

مدل سازی شکاف هیدرولیکی در اطراف چاه تولیدی مخزن نفتی (نفت و گاز) به منظور افزایش تولید در یکی از مخازن نفتی (نفت و گاز) ایران

مریم فضایی^۱

۱- کارشناس ارشد مهندسی شیمی - دانشگاه صنعتی امیر کبیر
Maryam1983@aut.ac.ir

خلاصه

با وجود گذشت بیش از ۴۰ سال از استفاده گسترده عملیات شکاف هیدرولیکی در دنیا، متأسفانه هنوز این روش در کشور ما، مورد توجه کافی قرار نگرفته است. شکاف هیدرولیکی یکی از موثرترین تکنولوژی‌ها برای بهبود بهره‌دهی مخزن می‌باشد. در عملیات شکاف هیدرولیکی، شکاف‌هایی از دیواره چاه به سوی سازند تولیدکننده نفت یا گاز ایجاد می‌شود. در حین حفاری هر چاه، به‌ویژه چاه‌های گازی، هر چه عمق بیشتر شود، همراه با عمل حفاری و تکمیل چاه، باید از فن آوری ایجاد شکاف هیدرولیکی نیز استفاده شود. این فن آوری می‌تواند تولید یک چاه را حداقل تا دو برابر افزایش دهد. انتخاب بهترین سیال به منظور ایجاد شکاف و پر کردن شکاف و روشی جهت ایجاد شکاف در مخازن نفتی و گازی، تاثیر بسیار مهمی در کارایی این عملیات دارد. اگر این عوامل به درستی و متناسب با شرایط مخزن صورت نپذیرد، این عملیات، تاثیر به‌سزایی در روند تولید از مخزن نخواهد داشت. جهت بررسی اثر خواص مکانیکی سنگ بر عملیات ایجاد شکاف و هندسه آن، باید خواص سنگ مخزن به‌طور کامل تعیین شود، تا در موقع ایجاد شکاف مساله بازدارنده‌ای ایجاد نشود. در این مقاله، ابتدا مقدمه‌ای کوتاه در ارتباط با انگیزش چاه و عملیات شکاف هیدرولیکی و ضرورت و اهمیت آن بیان شده است. در ادامه دیدگاه کلی عملیات، شرایط شکست و پارامترهای موثر در عملیات معرفی و مدل‌های مختلف توسعه شکاف هیدرولیکی در سازند مورد بررسی قرار گرفته است. سپس به بررسی و تحلیل نرم افزار FracPro در این مقاله پرداخته شده و توسط این نرم‌افزار سناریوی طراحی شکاف هیدرولیکی در مخزن مورد نظر ارائه شده است. در نهایت پارامترهای موثر در طراحی بررسی و از نظر تولید و بهره اقتصادی تحلیل می‌شود.

کلمات کلیدی: شکاف هیدرولیکی، مدل شبه سه بعدی، تنش درجا، تمرکز تنش، تنش بستگی

۱. مقدمه

از نقطه نظر مهندسی مخزن و بهره‌برداری از مخازن هیدروکربوری، افزایش بهره‌دهی^۱ در چاه‌ها به‌ویژه در چاه‌های با نفوذپذیری کم یا چاه‌های آسیب‌دیده یکی از مهم‌ترین اهداف می‌باشد. تا به امروز روش‌های متفاوتی برای افزایش میزان بهره‌دهی چاه‌ها ارائه و انجام شده است، که هر یک می‌تواند به-طریقی موجب بهبود عملکرد چاه‌ها شود. از مهم‌ترین روش‌های بهبود بهره‌دهی چاه‌ها، اثر گذاشتن بر فیزیک سنگ مخزن می‌باشد که در آن سعی می-شود تا ساختار فیزیکی سنگ مخزن بهبود یابد. اسیدکاری ماتریسی^۲ و شکست هیدرولیکی^۳ دو روش اساسی انگیزش چاه در رسیدن به این هدف می-باشد و هر دو روش زیر مجموعه افزایش تولید مخازن IOR^۴ می‌باشد. در ادامه ابتدا به شرح مختصری از هر روش ارایه می‌شود.

