



مقاله پژوهشی

تحلیل المان محدود برای بررسی احتمال موفقیت تکنولوژی قفس تنش نسبت به رژیم تنش‌های برجا در کنترل هرزروی سیال حفاری

پویا عبدالله‌پور^۱؛ سید شهاب طباطبایی مرادی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد مهندسی حفاری، دانشکده مهندسی نفت و گاز، دانشگاه صنعتی سهند

۲- عضو هیات علمی دانشکده مهندسی نفت و گاز، دانشگاه صنعتی سهند

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۱۹ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۲۵

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/jpg.2022.365318.1181

واژگان کلیدی	چکیده
هرزروی سیال حفاری، زمان‌های غیر بهره‌ده، روش‌های پیشگیری، تکنولوژی قفس تنش، روش‌های درمانی	هرزروی سیال حفاری به درون سازندهای تحت الارضی، در مناطق با نفوذپذیری بالا، سازندهای دارای شکستگی‌های طبیعی، و سازندهای ضعیف یکی از مشکلات رایج در عملیات حفاری چاه‌های نفت و گاز است. برخی تحقیقات نشان می‌دهد که حدود ۲۰ درصد از زمان‌های غیر بهره‌ده در حین عملیات حفاری به دلیل مشکل هرزروی سیال حفاری است. به‌طور کلی روش‌های درمانی و پیشگیرانه، دو رویکرد اصلی مقابله با مشکل هرزروی سیال حفاری هستند. یکی از روش‌های پیشگیری از هرزروی سیال حفاری به کارگیری روش قفس تنش به منظور افزایش فشار شکست سازندهای اطراف چاه می‌باشد. عوامل متعددی از جمله پارامترهای مکانیکی سنگ، ویژگی‌های مواد پل زنده، رژیم تنش‌ها و ویژگی سیالات حفاری در میزان اثربخشی این تکنولوژی موثر است. در این پژوهش تاثیر نسبت رژیم تنش‌های افقی بر میزان اثربخشی تکنولوژی قفس تنش بررسی شده است. بدین منظور ابتدا مدل سه‌بعدی چاه و با در نظر گرفتن رفتار الاستیک سنگ ارائه شده و سپس تغییرات تنش مماسی در دو حالت پیش از ایجاد شکاف و پس از پل زدن شکاف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که بر مبنای داده‌های مورد استفاده، استفاده از این تکنولوژی باعث افزایش میانگین تنش مماسی به میزان ۳۶۱۸ پام در دیواره چاه و در نتیجه افزایش فشار شکست سازند شد. این امر در سازندهای سست از ایجاد شکستگی‌های القائی و هرزروی سیال حفاری جلوگیری می‌کند. همچنین حداکثر تنش مماسی در موقعیت پل زدن ۰/۵ اینچی از دهانه شکاف مشاهده شد. از سوی دیگر نتایج نشان داد که اثربخشی قفس تنش به نسبت تنش‌های افقی برجا وابسته است. بر مبنای نتایج مدل عددی، در نسبت‌های تنش افقی کمینه به بیشینه بیشتر از ۰/۷۱۵، کاربرد تکنولوژی قفس تنش منجر به افزایش تنش مماسی می‌شود.

۱. پیش‌گفتار

و سازندهای ضعیف اتفاق می‌افتد، جایی که وجود شکستگی‌های طبیعی و القائی شرایط هرزروی را تشدید می‌کند. برخی تحقیقات نشان می‌دهد که حدود ۲۰ درصد از زمان‌های غیر بهره‌ده در حین عملیات حفاری به دلیل مشکلات هرزروی سیال حفاری است [۱-۶]. امروزه روش‌های مختلفی برای کنترل و مدیریت هرزروی سیال حفاری در مناطق مختلف جهان ارائه و به کار گرفته

کاهش زمان‌های غیر بهره‌ده در حفاری چاه‌های نفت و گاز، یکی از اهداف مهم برای محققین در این حوزه است. یکی از دلایل اصلی زمان‌های غیر بهره‌ده در عملیات حفاری، هرزروی سیال حفاری به درون سازندهای تحت الارضی است. هرزروی سیال در مناطق با نفوذپذیری بالا، سازندهای طبیعی شکسته،

¹ Non-Productive Time

تکنولوژی قفس تنش، منجر به افزایش فشار شکست سازند و در نتیجه پهنای پنجره وزن سیال حفاری می‌گردد [۱، ۱۲-۱۶].

در سال ۲۰۰۴، اولین مدل فیزیکی دوبعدی بر پایه رفتار الاستیک خطی و المان محدود توسط آقای آلبرتی^۸ و همکاران ارائه شد. در نتیجه بررسی این مدل، پژوهشگران بیان داشتند که اثربخشی تکنولوژی قفس تنش تابع مواردی از جمله خواص سیالات حفاری، نوع سازند و هندسه شکاف و چاه است [۱۳].

گیل^۹ و همکاران (۲۰۰۶) بر اثربخشی کم فناوری قفس تنش در سنگ‌های دارای نفوذپذیری کم مانند شیل‌ها تاکید کرده و روش جدیدی را برای کاربرد این فناوری در چنین سازندهایی پیشنهاد کردند. این روش شامل پیش‌خنک کردن سازند برای کاهش تنش حلقه اول و سپس دنبال کردن مراحل تکنولوژی قفس تنش معمولی بود. در نتیجه این پژوهش، نویسندگان حساسیت شیل‌ها به تغییرات دما و کاربرد روش پیشنهادی را در افزایش اثربخشی قفس تنش در سنگ‌های دارای نفوذپذیری کم بیان داشتند [۱۷].

