ۲. نمای نموداری مخزن آسماری در میدان اهواز؛ چاه شماره ۴۶۹

۲.۴. برآورد مقادیر پارامترهای مقاومتی سنگ

در نبود مغزه‌های سالم و نتایج آزمایشگاهی می‌توان برای برآورد مقاومت فشاری تک‌محوره در مخازن ماسه‌سنگی با احتمال ماسه‌دهی از رابطه پلامب استفاده کرد [۴۴]:

$$UCS = 0.12 G_d^{2.3} \quad (5)$$

پاپاناستازو روشی را برای پیش‌بینی شکست سنگ اطراف یک حفره زیرزمینی ارائه کرد که شامل اندازه‌گیری مجموعه‌ای از پارامترهای مرتبط با شرایط فشاری و تنش‌های سنگ سازند در اطراف حفره و مجموعه‌ای از پارامترها برای تعیین مقاومت سنگ است. ایشان دو طول مشخصه، یکی مرتبط با اندازه حفره و دیگری مرتبط با اندازه دانه سنگ سازند اطراف حفره،

مقادیر تنش‌های افقی حداقل و حداکثر با در نظر گرفتن اثر فشار منفذی، روابط الاستیک منفذی هستند [۵۰]:

$$S_h' = \frac{\theta_s}{1 - \theta_s} S_v' + \frac{E_s \varepsilon_x}{1 - \theta_s^2} + \frac{\theta_s E_s \varepsilon_y}{1 - \theta_s^2} \quad (13)$$

$$S_H' = \frac{\theta_s}{1 - \theta_s} S_v' + \frac{\theta_s E_s \varepsilon_x}{1 - \theta_s^2} + \frac{E_s \varepsilon_y}{1 - \theta_s^2} \quad (14)$$

مقادیر کرنش‌های تکتونیک حداقل و حداکثر برای لایه‌ها، به ترتیب، در حدود ۰٫۰۰۰۴ تا ۰٫۰۰۰۹ و ۰٫۰۰۰۴ تا ۰٫۰۰۰۲ در این مخزن در نظر گرفته شده‌اند [۴۰]. مقادیر برآورد شده تنش‌های برجا در ناحیه مخزنی در ستون ۸ از شکل ۳ نشان داده شده‌اند. جهت تنش افقی حداکثر در این میدان $N50E$ است [۴۰]. با مشخص شدن تنش‌های برجا، تنش‌های محلی در اطراف سوراخ، در شرایط غیر قائم قابل محاسبه هستند که به دلیل شناخته شده بودن روابط مربوطه از تشریح مجدد آن‌ها در این تحقیق اجتناب شده است [۴۱].

۴.۴ معیار شکست

معیار شکست موهر-کلمب در این مطالعه در نظر گرفته شده است که می‌توان آن را با معادله (۱۵) بیان کرد [۲۱]:

$$\tau = UCS - S_1' \quad (15)$$

معادله (۱۵) یا هر معیار شکست دیگری که در برگزیده مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ است، با در نظر گرفتن اثر مقیاس برای این پارامتر قابل بهبود است (مانند معادله (۶) برای شرایط تولید از حفره) [۲۱].

چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی دو پارامتر مورد نیاز در معیار موهر-کلمب بوده که نیاز به برآورد دارند. ابتدا زاویه اصطکاک داخلی از رابطه پرکینز و وینگارتن برای سنگ‌های سست برآورد شده [۵۱] و سپس چسبندگی به کمک آن و مقاومت تک‌محوره سنگ برآورد می‌شود [۴۱]:

$$\varphi = 58 - 135 \theta \quad (16)$$

$$S_0 = \frac{1 - \sin(\varphi)}{2 \cos(\varphi)} UCS \quad (17)$$

مقادیر برآورد شده زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی، به ترتیب، در ستون‌های ۶ و ۷ از شکل ۳ نشان داده شده‌اند.

که در آن، برآزش نمودار هم با تعیین پارامترها و هم با تغییر نقاطی روی خط برآزش توسط کاربر قابل انجام است. خط برآزش شده در این مطالعه به طور تقریبی منطبق بر خط برآزشی با مقادیر حدودی ۰٫۰۴۰۱ و ۰٫۲۹۷۶، به ترتیب برای پارامترهای برآزشی A_0 و a است. از این خط برآزش برای برآورد چگالی سنگ‌ها تا سطح، در اعماقی که داده‌های چگالی در مجموعه داده‌ها موجود نیست، استفاده شده است. مقدار $AirGap$ مطابق با ارتفاع میز دوار γ از زمین برابر با ۲۵/۳ متر و $WaterDepth$ به دلیل قرار داشتن چاه در خشکی برابر با صفر متر در نظر گرفته شده است.

با توجه به چگالی محاسبه شده برای بخش‌های مختلف سازند، در خشکی، تنش قائم در محدوده هر مدل خاص برابر با جمع وزن سنگ‌ها در طبقات فوقانی آن است [۴۱]:

$$S_v = 0.001 \int_0^{TVD} \rho(z) g dz \quad (10)$$

در این مطالعه، شتاب گرانش برابر با ۹٫۸۱ متر بر مجذور ثانیه در نظر گرفته شده است. سپس تنش قائم موثر، برای حذف اثر فشار منفذی در محاسبه تنش، از معادله (۱۱) به دست می‌آید [۴۷]:

$$S_v' = S_v - \alpha P_p \quad (11)$$

سستی سازند موجب افزایش ضریب بایوت می‌شود به طوری که در سازندهای بسیار ضعیف مقدار آن را تا ۱ می‌توان در نظر گرفت [۴۶]. در سازندهای کربناته میادین ایران مقدار این پارامتر در حدود ۰٫۷ در نظر گرفته می‌شود [۴۰]. از آن جا که به دست آوردن این پارامتر کار ساده‌ای نیست، با تطابق رابطه کریف و همکاران [۴۸] با مقادیر حاصل از رابطه کلیمنتوس [۴۹] از روی داده‌های آزمایشگاهی، این ضریب با اصلاح رابطه کریف در طول ناحیه این مخزن برآورد شده است (ستون ۹ از شکل ۳):

$$\alpha = 1 - (1 - \theta)^{\frac{3}{1-\theta}} + 0.3172 \quad (12)$$

واضح است که وجود فشار منفذی در توزیع تنش‌ها تأثیر به‌سزایی دارد و در اکثر میادین نفتی، فشار منفذی سازند همواره به عنوان یکی از اصلی‌ترین پارامترهای موثر بر پایداری چاه مورد بحث بوده است. کامل‌ترین روابط موجود در برآورد

⁷ Rotary Table Elevation, RTE

۵.۴. برآورد مقادیر CDDP

افت فشار در مخزن در اثر تولید باعث تغییراتی در تنش‌های ناحیه تخلیه می‌شود [۵۲]. این تغییرات را در هر مرحله از تخلیه می‌توان با معادلات (۱۸ تا ۲۰) محاسبه کرد [۴۴]:

$$P_p^d = (1 - Depletion) P_p \quad (18)$$

$$S_h^d = S_h - A P_p Depletion \quad (19)$$

$$S_H^d = S_H - A P_p Depletion \quad (20)$$

که در آن، نسبت تغییر تنش در واقع ضریبی است که بیان‌گر نحوه تاثیر تخلیه مخزن بر تنش‌های افقی است که می‌توان آن را با استفاده از تئوری الاستیک منفذی در مخزن متخلخل الاستیک همگن همسانگرد با شعاع بی‌نهایت و با فرض شرط

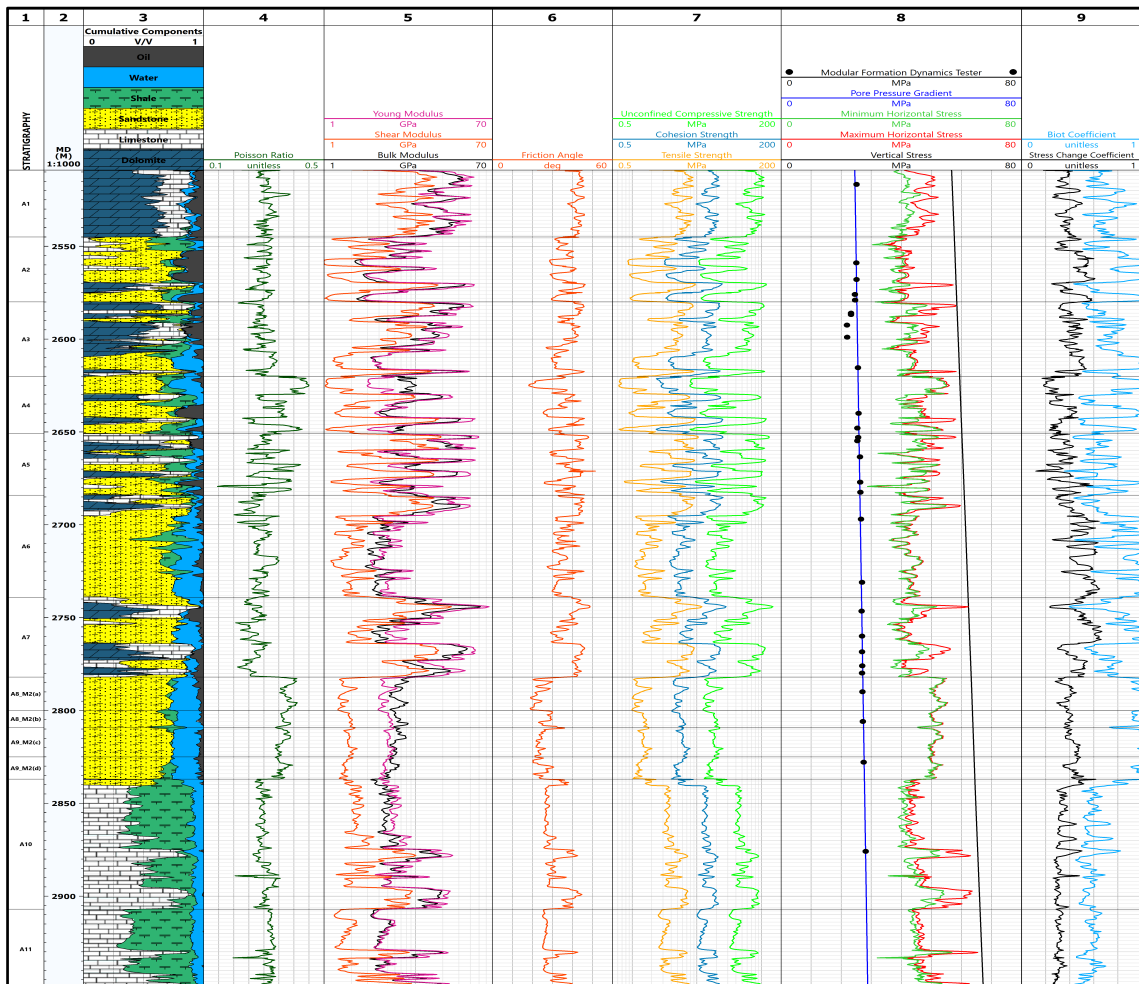
کرنش تک‌محوری (بدون کرنش جانبی) از معادله (۲۱) برآورد کرد [۵۳]. این معادله فرض اصلی در صنعت نفت است [۴۱]:

$$A = \frac{\Delta S_{(h \text{ or } H)}}{\Delta P_p} = \left(\frac{1 - 2 \nu_s}{1 - \nu_s} \right) \alpha \quad (21)$$

مقادیر برآورد شده نسبت تغییر تنش به همراه مقادیر برآورد شده تراوایی در ستون ۹ از شکل ۳ نشان داده شده‌اند.

CDDP بیش‌ترین افت فشار مجاز برای جلوگیری از تولید ماسه است. با محاسبه CBHP از تبدیل تنش‌های برجا به مختصات استوانه‌ای برای دیواره سوراخ از طریق معیار شکست انتخاب شده، CDDP در هر مرحله از تخلیه مخزن از معادله (۲۲) به دست می‌آید:

$$CDDP = P_p - CBHP \quad (22)$$



شکل ۳. نمودار پارامترهای برآورد شده مخزن آسماری در میدان اهواز؛ چاه شماره ۴۶۹

۵. برآورد تولید ماسه

بخش راهنمای مدیریت ماسه^۸ در نرم‌افزار تکلاگ از یک مدل پیش‌بینی شروع تولید ماسه آزموده شده با قابلیت در نظر گرفتن اثرات پلاستیسته روی رفتار مقاومتی ماسه‌های اطراف چاه، در روش تکمیل چاه به روش چاه باز یا یک حفره مشبک‌کاری شده، در حین تولید و افت فشار استفاده می‌کند. این بخش پس از تحقیقات بسیار روی شکست سنگ و تولید ماسه، آزموده شدن در آزمایش‌های میدانی و موفقیت‌آمیز بودن در طراحی ابزارهای تکمیل چاه و برنامه‌ریزی چاه در میدان‌های متعدد توسعه داده شده است. در مقایسه با دیگر مدل‌ها، مدل مورد استفاده شرکت شلمبرجر مدلی خاص از جنبه در نظر گرفتن اثرات مقیاس است و در آن اثرات اندازه حفره‌ها روی ماسه‌دهی در نظر گرفته می‌شود و قابلیت ارزیابی تغییرات حاصل از تخلیه مخزن در طول عمر تولید از مخزن مانند *CDDP* و اثر تخلیه روی پایداری ماسه‌ای در شرایط استفاده از ابزار تکمیل چاه را دارد [۲۴]. در این مطالعه، از این نرم‌افزار برای ارزیابی تحلیلی ظرفیت تولید ماسه استفاده شده است. تغییر واحدها در این نرم‌افزار به صورت خود به خود صورت می‌گیرد [۴۴].