اسیدکاری ماتریسی: از اسیدهای آلی، معدنی و ترکیبی از این اسیدها، به‌تنهایی و یا با مواد فعال‌کننده سطحی، ضد خوردگی و... برای تحریک چاه استفاده می‌شود. در این عملیات، اسید با دبی و فشارهای طراحی شده به درون دهانه چاه تزریق می‌شود. اسیدکاری ماتریسی با از بین بردن آسیب سازند ضریب پوسته را تا حد زیادی کاهش و تولید از چاه را افزایش می‌دهد. این روش در مخازن کربناته کاربرد بیشتری دارد.

^۱ Productivity

^۲ Matrix Acidizing

^۳ Hydraulic Fracturing

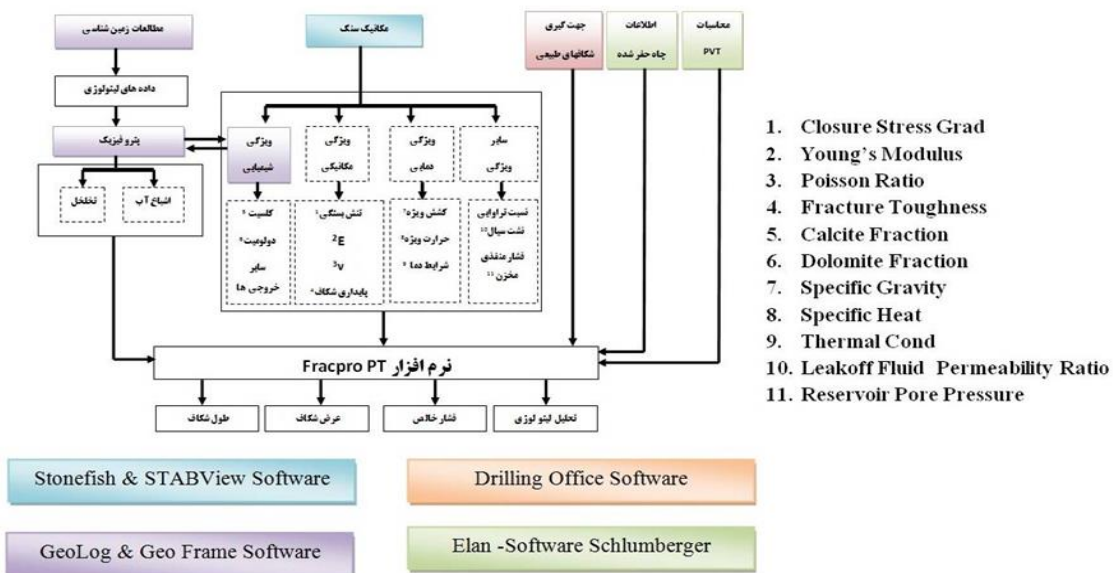
^۴ Improving Oil Recovery

شکست هیدرولیکی: تکنیکی است که با ایجاد شکاف در سنگ مخزن موجب تحریک تولید چاه‌های نفت و گاز می‌شود. شکاف هیدرولیکی به وسیله تزریق سیال با سرعت بیشتر از ظرفیت جریان مخزن ایجاد و با تزریق پروپانت نگهداری و حفظ می‌شود. این روش بیشتر در مخازن ماسه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. ایجاد شکاف باعث کاهش ضریب پوسته و نیز افزایش قابلیت هدایت جریان به سوی چاه می‌شود. که این خود عاملی جهت به حداقل رسیدن آشفته‌گی جریان در دهانه چاه و ممانعت از افت بهره‌دهی چاه می‌شود. شبیه‌سازی شکاف هیدرولیکی، انتخاب سیال و پروپانت مناسب برای ایجاد و حفظ شکاف هیدرولیکی، طراحی برنامه تزریق، محاسبه گذردهی شکاف و بررسی اقتصادی عملیات تحریک چاه از جمله مراحل این روش می‌باشد. به عبارت دیگر، شکست هیدرولیکی، فرآیندی است که در آن سیال با نرخ تزریق نسبتاً بالا درون چاهی با ساختار^۱ نفوذپذیری پایین پمپ می‌شود. قبل از پمپ کردن سیال، یک شکاف اولیه^۲ در دیواره چاه ایجاد می‌شود. به موازات پمپ شدن سیال، فشار در چاه افزایش می‌یابد. این عملیات تا جایی ادامه می‌یابد که فشار به حد لازم جهت آغاز شکست برسد، و شکاف در دیواره چاه رشد کند. این روش جهت افزایش نرخ تولید و اقتصادی تر کردن برداشت محصول در ساختارهای مذکور کاربرد فراوان دارد. [1]