در سال ۲۰۰۷، وانگ^{۱۰} و همکاران مدل عددی خود را برای بررسی مبانی مشکل هرزروی سیال حفاری و اثربخشی فناوری قفس تنش در تقویت مخازن تخلیه شده ارائه کردند. آنها نشان دادند که خواص هندسی چاه، پارامترهای مکانیکی و فیزیکی سنگ، از جمله ناهمسانگردی تنش، شعاع چاه، طول و عرض شکاف، محل پل زدن، مدول یانگ و نسبت پواسون اثرات قابل توجهی بر نتایج استفاده از تکنولوژی قفس تنش دارند [۱۸، ۱۹].

صالحی^{۱۱} و همکاران در سال ۲۰۱۰ با در نظر گرفتن رفتار الاستیک خطی سنگ، از یک مدل شکست المان محدود سه‌بعدی برای مطالعه اثر نفوذپذیری سنگ بر رشد شکست‌های القایی ایجاد شده، استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی در این پژوهش نشان داد که در سنگ‌های با

شده است. به‌طور کلی روش‌های درمانی^۲ و پیشگیرانه^۳، دو رویکرد اصلی برای مقابله با مشکل هرزروی سیال حفاری هستند. رویکرد استفاده از روش‌های درمانی به‌گونه‌ای است که پس از تشخیص هرزروی سیال حفاری از آن استفاده می‌شود. در این روش با به‌کارگیری موادی از جمله مواد کنترل هرزروی^۴ به رفع مشکل پرداخته می‌شود. روش‌های درمانی در سطوح پایین شامل استفاده از مواد کنترل هرزروی و در سطوح بالاتر هرزروی شامل تزریق تحت فشار سیمان برای کنترل هرزروی سیال می‌باشد [۷].

روش‌های پیشگیرانه، همان‌گونه که از نام آن‌ها مشخص است، پیش از وقوع هرزروی سیال حفاری به کار گرفته می‌شود. بدین صورت که با شناسایی نقاط و لایه‌های مستعد هرزروی سیال قبل از آغاز عملیات حفاری، یکی از روش‌های پیشگیرانه برای جلوگیری از وقوع هرزروی اجرا می‌گردد. مقاوم‌سازی دیواره چاه به‌عنوان یکی از روش‌های پیشگیرانه هرزروی سیال حفاری مطرح شده است. رویکردهای مقاوم‌سازی دیواره چاه باتوجه به یکی از روش‌های مکانیکی، دمایی و شیمیایی به‌صورت تکی یا در تکمیل یکدیگر استفاده می‌شوند [۴، ۸-۱۱].

آستون^۵ و همکاران در سال ۲۰۰۴ مفهوم تکنولوژی قفس تنش را به‌عنوان یکی از روش‌های مکانیکی مقاوم‌سازی دیواره چاه برای اولین بار مطرح نمودند. در تکنولوژی قفس تنش، ایجاد شکاف‌های قابل کنترل القایی یا مصنوعی بر روی دیواره چاه و باز نگاه داشتن آن‌ها با استفاده از ذرات پل زننده نزدیک به دهانه‌ی شکاف، باعث تغییر در رژیم تنش‌های القایی در اطراف چاه می‌شود. بزرگی تغییرات ایجاد شده باعث افزایش تنش حلقه‌ای^۶ یا مماسی^۷ در دیواره چاه می‌شود که این امر در نهایت افزایش فشار شکست سنگ در دیواره چاه را در پی دارد. این تکنولوژی در حفاری سازندهای سست کاربرد دارد. این‌گونه سازندها عموماً در حفاری سازندهای آب‌های عمیق و مخازن تخلیه شده مشاهده می‌گردند. در واقع استفاده از

⁷ Tangential stress

⁸ Alberty

⁹ Gil

¹⁰ Wang

¹¹ Salehi

² Remedial

³ Preventive

⁴ Lost Circulation Material (LCM)

⁵ Aston

⁶ Hoop stress

نفوذپذیری بالا، شکاف‌های القائی با عرض وسیع‌تری گسترش پیدا می‌کنند [۲۰].

فنگ^{۱۲} و همکاران در سال ۲۰۱۴ از مدل‌های الاستیک و پورو-الاستیک دوبعدی برای ارزیابی وضعیت تنش در ناحیه نزدیک چاه قبل از شروع شکستگی، در طول انتشار شکستگی و پس از پل زدن شکستگی با مواد پل زنده استفاده کردند. در نتیجه پژوهش، نویسندگان شرح مفصلی از مکانیسم تقویت چاه و پارامترهای مؤثر ارائه کرده و اثربخشی این تکنولوژی را در هر سه حالت فوق بررسی نمودند [۲۱].