نتایج به دو صورت ادامه‌دار در طول ناحیه مخزنی و بر اساس اعماق خاص قابل ارزیابی هستند. با توجه به این که روابط مورد استفاده برای آماده‌سازی داده‌ها روابطی مبتنی بر محیط‌های متخلخل ماسه‌سنگی و برخی ماسه‌سنگ‌های با سیمان ضعیف هستند، انتخاب اعماق خاص برای برآورد نهایی نیاز به بررسی بیش‌تر از دیدگاه مهندسی دارد که در ادامه به بررسی آن‌ها پرداخته شده است.

در ستون ۴ از شکل ۴، برآورد اولیه از ظرفیت شروع تولید ماسه از روی نمای نموداری تحلیلی عمقی *CDDP* در طول مخزن برای حالت چاه باز با قطر $8\frac{1}{4}$ اینچ قابل مشاهده است. تحلیل‌های صورت گرفته در نرخ‌های تخلیه ۰، ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درصد انجام شده‌اند.

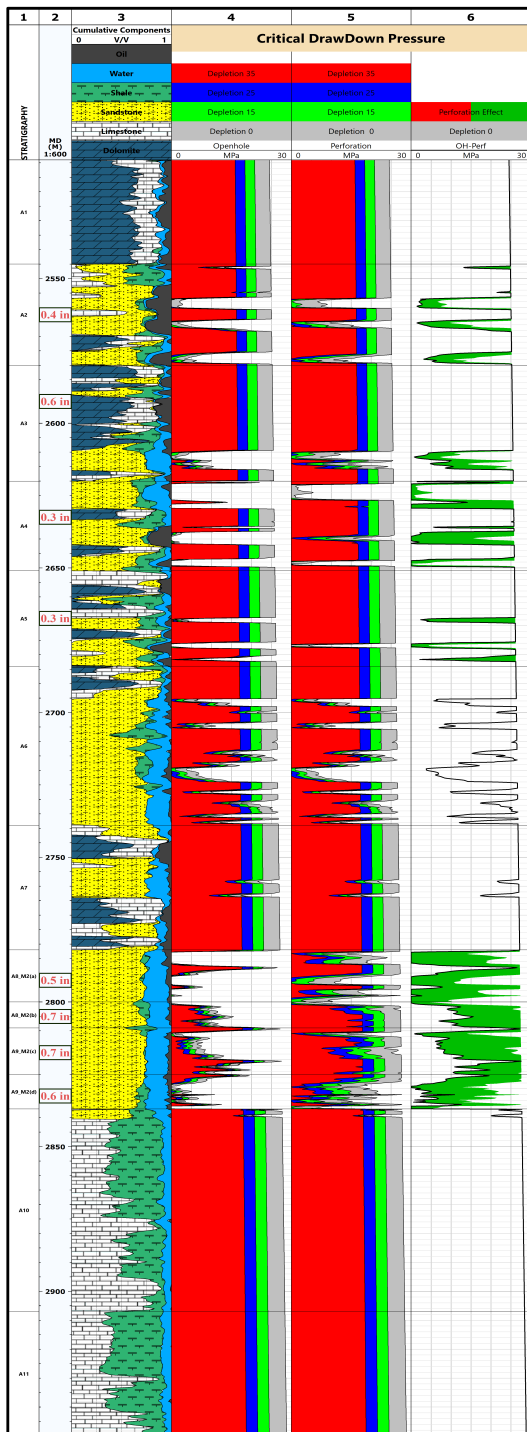
ارزیابی تحلیلی تنها باید در نواحی با ظرفیت ماسه‌دهی مانند نواحی ماسه‌ای انجام شود [۴۴]. لایه‌های *A2* تا *A10* لایه‌های ماسه‌ای هستند (ستون ۳ از شکل ۴) که با توجه به ستون ۴ از شکل ۴، لایه *A2* در بخش‌های مختلف، *A3* در بخش پایینی و زیرلایه *M2_c* در بخش بالایی در آستانه شروع

تولید ماسه هستند. لایه *A5* در نیمه پایینی، زیرلایه *M2_b* در بخش بالایی و زیرلایه *M2_d* در نیمه پایینی علاوه بر ماسه‌دهی در محدوده‌های کوتاه، در بخش‌های مختلفی در آستانه شروع تولید ماسه هستند. همچنین، بخش‌های مختلف لایه *A4* و زیرلایه *M2_a* نشان از ماسه‌دهی زیاد این نواحی دارند.

نیروهای هیدرودینامیکی سیال تولیدی نقش به‌سزایی در ظرفیت ماسه‌دهی دارند. سیال گاز نسبت به سیالات دیگر دارای ظرفیت هیدرودینامیکی کم‌تری است به طوری که در برخی گزارش‌ها به عدم یا ناچیز بودن ظرفیت تولید ماسه در اثر گازی بودن مخزن اشاره شده است [۵۴]. بیش‌ترین حجم سیال نفتی-آبی در لایه‌های *A6* و *M2* قرار دارد [۳۹]. تراوایی، به دلیل تاثیر روی افت فشار، دیگر پارامتر حائز اهمیت در انتخاب عمق خاص برای ارزیابی تولید ماسه است. با توجه به این که بیش‌ترین تراوایی (با اختلاف چشمگیر حدود ۱۰ برابر) [۳۹] و بیش‌ترین تخلخل (ستون‌های ۳ و ۵ از شکل ۲) در بین لایه‌های ماسه‌ای، در لایه *M2* قرار دارد، این لایه به عنوان لایه مورد بررسی در نظر گرفته شده است. با توجه به نمودارهای مقاومت تک‌محوره و *CDDP*، به ترتیب، در ستون ۷ از شکل ۳ و ستون ۴ از شکل ۴، می‌توان به مقایسه‌ای از لحاظ احتمال تولید ماسه در بین زیرلایه‌های *M2* و میزان اهمیت آن‌ها پرداخت. در بین زیرلایه‌های *M2*، محتمل‌ترین اعماق از لحاظ تولید ماسه در انتهای زیرلایه‌های *M2_a* و *M2_d* قرار دارند. با این حال، زیرلایه *M2_a* به دلایل مختلفی از جمله تراوایی، ضخامت مخزنی و فاصله تا سطح تماس آب و نفت^۹ بیش‌تر در نواحی مختلف این مخزن در این میدان، حایز اهمیت‌ترین زیرلایه *M2* به حساب می‌آید. اگر چه زیرلایه *M2_b* نسبت به زیرلایه *M2_c* در برخی اعماق دارای سنگ ضعیف‌تری است، در مجموع محدوده عمقی بیش‌تری از زیرلایه *M2_c* دارای سنگ ضعیف است. به طور معمول نقاط ارزیابی در نواحی انتخاب می‌شوند که سنگ مخزن کم‌ترین مقاومت را دارد [۲۴]. با توجه به این که زیرلایه *M2_d* در عمق ۲۸۳۷ متری کم‌مقاومت‌ترین عمق لایه *M2* در چاه مورد بررسی بوده است، این عمق برای تحلیل حساسیت در حالت تکمیل چاه به روش مشبک‌کاری در نظر گرفته شده است. همچنین، به دلیل قرار گرفتن این عمق در ناحیه ناپایدار و

⁸ Sand Management Advisor, SMA

⁹ Oil-Water Contact, OWC



شکل ۴. ارزیابی ظرفیت تولید ماسه مخزن آسماری در میدان اهواز؛ چاه شماره ۴۶۹

محتمل از لحاظ تولید ماسه و قابل نمایش نبودن تاثیر تغییرات پارامتری، عمق ۲۸۲۲ متری در زیرلایه $M2_c$ برای تحلیل حساسیت در حالت تکمیل چاه به روش چاه باز انتخاب شده است. در نتیجه، مقادیر توصیف شده مربوط به این روش تنها برای تحلیل حساسیت بوده و نباید مبنای برنامه‌ریزی‌های تولیدی از چاه قرار گیرند.

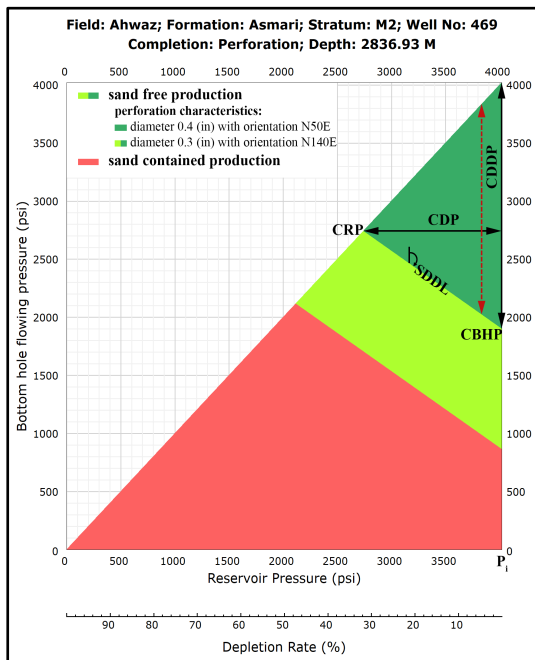
سازوکارهای رانش^{۱۰} فعال موجود در مخزن آسماری میدان اهواز موجب کاهش سالانه ناچیز ۱۰ پامی فشار تولیدی مخزن شده است. به همین دلیل، انتخاب اندازه قطر حفره به منظور جلوگیری از تولید ماسه در لایه‌های مختلف بر اساس تخلیه صفر درصد صورت گرفته است. مقادیر انتخابی قطر حفره در لایه‌های محتمل تولید ماسه روی ستون ۲ از شکل ۴ و تاثیر آن‌ها بر $CDDP$ در نرخ‌های تخلیه مختلف در ستون ۵ از شکل ۴ آورده شده‌اند. ستون ۶ در این شکل، میزان تاثیر قطر حفره انتخاب شده را در نرخ تخلیه صفر درصد با اختلاف مقادیر $CDDP$ دو روش تکمیل چاه اشاره شده به رنگ سبز نشان می‌دهد. شدت تاثیر مشبک‌کاری بر تغییرات $CDDP$ در لایه $M2$ ، که در این شکل نشان داده شده است، موید اهمیت این لایه از منظر شروع تولید ماسه به دلیل ضعف مقاومتی است.

در شکل ۵، پارامترهای مختلف در بحث ارزیابی تولید ماسه در عمق خاص نشان داده شده‌اند. در این شکل، تاثیر حفره در دو حالت، با قطر معمول ۰/۴ اینچ در جهت تنش افقی حداکثر و با قطر ۰/۳ اینچ در جهت عمود بر آن، در عمق ۲۸۳۷ متری نشان داده شده است. مقایسه نتایج این دو حالت نشان از تاثیر قابل توجه شرایط حفره در کنترل تولید ماسه دارد به طوری که در حالت دوم، مساحت ناحیه ایمن حدود ۲ برابر و $CDDP$ و فشار منفذی مخزنی بحرانی^{۱۱} (CRP) حدود ۵۰ درصد نسبت به حالت اول افزایش داشته است. پیکان خط‌چین قرمز دو سر، حد مجاز کاهش فشار جریانیه ته چاهی^{۱۲} ($BHFP$) برای جلوگیری از تولید ماسه را در فشار مخزنی ۳۸۲۰ پامی (تخلیه ۴/۵ درصدی مخزن نسبت به فشار حال حاضر مخزن (P_i))، برابر با ۱۸۰۰ پام (۲۰۲۰ پام \approx $CBHP$) نشان می‌دهد. در این شرایط، نگه داشتن $BHFP$ بیش‌تر از ۲۰۲۰ پام از تولید ماسه در لایه مورد مطالعه

¹² Bottom Hole Flowing Pressure, BHFP

¹⁰ Drive mechanisms

¹¹ Critical Reservoir pore Pressure, CRP (CRPP)



شکل ۵. نمودار CDDP برای حفره در عمق ۲۸۳۷ متری

چاه، ناحیه ایمن از لحاظ تولید ماسه کاهش می‌یابد، به طوری که چاه با زاویه انحراف بیش‌تر از ۳۳ درجه، در عمق مورد مطالعه، از ابتدای تولید با تولید ماسه همراه است. به منظور بررسی تاثیر اندازه قطر چاه بر ظرفیت تولید ماسه، مقادیر مرسوم عملیاتی قطر چاه مورد بررسی قرار گرفته‌اند (شکل ۶-ج). همان‌طور که انتظار می‌رود، با کاهش اندازه قطر چاه مساحت ناحیه ایمن بیش‌تر می‌شود. هرچند قطر چاه کم‌تر از $\frac{1}{8}$ اینچ، به طور نسبی، در صنعت کم‌تر مورد استفاده است، اما از جنبه مطالعاتی باید اشاره کرد که در عمق ۲۸۲۲ متری برای چاه با قطر $\frac{1}{8}$ اینچ، از فشار مخزنی کم‌تر از ۶۵۰ پام، با هر فشار تولیدی دلخواه، تولید ماسه وجود نخواهد داشت و همواره می‌توان با کنترل دبی تولیدی به تولید بدون ماسه رسید. با توجه به شدت تاثیر اندازه قطر حفره در کنترل تولید ماسه، که در ستون ۶ از شکل ۴ نشان داده شده است، در عمق ۲۸۳۷ متری نیز چاه با قطر $\frac{1}{8}$ اینچ از این لحاظ مورد بررسی قرار گرفته است. مقادیر نتیجه شده ۳۶۰۶ و ۳۲۷۰ پامی، به ترتیب، برای پارامترهای $CBHP$ و CRP نشان از توانمندی چاه با این اندازه قطر در کنترل طبیعی فرایند تولید ماسه دارد.