۲. ضرورت و اهمیت پژوهش

با افزایش عمر مخازن و کاهش تولید از یک سو و نیاز به نگهداشت و افزایش مقدار تولید از سوی دیگر، استفاده از بهترین روش‌های بهبود بازافت تولید جهت بهبود سیاست‌های نفتی کشور یک مزیت رقابتی به‌شمار می‌رود. بنابراین، شکاف هیدرولیکی به‌عنوان یکی از موثرترین تکنولوژی‌ها جهت بهبود بهره‌دهی مخازن به‌شمار می‌رود. با تحریک چاه توسط این روش، افت فشار انتهایی چاه کاهش یافته و از طرفی اثر جریان غیر داریسی کم می‌گردد و در نتیجه میزان افت تولید کاهش می‌یابد.

با توجه به ضرورت افزایش بهره‌دهی مخازن نفت و گاز ایران به‌عنوان یک عامل استراتژیک، این پژوهش در صدد مدل‌سازی شکافی در یکی از مخازن جنوب ایران می‌باشد تا بتواند از طریق شکاف هیدرولیکی در مخازن پارس جنوبی به‌عنوان نمونه مطالعاتی، میزان تولید گاز چاه‌های کشور را افزایش دهد. مراحل فرایند شکاف هیدرولیکی توسط نرم‌افزار FracPro در شکل (۱) آورده شده‌است. با توجه به شکل، ایجاد یک عملیات شکاف، طول و عرض شکاف در حالت بهینه را براساس طراحی متناسب با شکستگی اصلی مدل ارائه می‌دهد و به‌عنوان یک مدل استاتیکی در چارچوب یک مدل دینامیکی میزان تولید را افزایش خواهد داد.



شکل ۱- فرآیند ایجاد شکاف هیدرولیکی با کمک نرم‌افزار FracPro.

^۱ Formations

^۲ Perforation

این مقاله با کمک نرم افزار Fracpro درصدد دست یابی به اهداف زیر می باشد:

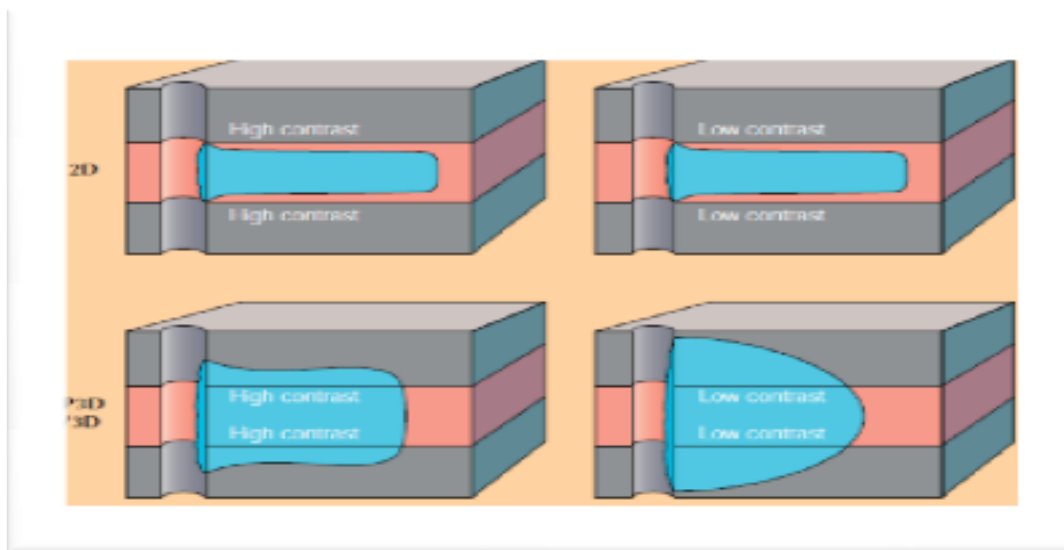
- انتخاب مناسب ترین مدل توسعه شکاف
- شبیه سازی جریان سیال و توسعه شکاف
- تحلیل حساسیت سنجی پارامترهای طراحی

۳. ادبیات موضوع

۱-۳ مدل سازی شکاف

هنوز کاملاً مشخص نیست که بر اثر عملیات شکاف هیدرولیکی یک شکاف یا چندین شکاف به وجود می آید. هر چند از داده های لرزه نگاری صوتی هر دو مورد مشاهده شده است. عموماً قابل پذیرش می باشد که شکاف به صورت یک صفحه گسترش می یابد و این گسترش در راستای عمود بر تنش مینیمم می باشد. برای مدل سازی شکاف هیدرولیکی، مدل های مختلفی ارائه شده است که شامل مدل های دو بعدی و سه بعدی می باشد. شکل هر شکاف بر اساس مدل پیش بینی شده متغییر و متفاوت خواهد بود [۲].