شهری^{۱۳} و همکاران در سال ۲۰۱۵ یک مدل نیمه تحلیلی برای پیش‌بینی توزیع عرض شکست و فشار شروع مجدد شکست با در نظر گرفتن توزیع تنش اطراف چاه، ناهمسانگردی تنش برجا و مسیر انحرافی چاه ارائه کردند. با استفاده از نتایج مدل پیشنهادی، نویسندگان اثر پارامترهای مختلف را بر روی اثربخشی مواد در مقابله با هرزروی سیال حفاری بررسی کردند [۲۲].

زانگ^{۱۴} و همکاران در سال ۲۰۱۷ یک مدل ریاضی برای تقویت چاه در چاه‌های جهت‌دار ارائه کردند. برخی از پارامترها مانند سرعت تزریق، ویسکوزیته سیال، شعاع حفره چاه، شیب چاه، عرض پلاگ شکستگی، و عملکرد بهینه تقویت چاه در این مطالعه بررسی شدند [۲۳].

در سال ۲۰۱۹، لیو^{۱۵} و همکاران یک مدل عددی کامل را ارائه کردند که شامل تغییر شکل الاستیک سنگ، جریان سیال و مکانیسم مسدودسازی بود. خروجی مدل، تنش‌های نزدیک دیوار چاه، بازشدگی شکاف و فشار داخل شکاف در شرایط قبل و بعد از پل زدن بود [۲۴].

میرعباسی^{۱۶} و همکاران در سال ۲۰۲۰ یک مدل تحلیلی ترمو-پورو-الاستیک برای مطالعه اثرات خواص مکانیکی، هندسه چاه و ویژگی‌های مکانیکی سنگ بر اثربخشی مقاوم‌سازی دیواره چاه ایجاد کردند. نویسندگان همچنین ضریب شدت تنش را به‌عنوان تمرکز تنش در نوک شکست برای ارزیابی عملیات مقاوم‌سازی دیواره چاه ارائه کردند [۱۴]. ضریب شدت تنش در پژوهش یوسفیان و همکاران (۲۰۱۸)

نیز بررسی و مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش، از یک کد عددی المان مرزی به منظور شبیه‌سازی فرآیند شکست دیواره چاه استفاده شده است. نتایج مطالعه نشان داد که روش عددی ارائه شده عملکرد قابل قبولی در شبیه‌سازی شکست دیواره دارد [۲۵].

همانگونه که مشخص است در تحقیقات گذشته، تاثیر عوامل مختلف بر میزان اثربخشی تکنولوژی قفس تنش مورد بررسی قرار گرفته است اما تاثیر ناهمسانگردی تنش‌های افقی کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. در محدود بررسی‌های انجام گرفته ([۱۸، ۱۹، ۲۱، ۲۴]) نیز نتیجه‌گیری کلی بدین صورت ارائه شده است که با افزایش شدت ناهمسانگردی در تنش‌های افقی برجا، میزان افزایش تنش مماسی در دیواره چاه بیشتر خواهد بود.

اما در این پژوهش با بررسی تاثیر ناهمسانگردی تنش‌های افقی، کمترین نسبت تنش‌های برجای افقی به منظور اثربخشی کامل روش قفس تنش ارائه شده است. بدین منظور ابتدا مدل سه‌بعدی الاستیک ارائه و سپس تنش مماسی در سه حالت پیش از ایجاد شکاف، پس از ایجاد شکاف و پس از پل زدن شکاف مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. روش انجام پژوهش

در این بخش روش انجام پژوهش شامل ساخت مدل سه‌بعدی، معادلات تحلیلی جهت صحت‌سنجی نتایج عددی به دست آمده و داده‌های مورد استفاده، ارائه خواهند شد.

۱.۲. مدل سه‌بعدی الاستیک

مدل ارائه شده سه‌بعدی و با استفاده از تجزیه و تحلیل المان محدود و کرنش صفحه‌ای در نرم‌افزار آباکوس ساخته شده است. همچنین تنها یک‌چهارم از چاه با فرض تقارن مدل‌سازی شده است. هندسه مدل مورد مطالعه، در شکل ۱ نشان داده شده است.

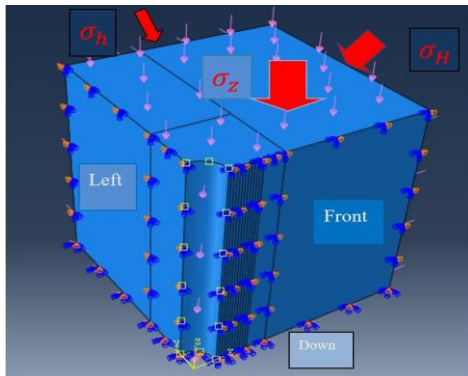
¹⁵ Liu

¹⁶ Mirabbasi

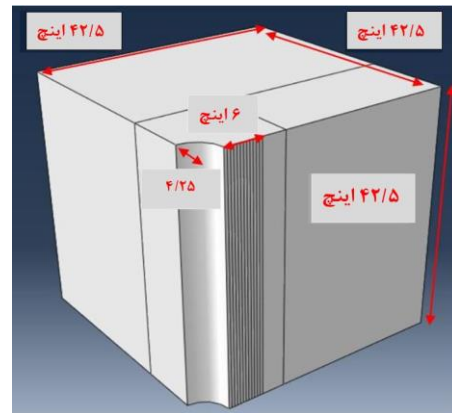
¹² Feng

¹³ Shahri

¹⁴ Zhang



شکل ۲. شرایط مرزی و اعمال تنش‌های میدانی مدل سه‌بعدی.