جلوگیری خواهد کرد. در این نوع ارزیابی مثلثی تولید ماسه، با تخلیه مخزن و گذر از CRP ، عمر ماسه‌دهی دائمی چاه شروع می‌شود به طوری که در صورت عدم درمان آن چاه‌ها با تولید ماسه مواجه خواهند بود. در صورت قرار گرفتن CRP روی محور افقی (صفر پام $BHFP$)، اگر زاویه خط افت فشار ایمن^{۱۳} ($SDDL$) با راستای قائم بین مقدار حداقل آن (۴۵ درجه) تا ۹۰ درجه باشد، با کنترل دبی تولیدی چاه در طول عمر تولید از آن، تولید ماسه قابل کنترل است و در زوایای بیش‌تر از ۹۰ درجه، چاه همواره از لحاظ تولید ماسه ایمن خواهد بود. باید توجه داشت که این مخزن با نرخ تخلیه کمی که دارد، با شرایط حال حاضر، صدها سال دیگر هم به چنین شرایطی نخواهد رسید. با این حال، این شرایط نیز در تحلیل‌ها از جنبه مطالعاتی بررسی شده‌اند. با توجه به زوایای توصیف شده، با تخلیه مخزن از P_i به سمت CRP ، روند $CBHP$ کاهشی یا افزایشی خواهد بود اما چاه همواره با افت فشارهای کم‌تری به ناحیه تولید ماسه می‌رسد.

۱.۵. تحلیل حساسیت بر اساس شرایط هندسی

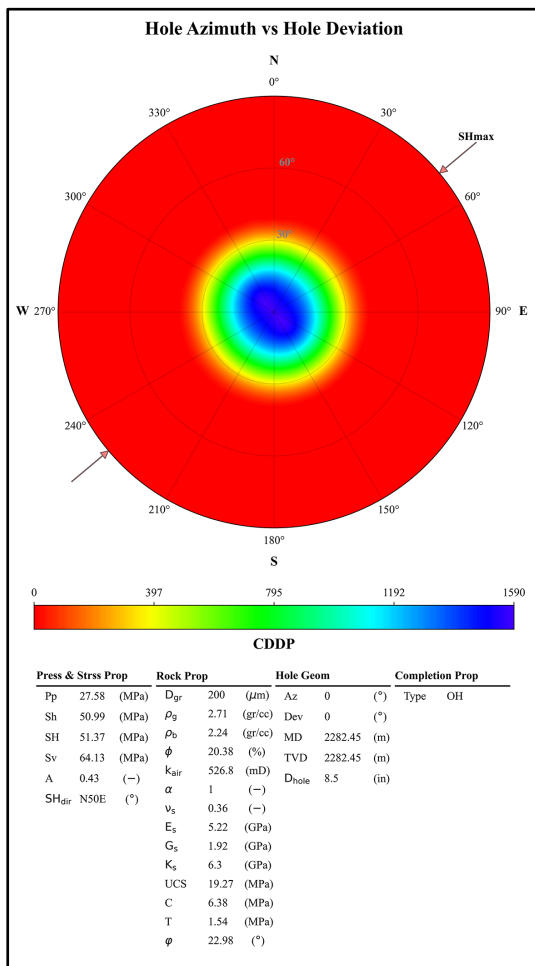
چاه

تحلیل حساسیت بر اساس زاویه آزیموت چاه، زاویه انحراف چاه از حالت قائم و قطر چاه در حالت چاه باز صورت گرفته است. از آن جا که پارامترهای دینامیکی سنگ در شرایط همسانگرد از روی داده‌های چاه به دست می‌آیند، در نتیجه، تغییر در آزیموت چاه تاثیر روی تحلیل ندارد. به همین دلیل با زاویه انحراف ۳۰ درجه به تاثیر تغییرات آزیموت چاه پرداخته شده است.

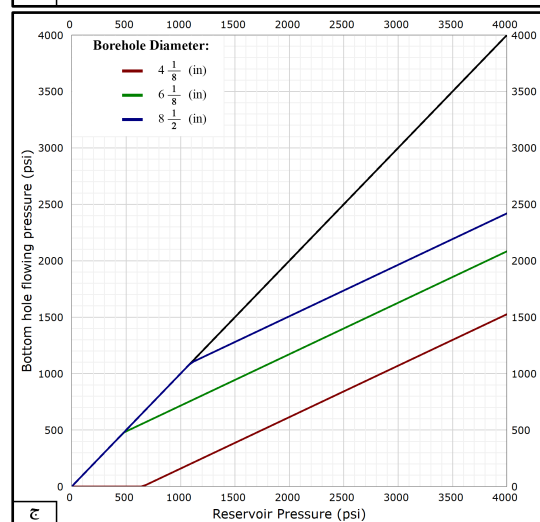
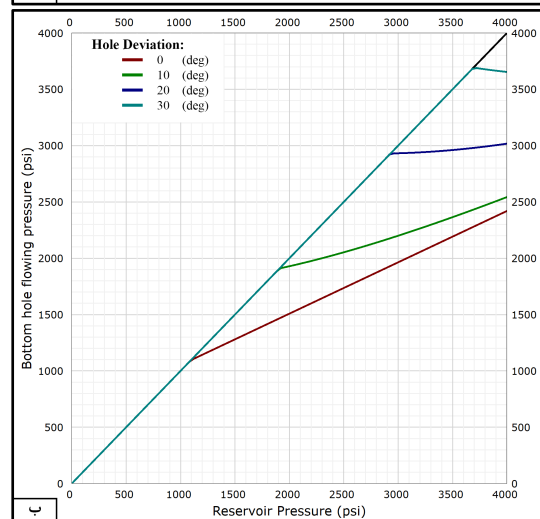
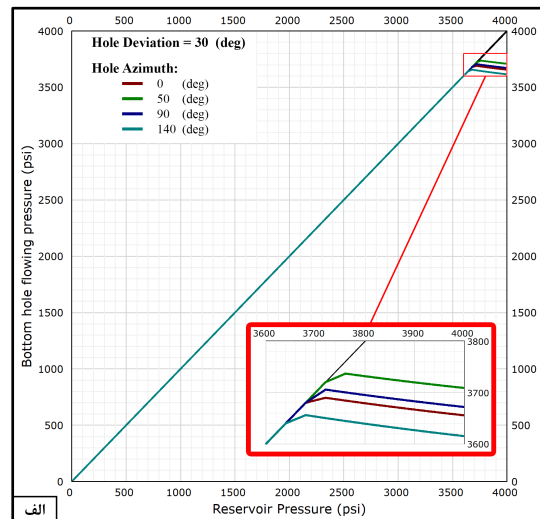
هر چه اختلاف تنش‌های اعمالی بر دیواره چاه بیش‌تر باشد، چاه پایداری کم‌تری خواهد داشت به طوری که با فرض جهت چاه در جهت تنش افقی حداکثر، این اختلاف تنشی به بیش‌ترین حد خود می‌رسد. با توجه به شکل ۶-الف، با زاویه انحراف چاه ۳۰ درجه، هر چه زاویه آزیموت چاه به راستای تنش افقی حداکثر ($N50E$) نزدیک‌تر شود، چاه از لحاظ ظرفیت ماسه‌دهی ناپایدارتر می‌شود و هر چه این زاویه به ۱۴۰ یا ۳۲۰ درجه نزدیک‌تر شود، ناحیه امن وسیع‌تر می‌شود. خط قرمز در شکل ۶-ب، $SDDL$ مربوط به این چاه را در عمق مورد مطالعه نشان داده است. با افزایش زاویه انحراف

¹³ Safe DrawDown Line, SDDL

برای مشاهده تاثیر مسیر چاه بر میزان *CDDP*، دایره استریوتی بر اساس زوایای آزیموت و انحراف چاه با رنگ‌بندی بر اساس مقادیر *CDDP* حاصل از آن‌ها، در شکل ۷ ترسیم شده است. اندازه مقادیر پارامترهای مختلف در عمق انتخابی مربوط به روش چاه باز در این شکل آورده شده است. در این شکل، ناحیه ایمن قرار گرفته در وسط دایره که بیان‌گر ناحیه ایمن کامل است، به دلیل ناهمسانگردی تنش‌های افقی به شکل بیضی در آمده است به طوری که قطر بزرگ بیضی در راستای عمود بر راستای تنش افقی حداکثر است و بزرگی آن به میزان تفاوت مقداری تنش‌های افقی بستگی دارد. در نتیجه، در روش چاه باز، هر چه راستای آزیموت چاه از راستای تنش افقی حداکثر فاصله می‌گیرد، پایداری چاه از لحاظ تولید ماسه در زوایای انحرافی بیش‌تری امکان‌پذیر می‌شود.



شکل ۷. تاثیر مسیر چاه بر کنترل ماسه



شکل ۶. تاثیر شرایط هندسی چاه بر ظرفیت ماسه‌دهی

۲.۵. تحلیل حساسیت بر اساس قطر غالب دانه‌های

ماسه

با بررسی‌های آزمایشگاهی انجام شده بر روی مغزه چاه شماره ۴۳ در لایه M2، قطر غالب دانه‌های ماسه برابر با ۲۰۰ میکرون در نظر گرفته شده‌اند. شکل ۸ توزیع دانه‌بندی حاصل از آزمایش الک انجام شده با شماره‌های ۱۸، ۶۰، ۱۲۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۴۰۰ روی ۱۰۰۰ گرم نمونه برداشت شده از این مغزه را نشان می‌دهد.

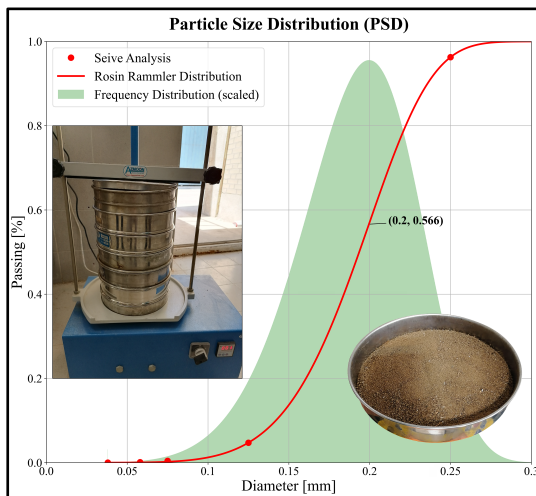
با توجه به شکل ۹، هر چه قطر دانه‌های تشکیل‌دهنده سنگ در این ناحیه کاهش می‌یابد، ظرفیت ماسه‌دهی سازند بیش‌تر می‌شود. بر اساس الک شماره ۲۰۰ در استاندارد ASTM، قطر دانه ۷۵ میکرون به عنوان حد پایین قطر در تعریف دانه ماسه در نظر گرفته شده است. می‌توان گفت از حدود قطر دانه ۳۵۰ میکرون به بالا، همواره با کنترل دبی تولیدی در طول عمر تولید از چاه تولید ماسه کنترل می‌شود.

۳.۵. تحلیل حساسیت بر اساس شرایط تنش‌های

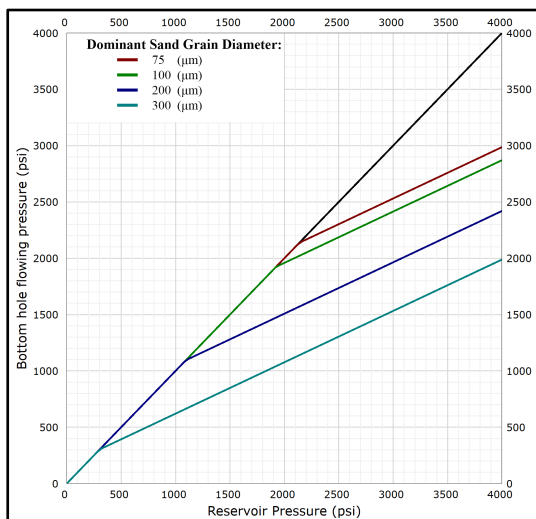
برجا

در عمق مورد مطالعه، در حالت چاه باز، مقادیر تنش‌های میدانی برآورد شده برای تنش‌های افقی حداکثر و حداقل و قائم، به ترتیب، ۵۰/۹۹، ۵۱/۳۷ و ۶۴/۱۳ مگاپاسکال است. نزدیکی مقادیر تنش‌های افقی به یکدیگر موید سست بودن سنگ سازند در عمق مورد مطالعه است [۴۶]. چنین نواحی در ستون ۸ از شکل ۳ قابل مشاهده هستند. در این بخش نتایج تحلیل حساسیت بر اساس تاثیر مقادیر مختلف هر یک از تنش‌های برجا و نسبت تغییر تنش بر ظرفیت ماسه‌دهی نشان داده شده است. از آن جا که تغییر در اندازه مقادیر تنش برای چاه قائم تاثیری روی تحلیل نخواهد داشت، با در نظر گرفتن زاویه انحراف ۳۰ درجه برای چاه، تاثیر تغییرات این دو پارامتر بر ظرفیت تولید ماسه بررسی شده است.