شکل ۱. هندسه مدل سه‌بعدی الاستیک.

$$P_b = 3\sigma_h - \sigma_H - P_p + T_0 \quad (1)$$

در معادله‌ی فوق P_b فشار شکست سنگ، σ_H و σ_h به ترتیب تنش افقی بیشینه و کمینه، P_p فشار منفذی می‌باشد. همچنین T_0 مقاومت کششی سنگ می‌باشد که با توجه به مقدار کم از آن صرف نظر می‌شود.

برای مدل سه‌بعدی الاستیک ارائه شده از مش‌بندی مکعبی استفاده شده است. به‌منظور راحتی و کاهش زمان محاسبات هندسه مدل به شعاع ۱۵ اینچ از مرکز چاه جداسازی شده است. در ادامه مش‌بندی با سایز ۰/۱ تا شعاع ۱۵ اینچ از مرکز چاه اعمال می‌شود. برای مش‌بندی سایر نقاط در هندسه چاه از مش‌بندی با تراکم ۱ اینچ استفاده شده است. در شکل ۳ تعداد و نوع مش مورد استفاده در مدل نشان داده شده است.

شکستگی ایجاد شده با استفاده از مواد پل زنده غیر قابل نفوذ در نزدیکی دهانه شکستگی مسدود می‌شود. این امر، باعث ایزوله سازی فشار داخل شکستگی می‌شود و از جریان احتمالی سیال حفاری از طرف چاه به شکاف جلوگیری می‌کند. همچنین رفتار سنگ برای ساده کردن محاسبات، الاستیک در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۱ پارامترهای مورد استفاده در مدل سازی شامل پارامترهای هندسی، خواص مکانیکی سنگ و بزرگی تنش‌های برجا را نشان می‌دهد. این داده‌ها برای ساخت مدل و مطالعه تکنولوژی قفس تنش استفاده می‌شود. هدف نهایی این تحقیق

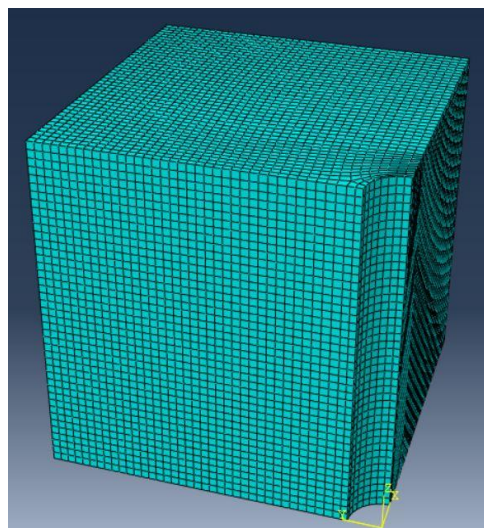
در گام بعدی تنش‌های برجای سازندی به هندسه مدل اعمال می‌شود و همچنین برای نشان دادن شرایط مرزی متقارن، محورهای x ، y و z به ترتیب در سمت چپ، روبرو و پایین مدل ثابت فرض می‌شود تا در اثر اعمال نیرو، شکل جابه‌جا نشود. در شکل ۲ نحوه اعمال شرایط مرزی و اعمال تنش‌های میدانی نشان داده شده است.

تنش روباره در صفحه عمودی است، در حالی که دو تنش اصلی دیگر در صفحه افقی هستند. چاه و سازند اطراف آن در شرایط کرنش صفحه قرار دارند. شرایط مرزی مقادیر متغیرها در گره‌های خاص هستند. از آنجایی که چرخش در مدل مجاز نیست، تنها بارهای جابجایی یا تنش را می‌توان در عناصر مرزی مشخص کرد. حداقل تنش افقی و حداکثر تنش افقی سازند بر روی مرز بیرونی یک چهارم چاه اعمال می‌شود و از سویی دیگر فشار چاه به دیواره داخلی چاه اعمال می‌شود. در انتها باز شدگی شکاف ایجاد شده در مدل در راستای محور x و عمود بر راستای انتشار شکاف (محور y) می‌باشد.

برای ایجاد شکاف، فشار چاه که در ابتدا کمتر از فشار شکست سنگ بود، به میزان ۳۰۰ پام بالاتر فشار شکست سنگ افزایش داده می‌شود. لازم به ذکر است که برای محاسبه فشار شکست سنگ، از مدل تحلیلی هایمسون و فیرهرست^{۱۷} استفاده شده است [۲۶]:

¹⁷ Haimson and Fairhurst

ایجاد رابطه بین اثربخشی قفس تنش و وضعیت تنش‌های برجا می‌باشد.



شکل ۳. تراکم و نوع مش استفاده شده در مدل سه‌بعدی الاستیک.

جدول ۱. مقادیر ورودی مدل سه‌بعدی الاستیک.

پارامتر	مقدار	واحد
طول مدل	۴۲/۵	اینچ
عرض مدل	۴۲/۵	اینچ
ارتفاع مدل	۴۲/۵	اینچ
شعاع چاه	۴/۲۵	اینچ
طول شکاف	۶	اینچ
مدول یانگ	۱۲۰۰۰۰۰	پام
ضریب پواسون	۰/۳	-
تنش افقی بیشینه	۴۷۰۰	پام
تنش افقی کمینه	۳۳۶۰/۵	پام
تنش عمودی	۵۷۰۰	پام
فشار چاه پیش از ایجاد شکاف	۵۳۸۱/۵	پام
فشار شکست سازند	۵۳۸۱/۵	پام

پس از اعمال تنش‌ها، تغییرات تنش مماسی در ناحیه نزدیک دیواره چاه در دو مرحله قبل از ایجاد شکاف و بعد از پل زدن

بررسی می‌شود. به منظور اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از مدل عددی، از معادلات تحلیلی ۲ و ۳ استفاده شده است. از معادله ۲ برای محاسبه تنش مماسی اطراف دیواره چاه بر اساس مدل تحلیلی کیرچ^{۱۸} استفاده می‌شود [۲۷]:

$$\sigma_{\theta} = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left(1 + \frac{R_w^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 + 3 \frac{R_w^4}{r^4} \right) \cos 2\theta - P_w \frac{R_w^2}{r^2} \quad (2)$$

در معادله‌ی فوق σ_{θ} تنش مماسی یا تنش حلقه در دیواره چاه، R_w شعاع چاه، r شعاع مورد بررسی، θ زاویه چرخش در جهت عقربه‌های ساعت روی دیواره چاه نسبت به تنش افقی بیشینه و P_w برابر با فشار هیدرواستاتیک ستون سیال داخل چاه می‌باشد.

با جای‌گذاری مقادیر $R_w = r$ در معادله ۲ مقدار تنش مماسی بر روی دیواره چاه محاسبه می‌شود:

$$\sigma_{\theta} = \sigma_H + \sigma_h - P_w - 2(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta - 4\tau_{xy} \sin 2\theta \quad (3)$$

در معادله ۳، τ_{xy} تنش برشی در دیواره چاه را نشان می‌دهد که در محاسبات برای ساده‌سازی از آن صرف‌نظر شده است.

۳. نتایج و بحث

شکل ۴ تغییرات تنش مماسی در دیواره چاه را در مراحل قبل از ایجاد شکاف نشان می‌دهد. نتایج مدل عددی و رابطه تحلیلی کیرچ در این شکل ارائه شده است.

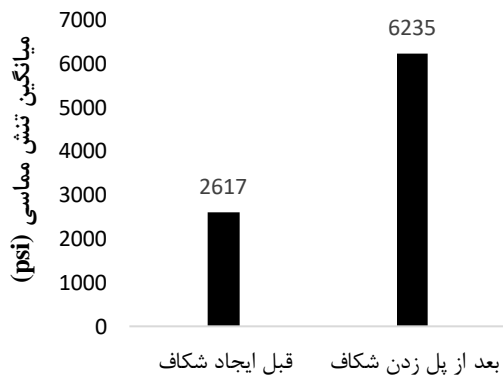
داده‌های شکل ۴ نشان می‌دهد که نتایج مدل‌های عددی و تحلیلی با هم مطابقت دارند. این موضوع قابل اطمینان بودن مدل عددی ساخته شده و نتایج به دست آمده از آن را نشان می‌دهد.

شکل ۵ تغییرات تنش مماسی را پس از پل زدن شکاف ایجاد شده نشان می‌دهد. موقعیت مواد پل زنده در ۰/۵، ۱، ۲ و ۳ اینچی از دهانه شکاف تغییر داده شده است. بدیت صورت تاثیر موقعیت پل زدن بر اثربخشی قفس تنش بررسی می‌گردد.

¹⁸ Kirsch

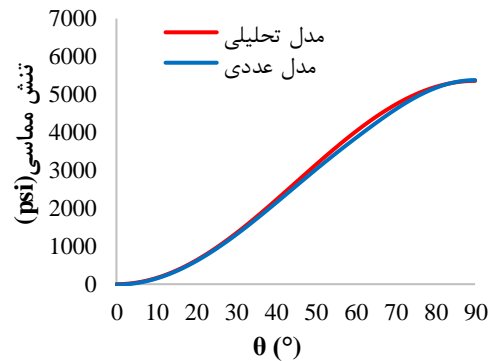
شکل ۶ میانگین تنش مماسی در دیواره چاه را قبل از ایجاد شکاف و بعد از پل زدن شکاف در موقعیت ۰/۵ اینچ از دهانه شکاف را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است پس از اجرای قفس تنش، مقدار تنش مماسی متوسط ۳۶۱۸ پام افزایش یافته است.

به منظور بررسی رژیم تنش‌های برجا بر میزان اثربخشی قفس تنش، نسبت‌های مختلف $(\frac{\sigma_h}{\sigma_H})$ انتخاب شده و تنش مماسی پس از ایجاد شکست برای هر مورد بررسی شد. شکل ۷ میانگین افزایش تنش مماسی در دیواره چاه در زوایای θ بین صفر تا نود درجه و در نسبت‌های مختلف $(\frac{\sigma_h}{\sigma_H})$ را نشان می‌دهد.