شکل ۱۰ الف نشان از تاثیر مستقیم افزایش تنش افقی حداقل و شکل ۱۰ ب نشان از تاثیر معکوس افزایش تنش افقی حداکثر بر مساحت ناحیه ایمن دارند. اندازه مقادیر این دو تنش در تحلیل حساسیت‌ها به نحوی انتخاب شده‌اند که از یکدیگر گذر نکنند. با مقایسه این دو شکل با یکدیگر، این طور به نظر می‌رسد که هر چه تنش‌های افقی به یکدیگر نزدیک‌تر شوند، ناحیه ایمن وسیع‌تر می‌شود. همان طوری که



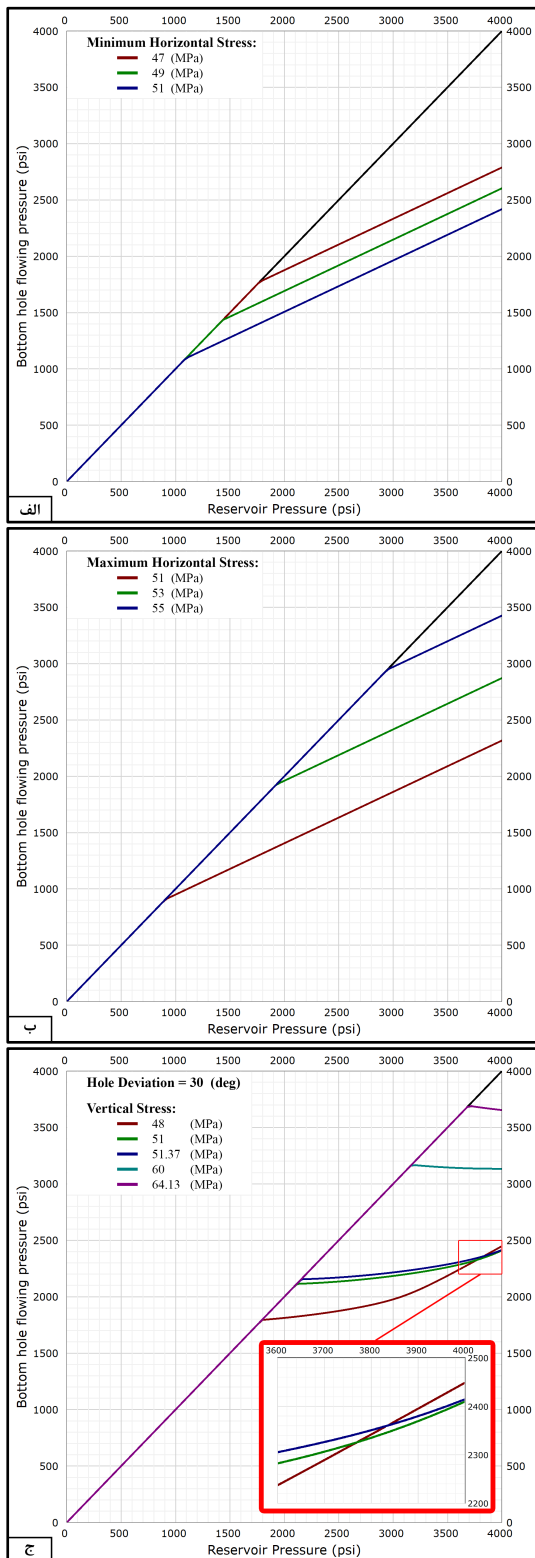
شکل ۸. توزیع دانه‌بندی لایه M2 در چاه شماره ۴۳



شکل ۹. تاثیر ابعاد دانه‌های سنگ‌های تشکیل‌دهنده سازند بر ظرفیت ماسه‌دهی

در شکل ۱۰ ب نشان داده شده است، با افزایش تنش افقی حداکثر تا حدود مقدار ۵۷ مگاپاسکال، این چاه در عمق مورد مطالعه از لحاظ تولید ماسه به طور کامل در مرحله ناپایداری قرار خواهد گرفت.

با توجه به شکل ۱۰ ج، تغییرات مقدار تنش قائم در چاه با زوایای انحراف و آزیموت، به ترتیب، ۳۰ و صفر درجه، همچون تنش افقی حداکثر، اثر معکوس روی مساحت ناحیه ایمن دارد به طوری که با افزایش مقدار آن از حدود ۶۶ مگاپاسکال، چاه به طور کل ماسه‌دهی می‌شود. علاوه بر اندازه



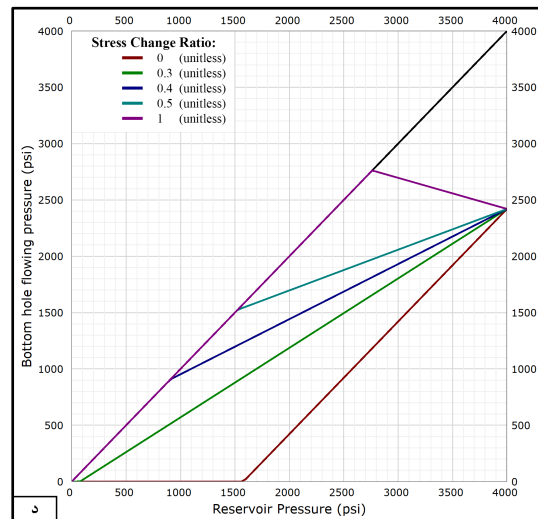
مقادیر اصلی تنش‌ها در عمق تحلیل، مقدار حداقل ۴۸ مگاپاسکال به منظور بررسی تاثیر احتمالی رژیم گسلش واژگونی و ۶۰ مگاپاسکال برای تشخیص بهتر روند تاثیر بر ناحیه ایمن در نظر گرفته شده‌اند. با مقایسه تغییرات اندازه مقادیر *CDDP* در تخلیه مخزنی صفر درصد، با کاهش مقدار تنش قائم از ۶۴ مگاپاسکال به سمت مقدار تنش افقی حداقل، همواره مقدار *CDDP* مجاز در فشار مخزنی، با نرخ کاهشی، افزایش می‌یابد. تاثیر این نرخ کاهشی به نحوی است که، در شرایط رژیم گسلش واژگونی، با کاهش مقدار تنش قائم و گذر از مقدار ۴۸ مگاپاسکال موجب تغییر روند تغییرات میزان *CDDP* در فشار مخزنی از حالت افزایشی به کاهشی خواهد شد. در نتیجه، برای مقادیر تنش قائم کم‌تر از ۴۸ مگاپاسکال، روند کاهشی مساحت ناحیه ایمن محتمل است و نمی‌توان روند افزایشی را تضمین کرد. همان طور که در این شکل مشخص شده است، با کاهش ۶ درصدی فشار مخزن در حین تخلیه، این روند کاهشی مجدد افزایشی می‌شود.

مقدار میانگین نسبت تغییر تنش در لایه مورد بررسی حدود ۰/۴۳ بوده است. با توجه به کم‌تر بودن این مقدار از مقدار ۰/۶۷ در کل ناحیه مخزنی (ستون ۹ از شکل ۳)، انتظار لغزش مجدد گسل‌های نرمال در صورت وجود در هر درصد تخلیه‌ای از مخزن نمی‌رود. توجه به این نکته بسیار حایز اهمیت است که هر چند این پارامتر برای پیش‌بینی تغییرات تنش در مخزن کاربرد دارد، نباید برای پیش‌بینی تنش‌های واقعی در عمق مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به زیاد بودن نسبت شعاع به ضخامت این مخزن، مقدار تنش‌های افقی با تخلیه مخزن کاهش می‌یابد به طوری که مقدار تنش قائم ثابت باقی خواهد ماند [۴۶]. شکل ۱۰-د بیان‌گر اثر معکوس اندازه این پارامتر بر مساحت ناحیه ایمن است. همچنین، میزان بزرگی این پارامتر با میزان بزرگی زاویه *SDDL* رابطه مستقیم دارد. همان طور که در این شکل مشخص است، تغییرات این پارامتر هیچ تاثیری بر *CBHP*، و در نتیجه بر *CDDP*، در ابتدای تولید از چاه با تخلیه صفر درصدی مخزن ندارد و تنها اثر آن روی *CRP* است که با شروع تخلیه مخزن اثر آن مشخص می‌شود به طوری که با مقادیر نسبت‌های تغییر تنشی کم‌تر از ۰/۳، تولید ماسه با کنترل دبی ممکن می‌شود.

کاهش می‌دهد. در صورت ایجاد قطر حفره بزرگ‌تر از حدود ۰٫۷ اینچ در این عمق، تولید از چاه همواره با تولید ماسه همراه خواهد بود. در مخازن ماسه‌ای سست، امکان افزایش اندازه قطر حفره در بخش‌های میانی دیواره حفره، نسبت به قطر ورودی^{۱۵} حاصل از مشبک‌کاری، در اثر ریزش بدنه حفره وجود دارد [۵۶]. این پدیده، در انتخاب تفنگ مشبک‌کاری با توان ایجاد اندازه قطرهای بزرگ‌تر، مانند HSD-UltraPack با توجه به موارد پیش‌گفته، اهمیت بیشتری پیدا کرده و نیازمند بررسی‌های بیشتر از لحاظ پایداری حفره است.

به دلیل قایم بودن چاه مورد مطالعه، توضیحات گفته شده در بخش مربوط به بررسی تاثیر آزمون چاه بر ظرفیت ماسه‌دهی (شکل ۶-الف)، در بررسی تاثیر جهت حفره^{۱۶} (PO) بر این ظرفیت نیز صادق است. جهت حفره و زاویه حاصل از آن روی مقطع عرضی دیواره چاه در شکل ۱۱-ب نشان داده شده است. با توجه به همگن و همسانگرد بودن مقادیر پارامترهای مورد استفاده، هر چه جهت حفره به جهت تنش افقی حداقل نزدیک‌تر باشد، حفره پایداری بیشتری خواهد داشت. برای درک بهتر تاثیر جهت حفره، بر اساس حد بالای مجاز اندازه زاویه انحراف چاه در روش مشبک‌کاری کابلی^{۱۷} (WCP)، زاویه انحراف چاه ۶۰ درجه با قطر حفره ۰٫۴ اینچ در جهت آزمون صفر درجه در نظر گرفته شده است. با افزایش زاویه PO از ۳۰ درجه به ۹۰ درجه، ناحیه ایمن ماسه-دهی کاهش و پس از آن تا زاویه ۱۱۰ درجه افزایش می‌یابد. در نتیجه ناپایدارترین جهت‌های حفره در دو سمت چپ و راست دیواره چاه خواهد بود.

در چاه قایم، در رژیم گسلش نرمال، حفره هم‌راستا با راستای تنش افقی حداکثر، به دلیل حداکثر بودن اختلاف تنش‌های اعمالی بر دیواره آن، ناپایدارترین حفره از لحاظ تولید ماسه خواهد بود. با شروع انحراف چاه در راستای تنش افقی حداکثر، با توجه به این که جهت این حفره در زاویه صفر درجه در سمت فوقانی چاه قرار می‌گیرد (شکل ۱۱-ب)، از شدت ناپایداری این حفره کاسته خواهد شد. با افزایش انحراف چاه و با فرض مشبک‌کاری عمود بر دیواره چاه، این حفره به تدریج به سمت قرار گرفتن در راستای قایم پیش رفته و پایدارتر خواهد شد. در واقع حفره مذکور از ناپایدارترین حالت



شکل ۱۰. تاثیر شرایط تنش‌های برجا بر ظرفیت ماسه‌دهی

۴.۵. تحلیل حساسیت بر اساس ویژگی‌های مشبک‌کاری

برای بررسی تاثیر مشبک‌کاری بر ظرفیت تولید ماسه، حفره‌ای با اندازه قطر ۰٫۴ اینچ در نظر گرفته شده است. استفاده از این حفره‌ها در تحلیل مفهوم اثر مقیاس را در بر می‌گیرد. برای بررسی تاثیر اندازه قطر حفره بر ظرفیت تولید ماسه، مقادیری مبتنی بر اندازه قطر حفره‌های ایجاد شده با تفنگ‌های مشبک‌کاری مرسوم انتخاب شده است. از آن جا که شروع خوردشدگی دانه‌ها و مچاله‌شوندگی حفره در مخازن ماسه‌ای به تخلخل و شعاع دانه‌ها بستگی دارد [۵۵] و اندازه قطر حفره اغلب بسیار بیش‌تر از اندازه قطر دانه‌های اطراف آن است [۴۱]، می‌توان مچاله‌شوندگی حفره را در این شرایط سازوکار اصلی از میان سازوکارهای ناپایداری از منظر تولید ماسه بیان کرد. در مخازن ماسه‌سنگی سست، تراکم غیرالاستیک حاصل از بازچینش دانه‌ها در حین تخلیه ممکن است تاثیر محسوسی بر میزان تولید داشته باشد. در چنین مخازنی با سازوکار رانش تراکمی^{۱۴}، حتی با کاهش تخلخل مخزن، در صورت عدم تغییر یا تغییر ناچیز تراوایی آن، افزایش طبیعی میزان باز یافت از مخزن محتمل است [۴۶].