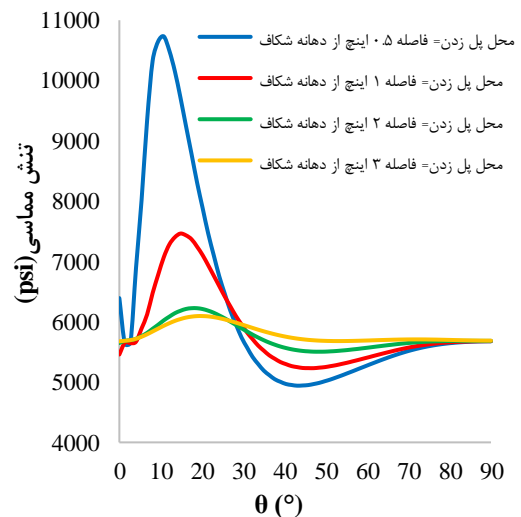


شکل ۶. میانگین تنش مماسی در دیواره چاه.

نتایج‌های شکل ۷ نشان می‌دهد که ایجاد شکاف در دیواره چاه همیشه منجر به افزایش تنش مماسی نمی‌شود. برای $\frac{\sigma_h}{\sigma_H} \leq 0/58$ ایجاد شکاف برعکس عمل می‌کند. به این ترتیب که در این وضعیت، تنش مماسی متوسط در مقایسه با شرایط اولیه پیش از ایجاد شکاف کاهش یافته است. برای بررسی دقیق‌تر این موضوع، سه نسبت ۰/۷، ۰/۷۱۵ و ۰/۷۳ از $(\frac{\sigma_h}{\sigma_H})$ انتخاب و تغییرات تنش مماسی قبل و بعد از ایجاد شکاف بررسی شد. شکل‌های ۸-۱۰ تغییرات تنش مماسی را در دیواره چاه در نسبت‌های ۰/۷، ۰/۷۱۵ و ۰/۷۳ از $(\frac{\sigma_h}{\sigma_H})$ نشان می‌دهند.



شکل ۴. تغییرات تنش مماسی در دیواره چاه در مراحل قبل از ایجاد شکاف.



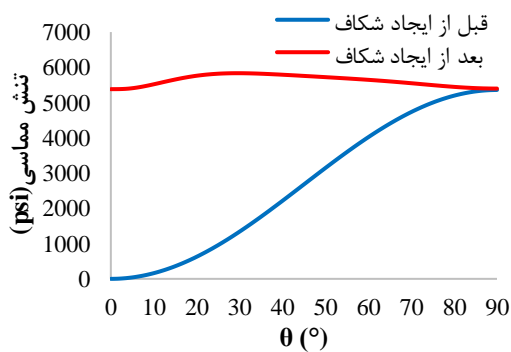
شکل ۵. تغییرات تنش مماسی در دیواره چاه پس از پل زدن شکاف

نتایج نشان می‌دهد که پس از پل زدن شکاف، تنش مماسی افزایش می‌یابد. این موضوع پایه و اساس فناوری قفس تنش می‌باشد، یعنی افزایش تنش مماسی منجر به افزایش مقاومت شکست سازند می‌شود. افزایش تنش مماسی در سازندهای ضعیف بسیار ضروری می‌باشد، جایی که شکستگی‌های القایی نقش اصلی را در هرزروی سیال حفاری دارد.

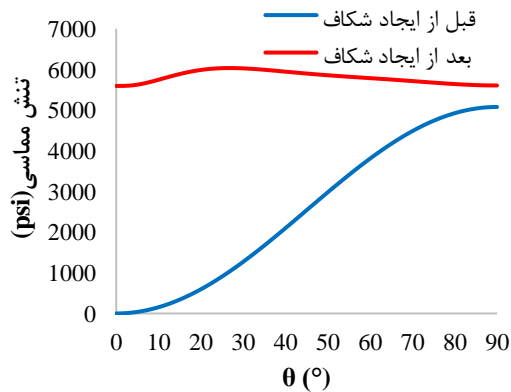
همچنین در شکل ۵ مشهود است که حداکثر تنش مماسی در موقعیت پل زدن ۰/۵ اینچی از دهانه شکاف مشاهده شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که هر چه محل پل به دهانه شکاف نزدیکتر باشد، تنش مماسی افزایش بیشتری خواهد داشت.

می توان گفت که بر اساس این مطالعه و برای مجموعه داده های ورودی استفاده شده، اثربخشی کامل قفس تنش در $\frac{\sigma_h}{\sigma_H} \geq 0.715$ مشاهده شده است.

لازم به ذکر است که نتایج اصلی این پژوهش، شامل افزایش تنش مماسی بعد از پل زدن، تاثیر موقعیت پل زدن نسبت به دهانه چاه و تاثیر ناهمسانگردی در تنش های افقی بر اثربخشی قفس تنش با نتایج مطالعات پیشین همخوانی دارد [۱۸، ۱۹، ۲۱، ۲۴].