با توجه به شکل ۱۱-الف، افزایش قطر حفره، باعث کاهش ناحیه ایمن می‌شود. روند تغییرات میزان CDDP در فشار مخزنی، با افزایش اندازه قطر حفره ایجاد شده، نرخ

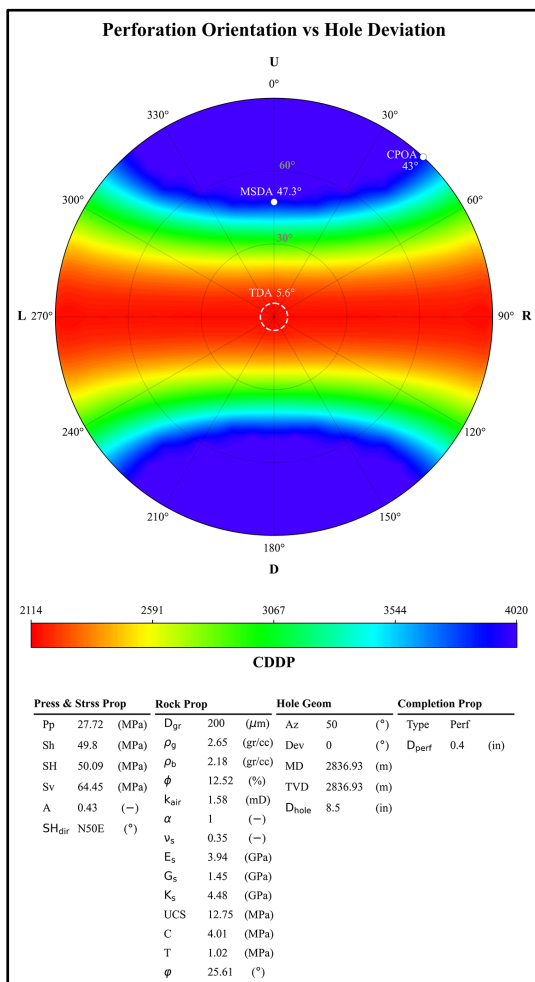
¹⁶ Perforation Orientation, PO

¹⁷ Wireline-Conveyed Perforating, WCP

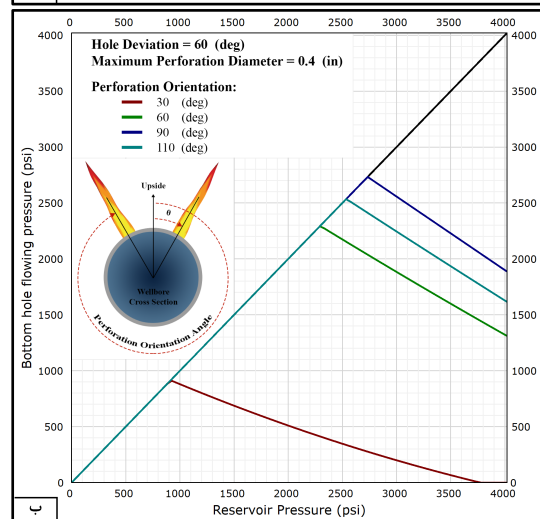
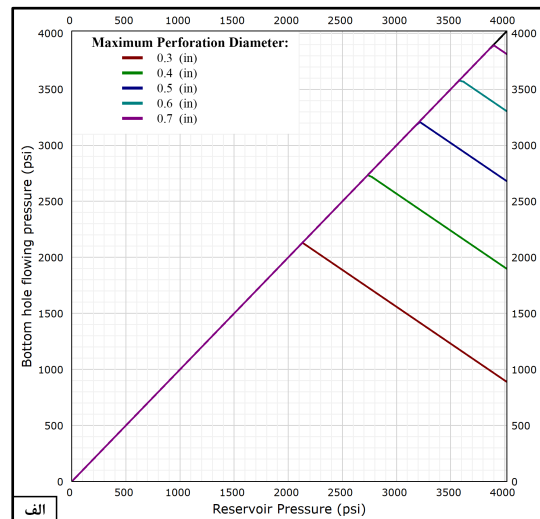
¹⁴ Compaction drive

¹⁵ Entrance Hole, EH

حفره به اولین حفره پایداری تبدیل خواهد شد که در شرایط فعلی مخزن با هر افت فشاری ایمن است. این زاویه انحراف با نقطه سفیدرنگی در زاویه PO برابر با صفر درجه در سمت بالای چاه و زاویه انحراف چاه 47.3° درجه روی شکل ۱۲ نشان داده شده است. در این شکل، زاویه بحرانی $CPOA$ (CPOA) در چاه افقی با نقطه سفیدرنگ دیگری در زاویه PO برابر با 43° درجه روی محیط دایره استریونت نشان داده شده است. تعریف و روش تعیین زوایای TDA ، $MSDA$ و $CPOA$ از نوآوری‌های این مقاله هستند که با استفاده از آن‌ها راهکاری برای انتخاب روش مشبک‌کاری جدار چاه‌های قائم و مایل در سازندهای سست ماسه‌سنگی در بخش ۶ ارائه شده است.



شکل ۱۲. تاثیر جهت حفره بر کنترل ماسه



شکل ۱۱. تاثیر ویژگی‌های مشبک‌کاری بر ظرفیت ماسه‌دهی

ممکن از لحاظ تولید ماسه در چاه قائم به پایدارترین حالت ممکن در چاه افقی تبدیل می‌شود. در این سیر انتقالی، در اندازه زاویه انحراف چاه خاصی^{۱۸}، اثر منفی راستای این حفره از لحاظ پایداری ماسه‌ای به اثر مثبت تبدیل خواهد شد. اندازه این زاویه به عوامل مختلفی بستگی دارد، با این حال، شرایط و اندازه مقادیر تنش‌های برجا اصلی‌ترین عامل تاثیرگذار بر اندازه آن هستند. در چاه مورد بررسی این زاویه انحراف حدود $5/6$ درجه تعیین شده است و به صورت دایره خط‌چین سفیدرنگ روی شکل ۱۲ نشان داده شده است. با افزایش انحراف چاه، با گذر از اندازه زاویه انحراف چاه دیگری^{۱۹}، این

²⁰ Critical Perforation Orientation Angle, CPOA

¹⁸ Transitional Deviation Angle, TDA

¹⁹ Minimum Safe Deviation Angle, MSDA

۶. عملیات مشبک کاری

در مخازن ماسه‌سنگی سست، به دلیل نزدیک بودن اندازه مقادیر تنش‌های افقی و همگن و همسانگرد بودن تقریبی ویژگی‌های سنگی آن‌ها آزمایشات چاه اهمیت کمتری دارد اما زاویه انحراف چاه به دلیل تاثیر گذاری در نحوه اعمال تنش‌ها، به خصوص تنش قائم، بر دیواره چاه و حفره حایز اهمیت است. در رژیم گسلش نرمال، حفره قائم با توجه به نزدیکی مقادیر تنش‌های افقی اعمالی بر دیواره آن پایدارترین حالت حفره خواهد بود. با توجه به این که ایجاد زاویه غیر قائم بین جهت حفره و طول دیواره چاه در عملیات ساده نبوده و به طور معمول عمود بر یکدیگر هستند، به نظر می‌رسد که حفره‌ها در چاه مایل پایدارتر از چاه قائم هستند به طوری که در چاه افقی با ایجاد حفره در جهت قائم، پایدارترین حالت اتفاق خواهد افتاد [۵۶]. در نتیجه حفره در راستای قائم، با زاویه‌داری دورانی (*phasing*) ۱۸۰ درجه، بیش‌ترین پایداری را دارد. به دلیل ناتوانی در تمیزکاری نخاله‌های مشبک کاری قرار گرفته در حفره‌های ایجاد شده در زیر چاه افقی، بر خلاف نخاله‌های حفره‌های بالایی که با نیروی گرانش تمیز می‌شوند، میزان تولید با میزان مورد انتظار متفاوت است [۵۷].

ایجاد حفره‌ها در جهتی خاص (صفر = *phasing*)، از لحاظ عملیاتی با محدودیت‌هایی همراه است. از طرفی، تنظیم ابزار در چاه برای ایجاد حفره‌ها در جهت برنامه‌ریزی شده دشوار است و نیاز به استفاده تخصصی از ابزارهای تنظیم جهت یا ابزارهای نوین با این قابلیت دارد. از طرف دیگر، به دلیل بزرگ بودن دهانه خرج‌های گود^{۲۱}، در یک راستا قرار گرفتن آن‌ها کاهش فاصله‌داری (*spacing*) را محدود می‌کند به طوری که حتی با تفنگ‌های پیشرفته محصول شرکت هالیبرتون (*Halliburton*) [۵۸] و شلمبرجر [۵۹] تنها تا ۵ شلیک در هر فوت^{۲۲} (*SPF*) ممکن است. تنها راه برای افزایش این تعداد، مشبک کاری چند مرحله‌ای برای ایجاد حفره‌های جدید بین حفره‌های موجود است. در این روش، کنترل نحوه توزیع حفره‌ها دشوار بوده و ممکن است منجر به توزیع نامناسب تنش‌ها در حین تخلیه و نتیجه‌ای نامطلوب شود. با این که در رژیم گسلش نرمال جهت حفره در راستای

قائم پایدارترین حالت است، مشبک کاری در چاه افقی با الگوی جناغی یا زیگزاگ^{۲۳} توصیه شده است [۵۶]. هر چند حفره‌ها در این الگو از راستای قائم فاصله می‌گیرند، افزایش فاصله حفره تا حفره^{۲۴} (*PPS*) نسبت به حالت مشبک کاری در یک جهت، تاثیر کاهش پایداری حفره را تا حدودی جبران می‌کند [۵۷]. انتخاب *CPOA* در این الگو بستگی به شرایط تنش‌های برجا دارد. با این حال، می‌توان محدوده بین زوایای ۲۰ تا ۳۰ [۵۶] و ۱۵ تا ۲۵ [۶۰] درجه را، به ترتیب، برای چاه‌های مایل و افقی در نظر گرفت. در صورت توانمندی در تمیزکاری نخاله‌های مشبک کاری، الگوی جناغی ضربدری^{۲۵} در زوایای اشاره شده، بهترین الگو برای چاه‌های افقی است [۵۶].

در رژیم گسلش نرمال، جهت حفره‌ها در چاه قائم در مخازن سست همگن و همسانگرد، مانند تاثیر آزمایشات، اهمیت کمتری دارد زیرا حفره‌های ایجاد شده در پیرامون چاه در راستای افقی بوده و در هر جهت، تنش قائم و افقی به نسبت ثابتی به بدنه حفره‌ها وارد می‌شوند. در چنین شرایطی، کاهش *spacing* و در نتیجه افزایش *SPF* با گذر از حد مشخص، به دلیل اثر متقابل حفره‌ها در راستای قائم، از تنش قائم می‌کاهد و موجب افزایش پایداری حفره‌ها می‌شود [۵۶]. به همین دلیل، در چاه‌های قائم با چنین شرایطی، استفاده از تفنگ‌های تراکم شلیک بالا^{۲۶} (*HSD*) توصیه شده است [۵۷]. الگوهای مشبک کاری غیرجناغی در مقایسه با الگوهای جناغی، امکان مشبک کاری با *spacing* کم‌تر را فراهم می‌کنند [۵۶]. در سنگ‌های ضعیف، انتخاب *PPS* ۳ تا ۴ برابری نسبت به اندازه قطر میانگین حفره‌ها را می‌توان معیاری برای جلوگیری از شکست بین حفره‌ها در نظر گرفت [۵۷]. با افزایش دبی تولیدی، افت فشار در اطراف حفره بیش‌تر می‌شود به طوری که کاهش *PPS* تا حدی خاص، با توجه به *spacing* آن‌ها، پایداری حفره‌ها را دچار چالش می‌کند [۵۶]. به همین دلیل، علاوه بر نگه داشتن فشار بیش‌تر از *CBHP*، برای حفظ دبی بالاتر و پایداری حفره‌ها، *phasing* نقش بسیار مهمی دارد. هندسه حفره‌ها دیگر پارامتر تاثیرگذار در جلوگیری از شکست بین حفره‌ها در *HSD* است [۵۷]. با کاهش اندازه قطر حفره‌ها، با حفظ معیار *PPS* اشاره شده، *SPF* افزایش می‌یابد. در نتیجه کاهش دبی حاصل از کاهش قطر حفره با افزایش تراکم

²⁴ Perf-to-Perf Spacing, PPS

²⁵ X-shape staggered

²⁶ High Shot Density, HSD

²¹ Shaped charge

²² Shot Per Foot, SPF

²³ Staggered

حفری تنها تا زاویه انحراف چاه حدود ۶۰ درجه مجاز است. با این حال، با توجه به تعداد کم تر حفر چاه‌های جدید نسبت به چاه‌های تعمیراتی به منظور مشبک‌کاری مجدد، قایم بودن عمده چاه‌های حفر شده در این میدان و هزینه کم تر روش WCP نسبت به روش‌های مرسوم دیگر مشبک‌کاری با لوله مغزه^{۲۹} یا لوله مغزه سیار^{۳۰}، روش WCP ترجیح داده می‌شود.

۷. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با توجه به حضور ماسه‌های سست در اغلب لایه‌های مخزن آسماری در میدان اهواز، همواره تولید از این میدان نیازمند مطالعات مهندسی و تعیین روش‌های مناسب کنترل تولید ماسه است. در این مطالعه، با مشخص کردن نواحی محتمل تر و مستعدتر تولید ماسه در میدان اهواز، چاه قایم شماره ۴۶۹ برای ارزیابی از منظر ظرفیت تولید ماسه در نظر گرفته شده است. به دلیل اهمیت اثر مقیاس حاصل از مشبک‌کاری، از نرم‌افزار تکلاگ به منظور ارزیابی تحلیلی فرایند تولید ماسه استفاده شده است. از آن جا که برای ارزیابی ظرفیت تولید ماسه نیاز به برآورد پارامترهای مقاومتی و مکانیکی سنگ سازند و تنش‌های برجا است، نمودار مجموعه کامل داده‌ها و دیگر پارامترهای اولیه مورد نیاز گردآوری شده‌اند. با ترسیم نمودار سنگ‌شناسی مخزن، لایه‌های ماسه‌ای از لایه‌های دیگر به صورت مشخص تمیز داده شده‌اند. پس از استخراج و برآورد پارامترهای مورد نیاز از روابط مربوطه، با فرض شرایط الاستیک منفذی و تاثیر ناچیز سازوکار رانش تراکمی حاصل از بازچینش دانه‌ها، نمودارهای مقاومتی و مکانیکی سنگ سازند و نیز تنش‌های برجا در این تحقیق ترسیم شده‌اند. پس از آن، نمودار $CDDP$ در طول ناحیه مخزنی برای دو روش تکمیل چاه، روش چاه باز و روش مشبک‌کاری با قطرهای پیشنهادی برای هر لایه مخزنی، ترسیم شده‌اند. این نمودار نشان از اهمیت کنترل لایه $A4$ و زیرلایه‌های $M2_a$ و $M2_d$ ، به ترتیب، از لحاظ تولید ماسه دارد.

پس از برآورد اولیه ظرفیت ماسه‌دهی در طول مخزن، بر اساس شرایط هندسی چاه، قطر غالب دانه‌های ماسه، شرایط تنش‌های برجا و ویژگی‌های مشبک‌کاری، تحلیل حساسیت پارامترها در دو عمق خاص صورت گرفته است. در

شلیک، جبران می‌شود. این کاهش قطر موجب افزایش PPS و در نتیجه کاهش اثر متقابل حفره‌ها و کاهش احتمال شکست بین آن‌ها خواهد شد (مطابق با شکل ۱۱-الف). همچنین، با افزایش طول حفره، علاوه بر افزایش دبی، از اندازه تنش قایم کاسته شده و در نتیجه موجب افزایش پایداری حفره‌ها خواهد شد [۵۶]. به همین دلیل، استفاده از خرج‌های حفر عمیق^{۲۷} (DP) در برنامه‌ریزی‌های تکمیل چاه شامل سیمان‌کاری و مشبک‌کاری توصیه می‌شود [۵۷].

با توجه به نزدیک بودن مقدار تنش‌های افقی به یکدیگر در مخازن ماسه‌سنگی سست با رژیم گسلش نرمال می‌توان از مقدار زاویه $MSDA$ به عنوان حدی برای انتخاب بین دو روش مشبک‌کاری توصیف شده برای جداری چاه‌های قایم و افقی استفاده کرد.

اعمال موارد توصیف شده مستلزم قابل اجرا بودن آن‌ها در شرایط موجود در میدان و از لحاظ عملیاتی است. به طور مثال، در مخازن محتمل به تولید ماسه، به منظور حفظ شکل مخروطی حفره‌ها در تمام طول حفره و جلوگیری از آسیب به بدنه آن، مشبک‌کاری در شرایط فروتعدالی^{۲۸} توصیه می‌شود [۵۷] که در شرایط افقی با ایجاد حفره در جهت‌های خاص، با ابزارهای موجود چالش برانگیز است. شرایط ژئومکانیکی و مخزنی نامناسب در طول چاه در کنار کمبود امکانات، مشکل را در این موارد چند برابر خواهد کرد. به طور مثال، وجود سازند گچساران پرفشار در بالای مخزن آسماری در این میدان، انحراف چاه برای رسیدن به حالت افقی در مخزن را دچار مشکل خواهد کرد به طوری که با افزودن افزودنی‌ها به سیالات برای کنترل شرایط، وزن آن‌ها افزایش می‌یابد و مشکل پایداری چاه را از لحاظ شکست پوش سنگ محتمل می‌کند. حصول بهترین نتیجه، نیازمند بررسی تمامی موارد و مشکل‌ها در کنار هم است. انتخاب نوع عملیات مشبک‌کاری متاثر از حضور یا عدم حضور دکل بر سر چاه است. اجرای این عملیات در حضور دکل به دلایل مختلف از جمله توانمندی در حمل تعداد بیش‌تری از تفنگ‌ها حتی با اندازه‌های بزرگ‌تر در یک مرحله عملیات در شرایط فروتعدالی و همچنین عدم محدودیت اندازه زاویه انحراف چاه در مقایسه با روش WCP ، بهترین نوع عملیات مشبک‌کاری است. در روش WCP ،

²⁹ Tubing-Conveyed Perforating, TCP

³⁰ Coiled Tubing-Conveyed Perforating, CTCP

²⁷ Deep Penetrating, DP

²⁸ UnderBalanced Drilling, UBD

ارزیابی مخازن از منظر تولید ماسه، محتمل‌ترین عمق از منظر ضعف سازندی ملاک قرار گرفته است، بنابراین با توجه به نمودارهای *CDDP* و همچنین نمودارهای مقاومتی سنگ سازند در طول ناحیه مخزنی و گزارش‌های موجود، لایه *M2* (*A8:M2_d*) به دلیل داشتن سست‌ترین ماسه‌های سازندی، تخلخل و تراوایی بالا و در بر داشتن بیش‌ترین حجم سیال مخزنی، در عمق ۲۸۳۷ متری برای ارزیابی عمقی در روش مشبک‌کاری انتخاب شده است. همچنین، به منظور بررسی و نمایش بهتر تاثیر پارامترها بر ظرفیت ماسه‌دهی در حالت چاه باز، عمق ۲۸۲۲ متری در نظر گرفته شده است.

CBHP و *CRP* در عمق مربوط به روش چاه باز، به ترتیب، برابر با ۲۴۲۰ و ۱۱۰۰ پام و در عمق مربوط به مشبک‌کاری، به ترتیب، ۱۸۹۸ و ۲۷۳۵ پام برای حفره با اندازه قطر ۰/۴ اینچ در راستای جهت تنش افقی حداکثر و ۸۶۱ و ۲۱۱۵ پام برای حفره با اندازه قطر ۰/۳ اینچ در راستای عمود بر آن به دست آمده است.

بر اساس نتایج، هر چه زاویه آزیموت چاه به راستای تنش افقی حداکثر نزدیک‌تر شود از مساحت ناحیه ایمن کاسته می‌شود. در نتیجه با توجه به جهت تنش افقی حداکثر *N50E* در این میدان، زوایای آزیموت چاه ۱۴۰ و ۳۲۰ درجه بیش‌ترین مساحت ناحیه ایمن را خواهند داشت. مقدار انحراف چاه تاثیر معکوسی بر این مساحت دارد به طوری که با زوایای انحراف بیش‌تر از ۳۳ درجه در عمق مربوط به روش چاه باز، این چاه از شروع تولید ماسه‌دهی خواهد بود. با کاهش قطر چاه به مساحت ناحیه ایمن افزوده می‌شود به طوری که با اندازه قطر $4\frac{1}{8}$ اینچ، تولید بدون ماسه از این چاه با مقادیر *CBHP* و *CRP*، به ترتیب، برابر با ۳۶۰۶ و ۳۲۷۰ پام ممکن می‌شود. با افزایش قطر غالب دانه‌های سنگ سازند، مساحت ناحیه ایمن افزایش می‌یابد به طوری که در عمق مورد مطالعه در روش چاه باز، ظرفیت ماسه‌دهی با اندازه قطر دانه‌های بزرگ‌تر از ۳۵۰ میکرون همواره قابل کنترل خواهد بود.

نسبت تغییر تنش به دلیل مرتبط بودن با تخلیه مخزن، اثری بر *CDDP* حال حاضر مخزن ندارد و تفاوت مقداری این پارامتر تنها *CRP* را تغییر می‌دهد به طوری که با افزایش آن، مساحت ناحیه ایمن کاهش می‌یابد. در محدوده مقادیر بررسی شده برای تنش‌های میدانی در عمق مربوط به روش چاه باز، تنش‌های افقی حداکثر و قائم، بر خلاف تنش افقی حداقل،

تاثیر معکوس روی مساحت ناحیه ایمن دارند. مقادیر تنش بیش‌تر از ۵۷ و ۶۶ مگاپاسکال، به ترتیب، برای تنش‌های افقی حداکثر و قائم، مخزن را در مرحله به طور کامل ماسه‌دهی قرار می‌دهد در حالی که تغییر مقدار تنش افقی حداقل چنین تاثیری ندارد. در مقادیر تنش افقی حداکثر کم‌تر از حدود ۴۹ مگاپاسکال، ناحیه کنترلی به طور کامل ایمن در طول عمر تولید از مخزن محتمل خواهد بود. روند تاثیر تغییرات مقادیر تنش‌های افقی بر ناحیه ایمن نشان از وسعت بیش‌تر این ناحیه در شرایط نزدیکی مقادیر این دو تنش به یکدیگر دارد. بر اساس سازوکار ناپایداری مچاله‌شوندگی حفره، با کاهش قطر حفره به مساحت ناحیه ایمن افزوده می‌شود به طوری که در لایه‌های *A2* تا *A5* و چهار زیر لایه *M2*، به ترتیب، با قطر حفره‌های ۰/۴، ۰/۶، ۰/۳، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷، ۰/۷ و ۰/۶ اینچ، نمودار *CDDP* در تخلیه صفر درصدی تا حدی ایمن می‌شوند. با توجه به نمودار *CDDP*، از لحاظ تاثیرپذیری نسبت به عملیات مشبک‌کاری و طول نواحی مستعد تولید ماسه، لایه‌های *A2* و *A5* کم‌اهمیت‌ترین، *A3*، و به خصوص *M2*، تاثیرپذیرترین و *A4* بااهمیت‌ترین لایه‌ها هستند. در چاه قائم با رژیم گسلش نرمال، همانند تاثیر راستای تنش افقی حداکثر بر زاویه آزیموت چاه، هر چه زاویه حفره با این راستا بیش‌تر شود، مساحت ناحیه ایمن بیش‌تر خواهد شد. در این رژیم گسلش، نزدیک شدن راستای حفره‌ها به راستای تنش قائم به پایداری آن‌ها می‌افزاید به طوری که حفره با زاویه *PO* صفر درجه، با جهت آزیموت چاه در جهت تنش افقی حداکثر، در زاویه انحراف چاه ۵/۶ درجه از حالت ناپایدار به حالت پایدار تغییر می‌کند و در زاویه انحراف چاه ۴۷/۳ درجه به اولین حفره پایدار تبدیل خواهد شد.