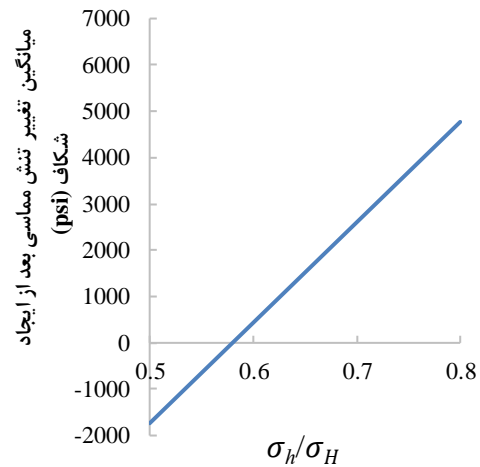
شکل ۸. تغییرات تنش مماسی در $\frac{\sigma_h}{\sigma_H} = 0.715$



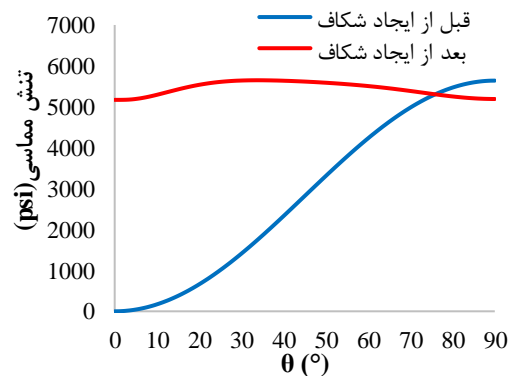
شکل ۹. تغییرات تنش مماسی در $\frac{\sigma_h}{\sigma_H} = 0.7$

۴. نتیجه گیری

یکی از روش های جلوگیری از هرزروی سیال حفاری، مقاوم سازی دیواره چاه می باشد. تکنولوژی قفس تنش یکی از روش های مقاوم سازی دیواره چاه است که در آن با افزایش تنش مماسی در دیواره چاه، فشار شکست سازند افزایش پیدا می کند. در این مطالعه با استفاده از ساخت یک مدل سه بعدی



شکل ۷. میانگین افزایش تنش مماسی دیواره چاه در نسبت های مختلف $(\frac{\sigma_h}{\sigma_H})$



شکل ۸. تغییرات تنش مماسی در $\frac{\sigma_h}{\sigma_H} = 0.7$

از شکل ۸ می توان دریافت که پس از ایجاد شکاف، تنش مماسی افزایش یافته است. با این حال، این مورد برای زوایای θ بالاتر از ۷۶ درجه صادق نیست. در این زوایا تنش مماسی پس از ایجاد شکاف نسبت به حالت پیش از ایجاد آن کاهش یافته است.

از داده های شکل های ۹ و ۱۰ می توان نتیجه گرفت که در نسبت ۰/۷۱۵ و ۰/۷۲۳ از $(\frac{\sigma_h}{\sigma_H})$ ، تنش مماسی پس از ایجاد شکاف برای همه زوایای θ افزایش یافته است. با این حال، باید توجه داشت که حداقل نسبت $(\frac{\sigma_h}{\sigma_H})$ برای اثربخشی قفس تنش کامل نسبت ۰/۷۱۵ است. بنابراین، می توان گفت که در نسبت $(\frac{\sigma_h}{\sigma_H})$ کمتر از ۰/۷۱۵، تنش مماسی پس از ایجاد شکاف برای تمام زوایای θ افزایش نمی یابد. در نتیجه گیری

- [5] Litvinenko, V. S., & Dvoynikov, M. V. (2020). Methodology for determining the parameters of drilling mode for directional straight sections of well using screw downhole motors. *Записки Горного института*, 241, 105-112.
- [6] Dvoynikov, M. V., Sidorkin, D. I., Kunshin, A. A., & Kovalev, D. A. (2021). Development of hydraulic turbodrills for deep well drilling. *Applied Sciences*, 11(16), 7517.
- [7] Cook, J., Growcock, F., Guo, Q., Hodder, M., & van Oort, E. (2011). Stabilizing the wellbore to prevent lost circulation. *Oilfield Review*, 23(4), 26-35.
- [8] Wang, H. M., Soliman, M. Y., & Towler, B. F. (2009). Investigation of factors for strengthening a wellbore by propping fractures. *SPE Drilling & Completion*, 24(03), 441-451.
- [9] Yao, Z., & Alberty, M. (2020, February). Thermal Effect on Fracture Width for Wellbore Strengthening Applications. In *IADC/SPE International Drilling Conference and Exhibition*. OnePetro.
- [10] Fan, G., Li, M., Chen, X., Palyanitsina, A., & Timoshin, A. (2021). Polymer-Nanosilica-assisted to evaluate oil recovery performances in sandstone reservoirs. *Energy Reports*, 7, 2588-2593.
- [11] Rogachev, M. K., Nguyen Van, T., & Aleksandrov, A. N. (2021). Technology for preventing the wax deposit formation in gas-lift wells at offshore oil and gas fields in Vietnam. *Energies*, 14(16), 5016.
- [12] Aston, M. S., Alberty, M. W., McLean, M. R., De Jong, H. J., & Armagost, K. (2004, March). Drilling fluids for wellbore strengthening. In *IADC/SPE drilling conference*. OnePetro.
- [13] Alberty, M. W., & McLean, M. R. (2004, September). A physical model for stress cages. In *SPE annual technical conference and exhibition*. OnePetro.
- [14] Mirabbasi, S. M., Ameri, M. J., Biglari, F. R., & Shirzadi, A. (2020). Thermo-poroelastic

الاستیک، وابستگی کارایی قفس تنش به نسبت تنش‌های افقی بررسی شد. بر همین اساس و باتوجه به مطالعات انجام شده، نتایج زیر قابل ذکر هستند:

- ۱- مقایسه وضعیت تنش‌های مماسی متوسط در دیواره چاه در حالت قبل از ایجاد شکاف و پس از پل زدن شکاف، کاربرد فناوری قفس تنش را در افزایش تنش مماسی تأیید می‌کند. بر این اساس مقدار تنش مماسی متوسط در فاصله ۰/۵ اینچی از دهانه چاه به میزان ۳۶۱۸ پام افزایش یافت.
- ۲- حداکثر افزایش تنش مماسی در موقعیت پل زدن ۰/۵ اینچی از دهانه شکاف مشاهده شد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که هر چه محل پل به دهانه شکاف نزدیکتر باشد، تنش مماسی افزایش بیشتری خواهد داشت.
- ۳- اثربخشی قفس استرس به وضعیت تنش‌های برجا بستگی دارد، یعنی نسبت $(\frac{\sigma_h}{\sigma_H})$. بر این اساس، ایجاد شکاف در دیواره چاه منجر به افزایش تنش مماسی برای همه نسبت‌های $(\frac{\sigma_h}{\sigma_H})$ نمی‌شود. بنابراین، حداقل نسبت $(\frac{\sigma_h}{\sigma_H})$ باید برای کاربرد عملی قفس تنش تعیین شود.
- ۳- در نتیجه تحقیقات انجام شده و بر مبنای داده‌های مورد استفاده، تکنولوژی قفس تنش در نسبت $\frac{\sigma_h}{\sigma_H}$ بیشتر از ۰/۷۱۵ به طور قطع دارای کارایی خواهد بود.

۵. مراجع

- [1] Kocababuc, B. (2011). *Finite element analysis of wellbore strengthening* (Doctoral dissertation, University of Texas–Austin).
- [2] Salehi, S., & Nygaard, R. (2011, June). Numerical study of fracture initiation, propagation, sealing to enhance wellbore fracture gradient. In *45th US rock mechanics/geomechanics symposium*. OnePetro.
- [3] Rabia, H. (2002). *Well engineering & construction* (pp. 288-289). London: Entrac Consulting Limited.
- [4] Feng, Y., & Gray, K. E. (2017). Review of fundamental studies on lost circulation and wellbore strengthening. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 152, 511-522.

- strengthening applications. *Spe Journal*, 20(06), 1276-1286.
- [23] Zhong, R., Miska, S., & Yu, M. (2017). Parametric study of controllable parameters in fracture-based wellbore strengthening. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 43, 13-21.
- [24] Liu, Y., Chen, P., Ma, T. S., Wu, B. S., Zhang, X., & Wu, B. L. (2019, August). A transient pressure analysis for wellbore strengthening. In *ARMA-CUPB Geothermal International Conference*. OnePetro.
- [25] Yousefian, H., Soltanian, H., Marji, M. F., Abdollahipour, A., & Pourmazaheri, Y. (2018). Numerical simulation of a wellbore stability in an Iranian oilfield utilizing core data. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 168, 577-592.
- [26] Zhang, J. J. (2019). *Applied petroleum geomechanics*. Gulf Professional Publishing.
- [27] Aadnoy, B. S., & Looyeh, R. (2019). *Petroleum rock mechanics: drilling operations and well design*. Gulf professional publishing.
- wellbore strengthening modeling: An analytical approach based on fracture mechanics. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 195, 107492.
- [15] Islamov, S., Grigoriev, A., Beloglazov, I., Savchenkov, S., & Gudmestad, O. T. (2021). Research risk factors in monitoring well drilling – A case study using machine learning methods. *Symmetry*, 13(7), 1293.
- [16] Liagov, I., Liagov, A., & Liagova, A. (2021). Optimization of the Configuration of the Power Sections of Special Small-Sized Positive Displacement Motors for Deep-Penetrating Perforation Using the Technical System “Perfobore”. *Applied Sciences*, 11(11), 4977.
- [17] Gil, I., & Roegiers, J. C. (2006, June). New wellbore strengthening method for low permeability formations. In *Golden Rocks 2006, The 41st US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. OnePetro.
- [18] Wang, H., Towler, B. F., & Soliman, M. Y. (2007, April). Near wellbore stress analysis and wellbore strengthening for drilling depleted formations. In *Rocky mountain oil & gas technology symposium*. OnePetro.
- [19] Wang, H., Towler, B. F., Soliman, M. Y., & Shan, Z. (2008, December). Wellbore strengthening without propping fractures: analysis for strengthening a wellbore by sealing fractures alone. In *International Petroleum Technology Conference*. OnePetro.
- [20] Salehi, S., & Nygaard, R. (2010, June). Finite-element analysis of deliberately increasing the wellbore fracture gradient. In *44th US Rock Mechanics Symposium and 5th US-Canada Rock Mechanics Symposium*. OnePetro.
- [21] Arlanoglu, C., Feng, Y., Podnos, E., Becker, E., & Gray, K. E. (2014, March). Finite element studies of wellbore strengthening. In *IADC/SPE drilling conference and exhibition*. OnePetro.
- [22] Shahri, M. P., Oar, T. T., Safari, R., Karimi, M., & Mutlu, U. (2015). Advanced semianalytical geomechanical model for wellbore-