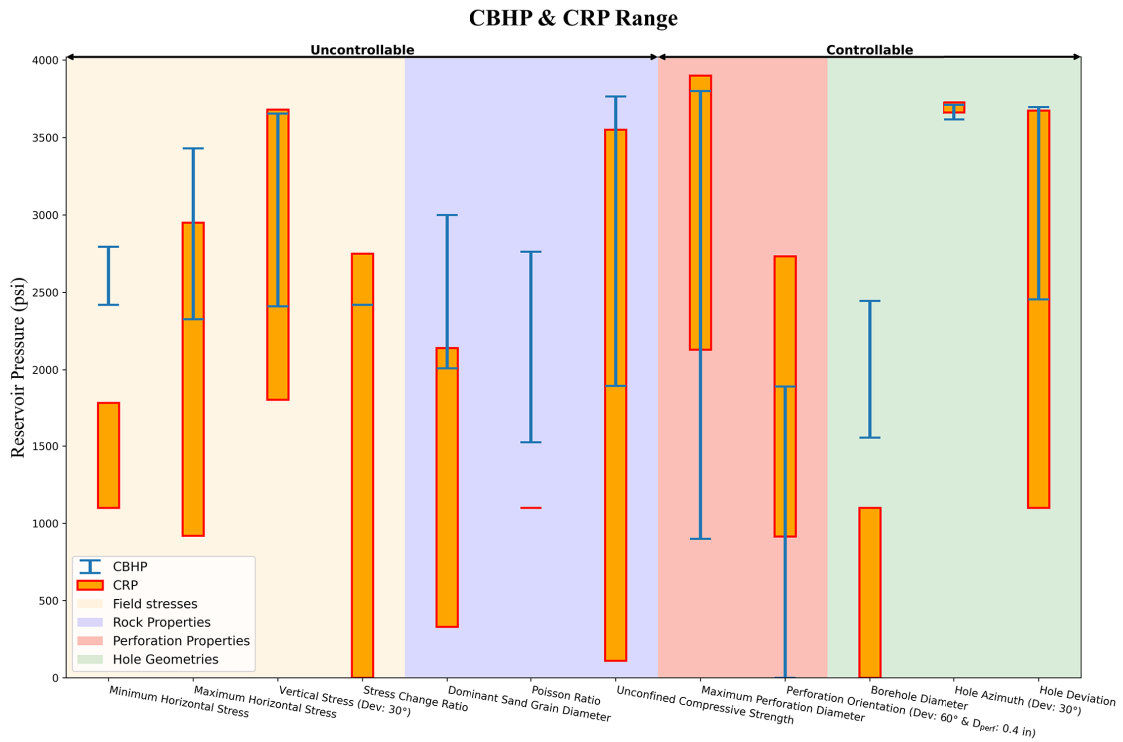
تاثیر تغییر هر یک از پارامترهای بررسی شده بر شکل ناحیه ایمن در تحلیل مثلثی تولید ماسه در جدول ۱ آورده شده است. در صورت تاثیرپذیری بیش‌تر هر یک از پارامترهای فشاری نسبت به دیگری، توضیحات مربوط به آن پارامتر در این جدول ضخیم‌تر نشان داده شده است. علاوه بر تاثیر پارامترهای مورد بررسی بر شکل ناحیه ایمن، میزان محدوده قابل تغییر *CBHP* و *CRP* نیز، با توجه به محدوده مقادیر بررسی شده آن‌ها، در شکل ۱۳ نشان داده شده است. با توجه به سازوکارهای رانش فعال در این مخزن، افت فشار آن ناچیز بوده و در تحلیل‌ها قابل چشم‌پوشی است. به همین دلیل، در

توصیه می‌شود. در این نوع چاه‌ها، با کاهش قطر حفره‌ها پایداری به دلیل افزایش *PPS* بیش‌تر می‌شود اما دبی کاهش می‌یابد که با افزایش طول حفره‌ها می‌توان تا حدودی آن را جبران کرد. همچنین، با تراکم شلیک بالا تا حدی مناسب، همراه با افزایش دبی تولیدی، از میزان تنش قائم اعمالی بر حفره‌ها کاسته شده و موجب افزایش پایداری آن‌ها می‌شود. در نتیجه، مشبک‌کاری با الگوی غیرجناغی *HSD* با استفاده از خرج‌های *DP* برای ایجاد حفره‌های کم‌قطرتر و طولانی‌تر توصیه می‌شود. برای چاه‌های مایل می‌توان از اندازه *MSDA* برای انتخاب بین یکی از این دو روش استفاده کرد. با توجه به این که در محدوده چاه مورد مطالعه مقدار *MSDA* برابر با $47/3$ درجه بوده است، می‌توان برای زوایای انحراف چاه کم‌تر از آن، روش توصیه شده برای چاه قائم و برای زوایای انحراف چاه بیش‌تر از آن، روش توصیه شده برای چاه افقی را مد نظر قرار داد. ذکر این نکته حایز اهمیت است که انجام عملیات مشبک‌کاری در شرایط فروتعدالی به حفظ شکل مخروطی، کاهش تخریب، بهبود تمیزکاری و در نتیجه افزایش تولید از حفره‌ها کمک خواهد کرد.

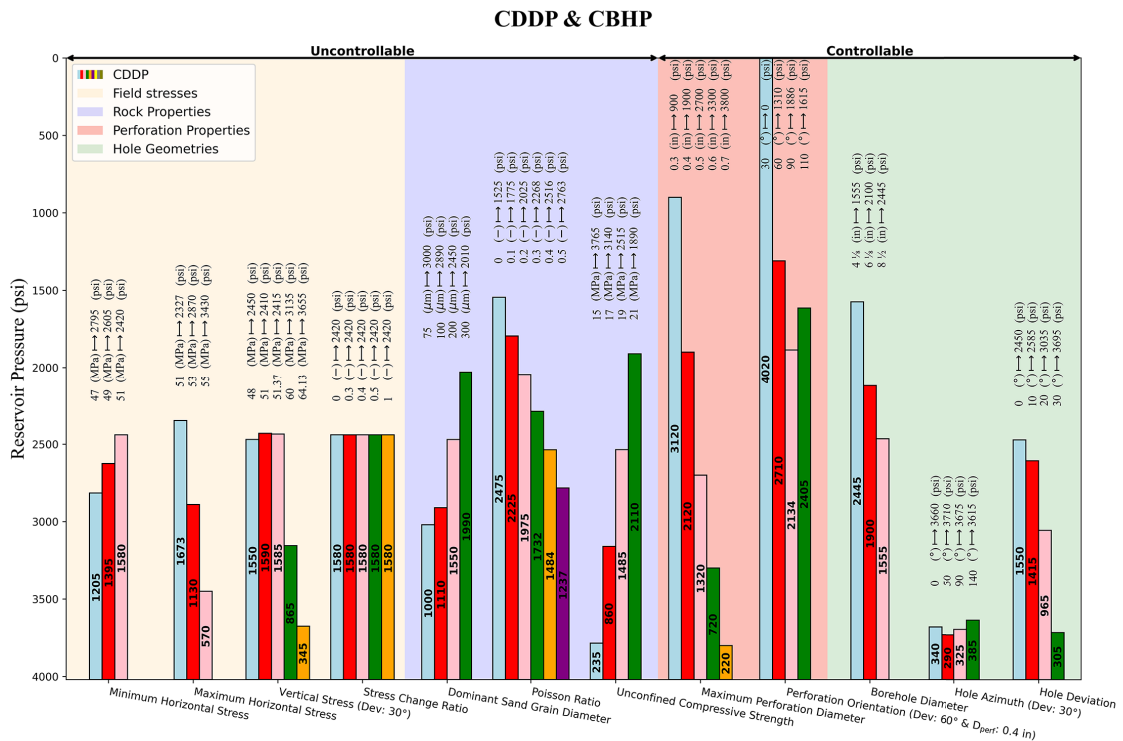
شکل ۱۴، تاثیر هر یک از مقادیر پارامترهای انتخاب شده بر میزان *CBHP* و *CDDP*، تنها در تخلیه صفر درصد نشان داده شده است. در این شکل، مقادیر *CDDP* متناظر هر یک از مقادیر انتخابی در داخل مستطیل رنگی نشان داده شده‌اند. تولید ماسه محث پیچیده‌ای است که طراحی و اجرای آن نیازمند مطالعه گسترده پدیده‌های حاکم و امکانات موجود به طور توأمان است. با این حال، در شرایط حاکم بر این میدان، حفر چاه افقی در راستای تنش افقی حداکثر و مشبک‌کاری با الگوی جناغی ضربدری با توجه به زاویه *PO* مجاز بهترین حالت است؛ این زاویه در این چاه برابر با 43 درجه تعیین شده است. در نتیجه محدوده بین زوایای 315 و 43 درجه در سمت بالایی چاه و زوایای 137 تا 223 درجه در سمت پایینی آن ایمن هستند به طوری که هر چه *PPS* بیش‌تر باشد، پایداری حفره‌ها بیش‌تر است. در صورت عدم توانمندی در تمیزکاری نخاله‌های مشبک‌کاری، تنها مشبک‌کاری در سمت بالایی چاه توصیه می‌شود. در چاه قائم به استفاده از الگوهای غیرجناغی برای ایجاد حفره‌ها در پیرامون چاه به دلیل همسانگردی تقریبی تنش‌ها و تاثیر به نسبت یکنواخت آن‌ها بر حفره‌ها

جدول ۱. تاثیر پارامترهای مورد بررسی بر شکل ناحیه ایمن در تحلیل مثلثی تولید ماسه

پارامتر	محدوده	واحد	<i>SDDL</i>		<i>CBHP</i>		<i>CRP</i>	
			زاویه	رشد	رشد	رشد	رشد	
<i>Az</i>	$140 \rightarrow 0$	(°)	ثابت	تا ۵۰ کاهش، سپس تا ۱۰۰ افزایش، سپس کاهش	تا ۵۰ کاهش، سپس تا ۱۰۰ افزایش، سپس کاهش	تا ۵۰ کاهش، سپس تا ۱۰۰ افزایش، سپس کاهش	تا ۵۰ کاهش، سپس تا ۱۰۰ افزایش، سپس کاهش	تا ۱۰۰ کاهش، سپس تا ۱۰۰ افزایش، سپس کاهش
<i>Dev</i>	$30 \rightarrow 0$	(°)	افزایشی	افزایشی	افزایشی	افزایشی	افزایشی	تا ۱۰ افزایشی سپس کاهش
<i>D_{hole}</i>	$8 \frac{1}{2} \rightarrow 4 \frac{1}{8}$	(in)	ثابت	افزایشی	کاهش	افزایشی	کاهش	کاهش
<i>D_{gr}</i>	$300 \rightarrow 75$	(μm)	ثابت	کاهش	کاهش	کاهش	کاهش	کاهش
θ_s	$0.5 \rightarrow 0$	(-)	کاهش	افزایشی	به نسبت ثابت	افزایشی	بی‌اثر	بی‌اثر
<i>UCS</i>	$21 \rightarrow 15$	(MPa)	ثابت	کاهش	ثابت	کاهش	کاهش	ثابت
<i>S_h</i>	$51 \rightarrow 47$	(MPa)	ثابت	کاهش	ثابت	کاهش	کاهش	ثابت
<i>S_H</i>	$55 \rightarrow 51$	(MPa)	ثابت	افزایشی	ثابت	افزایشی	افزایشی	ثابت
<i>S_v</i>	$64 \rightarrow 51$	(MPa)	افزایشی	افزایشی	کاهش	افزایشی	کاهش	کاهش
<i>A</i>	$1 \rightarrow 0$	(-)	افزایشی	بی‌اثر	بی‌اثر	افزایشی	کاهش	کاهش
<i>D_{perf}</i>	$0.7 \rightarrow 0.3$	(in)	ثابت	افزایشی	ثابت	افزایشی	افزایشی	ثابت
<i>PO</i>	$110 \rightarrow 30$	(°)	به نسبت ثابت	تا ۹۰ افزایشی سپس کاهش	کاهش	تا ۹۰ افزایشی سپس کاهش	تا ۹۰ افزایشی سپس کاهش	کاهش



شکل ۱۳. محدوده قابل تغییر اندازه مقادیر CBHP و CRP با مقادیر انتخابی پارامترهای بررسی شده در تحلیل حساسیت



شکل ۱۴. تأثیر اندازه مقادیر هر یک از پارامترهای مورد بررسی بر اندازه مقادیر CDDP و CBHP در فشار حال حاضر مخزن

شرکت پتروایران، که با شکیبایی بسیار در جمع‌آوری اطلاعات و انتقال معلومات و تجربیات ارزشمند در فهم بهتر ابعاد مساله تولید ماسه و بخش‌های عملیاتی همکاری نموده‌اند، کمال تشکر را دارم.

۹. فهرست نمادها

جدول ۲، نمادهای استفاده شده در بخش ۴ این مقاله را نشان می‌دهد:

۸. تشکر و قدردانی

این تحقیق در قالب قرارداد شماره ۱۳۸۰-دک-۹۸ مورخ ۱۳۹۸/۱۲/۲۰ شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب انجام شده است. بر این اساس مراتب قدردانی نویسندگان از مدیران و کارشناسان محترم شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب اعلام می‌شود. همچنین از دیگر متخصصین محترم در دیگر شرکت‌های تابعه وزارت نفت، شرکت‌های خدماتی فنی چاه و جناب آقای دکتر محمد صادقی، رییس عملیات حفاری در

جدول ۲. فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح	نماد	واحد	شرح
dz	m	عمق	AirGap	m	ارتفاع کف دکل ^{۳۱} تا سطح زمین
TVD	m	عمق قائم حقیقی ^{۳۲}	WaterDepth	m	ارتفاع سطح آب تا کف دریا
D_{gr}	mm	قطر دانه سنگ سازند	DTCO	$\mu s/ft$	کندی ^{۳۳} فشاری
D_{perf}	mm	قطر حفره مشبک‌کاری شده	DTSM	$\mu s/ft$	کندی برشی
ρ_b	g/cm^3	چگالی بالک	$\rho_{extrapolated}$	g/cm^3	چگالی برون‌یابی شده
$\rho(z)$	g/cm^3	چگالی در عمق (z)	$\rho_{mudline}$	g/cm^3	چگالی در سطح زمین یا کف دریا
a	-	پارامتر برازشی برون‌یابی	A_0	-	پارامتر برازشی برون‌یابی
α	-	ضریب بایوت	g	m/s^2	شتاب گرانش
\emptyset	%	تخلخل	φ	$^{\circ}$	زاویه اصطکاک داخلی
ϑ_s	-	نسبت پواسون استاتیکی	ϑ_d	-	نسبت پواسون دینامیکی
E_s	GPa	مدول یانگ استاتیکی	E_d	GPa	مدول یانگ دینامیکی
G_s	GPa	مدول برشی استاتیکی	G_d	GPa	مدول برشی دینامیکی
K_s	GPa	مدول بالک استاتیکی	K_d	GPa	مدول بالک دینامیکی
n	-	پارامتر برازشی اثر مقیاس	a_{ucs}	-	پارامتر برازشی اثر مقیاس
S_0	MPa	چسبندگی	UCS	MPa	مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ
T	MPa	مقاومت کششی سنگ	UCS_{appar.}	MPa	مقاومت فشاری تک‌محوره ظاهری
τ	MPa	تنش برشی	S_h'	MPa	تنش افقی حداقل موثر
S_h	MPa	تنش افقی حداقل	S_H'	MPa	تنش افقی حداکثر موثر
S_H	MPa	تنش افقی حداکثر	S_v'	MPa	تنش قائم یا فشار روباره موثر
S_v	MPa	تنش قائم یا فشار روباره	S_H^d	MPa	تنش افقی حداقل تخلیه شده
S_h^d	MPa	تنش افقی حداقل تخلیه شده	-	-	کرنش تکتونیکی در جهت تنش افقی حداقل
S_1'	MPa	تنش موثر در دیواره چاه	-	-	کرنش تکتونیکی در جهت تنش افقی حداکثر
V_P	psi/ft	گرادیان فشار منفذی	A	-	نسبت تغییر تنش
P_p	MPa	فشار منفذی مخزن	Depletion	%	نرخ تخلیه فشار منفذی
P_p^d	MPa	فشار منفذی تخلیه شده	CDDP	MPa	افت فشار بحرانی

³¹ Rig floor

³² True Vertical Depth, TVD

³³ Slowness

۱۰. مراجع

- Fluid rate enhancement from massive sand production in heavy-oil reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 17 (1), 5-18. [https://doi.org/10.1016/S0920-4105\(96\)00052-6](https://doi.org/10.1016/S0920-4105(96)00052-6).
- [17] van den Hoek, P.J. and M.B. Geilikman. (2003). Prediction of sand production rate in oil and gas reservoirs. (SPE-84496-MS). <https://doi.org/10.2118/84496-MS>.
- [18] Papamichos, E., et al. (2001). Volumetric sand production model and experiment. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 25 (8), 789-808. <https://doi.org/10.1002/nag.154>.
- [19] Fjaer, E., et al. (2004). Modeling the rate of sand production. (ARMA-04-588). <https://onepetro.org/ARMANARMS/proceedings-abstract/ARMA04/All-ARMA04/ARMA-04-588/117652>.
- [20] Fjær, E. and E. Papamichos. (2008). The variable rate of sand production captured by an analytical model. Perth (355-368). Perth: Australian Centre for Geomechanics. https://doi.org/10.36487/ACG_repo/808_58.
- [21] Papanastasiou, P. (2006). Cavity stability prediction method for wellbores. U.S. Patent. US 7,066,019 B1. Schlumberger Tech. Corp.. <https://patents.google.com/patent/US7066019B1/en>.
- [22] Subbiah, S., et al. (2008). Solving completion options for underground gas storage through geomechanics. (SPE-116409-MS). <https://doi.org/10.2118/116409-MS>.
- [23] Papamichos, E., et al. (2010). Hole stability of red wildmoor sandstone under anisotropic stresses and sand production criterion. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 72 (1), 78-92. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2010.03.006>.
- [24] Subbiah, S.K., et al. (2014). An innovative approach for sand management with downhole validation. <https://doi.org/10.2118/168178-MS>.
- [25] Gholami, R., et al. (2016). An analytical model to predict the volume of sand during drilling and production. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8 (4), 521-532. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.01.002>.
- [26] Fuller, J., et al. (2017). Balancing productivity and sanding risk in weak sandstones through a size dependent approach. (ARMA-2017-0600). <https://onepetro.org/ARMAUSRMS/proceedings-abstract/ARMA17/All-ARMA17/ARMA-2017-0600/124454>.
- [27] Papanastasiou, P. and M. Thiercelin. (2011). Modeling borehole and perforation collapse with the capability of predicting the scale effect. *International Journal of Geomechanics*, 11 (4), 286-293. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000013](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000013).
- [28] Papamichos, E. and K. Furui. (2019). Analytical models for sand onset under field conditions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 172 171-189. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.03.006>.
- [1] Yi, X. (2003). Numerical and analytical modeling of sanding onset prediction. Doctor of Philosophy, Texas A&M University, Petroleum Engineering. <https://hdl.handle.net/1969.1/369>.
- [2] Subbiah, S.K., et al. (2021). Root cause of sand production and methodologies for prediction. *Petroleum*, 7 (3), 263-271. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2020.09.007>.
- [3] Hall, C.D., Jr. and W.H. Harrisberger. (1970). Stability of sand arches: A key to sand control. *Journal of Petroleum Technology*, 22 (07), 821-829. <https://doi.org/10.2118/2399-PA>.
- [4] Antheunis, D., et al. (1976). Perforation collapse: Failure of perforated friable sandstones. (SPE-5750-MS). <https://doi.org/10.2118/5750-MS>.
- [5] Nordgren, R.P. (1977). Strength of well completions. (ARMA-77-0236). <https://onepetro.org/ARMAUSRMS/proceedings-abstract/ARMA77/All-ARMA77/ARMA-77-0236/128939>.
- [6] Risnes, R., et al. (1982). Sand stresses around a wellbore. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 22(06), 883-898. <https://doi.org/10.2118/9650-PA>.
- [7] Bratli, R.K. and R. Risnes. (1981). Stability and failure of sand arches. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 21 (02), 236-248. <https://doi.org/10.2118/8427-PA>.
- [8] Geilikman, M.B., et al. (1994). Sand production as a viscoplastic granular flow. (SPE-27343-MS). <https://doi.org/10.2118/27343-MS>.
- [9] Weingarten, J.S. and T.K. Perkins. (1995). Prediction of sand production in gas wells: Methods and gulf of mexico case studies. *Journal of Petroleum Technology*, 47 (07), 596-600. <https://doi.org/10.2118/24797-PA>.
- [10] Morita, N. (1994). Field and laboratory verification of sand-production prediction models. *SPE Drilling & Completion*, 9 (04), 227-235. <https://doi.org/10.2118/27341-PA>.
- [11] Bradford, I.D.R., et al. (1998). Benefits of assessing the solids production risk in a north sea reservoir using elastoplastic modelling. (SPE-47360-MS). <https://doi.org/10.2118/47360-MS>.
- [12] Rhett, D.W. and R. Risnes. (2002). Predicting critical borehole pressure and critical reservoir pore pressure in pressure depleted and repressurized reservoirs. (SPE-78150-MS). <https://doi.org/10.2118/78150-MS>.
- [13] Willson, S.M., et al. (2002). New model for predicting the rate of sand production. (SPE-78168-MS). <https://doi.org/10.2118/78168-MS>.
- [14] Palmer, I., et al. (2003). Predicting and managing sand production: A new strategy. (SPE-84499-MS). <https://doi.org/10.2118/84499-MS>.
- [15] Geilikman, M.B., et al. (1994). Fluid production enhancement by exploiting sand production. (SPE-27797-MS). <https://doi.org/10.2118/27797-MS>.
- [16] Geilikman, M.B. and M.B. Dusseault. (1997).

- transactions of the royal society of london. Series A, containing papers of a mathematical or physical character, 221 (582-593), 163-198. <https://doi.org/10.1098/rsta.1921.0006>.
- [46] Zoback, M.D. (2007). Reservoir geomechanics.
- [47] Terzaghi, K. (1923). Theoretical soil mechanics.
- [48] Krief, M., et al. (1990). A petrophysical interpretation using the velocities of p and s waves (full-waveform sonic). The Log Analyst, 31 (06), <https://onepetro.org/petrophysics/article-abstract/170750/A-Petrophysical-Interpretation-Using-the?redirectedFrom=fulltext>.
- [49] Klimentos, T. (2003). Nmr applications in petroleum related rock-mechanics: Sand control, hydraulic fracturing, wellbore stability. (SPWLA-2003-HHH). <https://onepetro.org/SPWLAALS/proceedings-abstract/SPWLA-2003/All-SPWLA-2003/SPWLA-2003-HHH/27418>.
- [50] Thiercelin, M.J. and R.A. Plumb. (1994). Core-based prediction of lithologic stress contrasts in east texas formations. SPE Formation Evaluation, 9(04),251-258. <https://doi.org/10.2118/21847-PA>.
- [51] Khaksar, A., et al. (2009). Rock strength from core and logs, where we stand and ways to go. (SPE-121972-MS). <https://doi.org/10.2118/121972-MS>.
- [52] Teufel, L.W., et al. (1991). Effect of reservoir depletion and pore pressure drawdown on in situ stress and deformation in the ekofisk field, north sea. (ARMA-91-063). <https://onepetro.org/ARMAUSRMS/proceedings-abstract/ARMA91/All-ARMA91/ARMA-91-063/130305>.
- [53] Hettema, M.H.H., et al. (2000). Production-induced compaction of a sandstone reservoir: The strong influence of stress path. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 3 (04), 342-347. <https://doi.org/10.2118/65410-PA>.
- [54] Ray, P., et al. (2014). Estimating sand production volume in oil and gas reservoir. (SPE-170814-MS). <https://doi.org/10.2118/170814-MS>.
- [55] Wong, T., et al. (1997). The transition from brittle faulting to cataclastic flow in porous sandstones: Mechanical deformation. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 102 (B2), 3009-3025. <https://doi.org/10.1029/96JB03281>.
- [56] Morita, N. (2022). Geomechanics of sand production and sand control.
- [57] Martin, A., et al. (2005-2007). Perforation. Schlumberger private seminar. Aberdeen, UK.
- [58] Halliburton. Perforating solutions catalog. https://www.halliburton.com/en/resources/perforating_solutions_catalog.
- [59] Schlumberger. Orientxact catalog. <https://www.slb.com/-/media/files/smith/catalogs/drilling-tool-s-catalog.ashx>.
- [60] Venkitaraman, A., et al. (2000). Perforating requirements for sand prevention. (SPE-58788-MS). <https://doi.org/10.2118/58788-MS>.
- 8.09.009.
- [29] Papamichos, E. (2020). Analytical models for onset of sand production under isotropic and anisotropic stresses in laboratory tests. Geomechanics for Energy and the Environment, <https://doi.org/10.1016/j.gete.2019.100149>.
- [30] Subbiah, S.K., et al. (2020). Sanding propensity prediction technology and methodology comparison. <https://doi.org/10.2118/203238-MS>.
- [31] Subbiah, S.K., et al. (2021). Development of new novel constitutive model for deep reservoir sandstone rock for sand production application. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1051 (1), 012093. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1051/1/012093>.
- [32] Subbiah, S.K., et al. (2021). Managing sanding risk in sandstone reservoir through a new constitutive model. <https://doi.org/10.2118/204666-MS>.
- [33] Subbiah, S.K., et al. (2023). New numerical method for sand production propensity estimation. <https://doi.org/10.2118/213381-MS>.
- [34] Asadi, S. and A. Khaksar. (2022). Analytical and numerical sand production prediction calibrated with field data, example from high-rate gas wells. <https://doi.org/10.2118/210776-MS>.
- [35] Papamichos, E., et al. (2022). Comparison of sand onset and sand mass models in a field case. (ARMA-2022-0425). <https://doi.org/10.56952/ARMA-2022-0425>.
- [36] Sridhar, G., et al. (2022). Field equipment data system. WIPO. WO 2022/204723 A1. <https://patents.google.com/patent/WO2022204723A1>.
- [37] https://fa.wikipedia.org/wiki/میدان_نفتی_اهواز.
- [38] Ghofrani, E. (2001). Reservoir quality assesment of asmari formation in the eastern part of ahvaz field. Master of Science, University of Tehran, Petroleum Geology.
- [39] Mojoudi, M. (2001). Reservoir quality assesment of asmari formation in the western part of ahvaz field. Master of Science, University of Tehran, Petroleum Geology.
- [40] National Iranian South Oilfields Company (NISOC). (2023).
- [41] Fjaer, E., et al. (2021). Petroleum related rock mechanics.
- [42] Ameen, M.S., et al. (2009). Predicting rock mechanical properties of carbonates from wireline logs (a case study: Arab-d reservoir, ghawar field, saudi arabia). Marine and Petroleum Geology, 26 (4), 430-444. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.01.017>.
- [43] Schlumberger. (2015). Techlog pore pressure prediction and wellbore stability analysis workflow / solutions training.
- [44] Schlumberger. (2019). Techlog. [2018.1].
- [45] Griffith, A.A. (1921). Vi. The phenomena of rupture and flow in solids. Philosophical