اختلاف عمده مدل های دو بعدی و سه بعدی در میزان گسترش قائم شکاف می باشد. رشد قائم شکاف در مدل های مختلف تحت تاثیر میزان تنش ها در لایه های محصور کننده می باشد. در شکل (۲) این تفاوت ها به تصویر کشیده شده است.



شکل ۲- مقایسه مدل های دو بعدی و سه بعدی در شرایط اختلاف تنش موجود در مرز لایه [۲].

مطابق شکل بالا، در مدل های دو بعدی در هر دو حالت اختلاف تنش مرزی کم و زیاد، ارتفاع شکاف از ضخامت لایه هدف تجاوز نمی کند، در حالی که در مدل سه بعدی در هر دو حالت، امکان گسترش شکاف در لایه های بالایی و پایینی وجود دارد [۲].

مدل ریاضی گسترش شکاف برای برقراری ارتباط بین دبی تزریق، زمان تزریق و نشت سیال با ابعاد شکاف (طول و عرض) ضروری می باشد. ابعاد شکاف و میزان هرزروی به صورت تابعی از زمان، اساس برنامه تزریق سیال شکافنده و پروپانت را تشکیل می دهند.

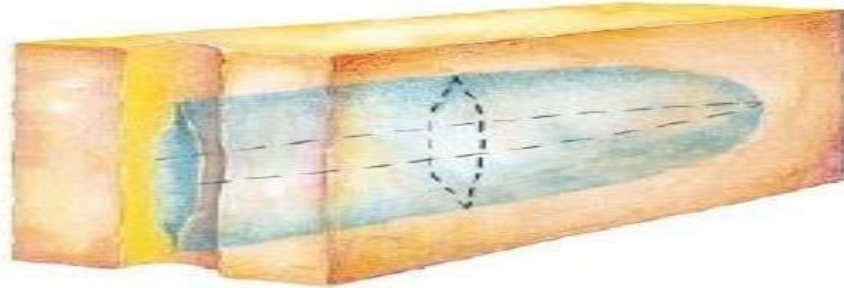
شکاف مورد مطالعه و بررسی در مقاله حاضر بر اساس مدل سه بعدی و شبه سه بعدی ایجاد شده است. بنابراین جهت درک بهتر مطلب، در ابتدا شرح مختصری در ارتباط با این دو مدل ارائه می گردد.

مبنای مدل‌سازی‌های سه بعدی کامل^۱ و شبه سه بعدی^۲ بر اساس تقسیم‌بندی شکاف به تعدادی المان مجزا می‌باشد و در نهایت بایستی معادلات حاکم بر این المان‌ها حل شود. این معادلات عبارتند از:

- ۱- معادلات الاستیسیته، که فشار در شکاف را به باز شدن شکاف^۳ مرتبط می‌کنند.
- ۲- معادلات جریان سیال، که جریان سیال در شکاف را به گرادین فشار سیال مرتبط می‌کند [۳].

۲-۳ مدل شبه سه بعدی

در مدل‌های شبه سه بعدی فرض می‌شود، ارتفاع شکاف نسبت به باز شدگی شکاف به اندازه کافی بزرگ است بنابراین، سفتی الاستیک مؤثر (رابطه بین فشار و باز شدگی شکاف) در هر سطح مقطع عمودی مستقل از فاصله افقی مقطع تا نوک شکاف خواهد بود. در چنین شرایطی، عرض شکاف در هر نقطه کمک رابطه کرنش صفحه‌ای الاستیک^۴ می‌توان محاسبه کرد. تغییر شکل در روش مذکور در صفحه yz (ارتفاع و عرض) اتفاق می‌افتد و محاسبه ارتفاع شکاف و فشار در ارتفاع شکاف در مختصات x انجام می‌گیرد [۳]. در شکل (۳) به صورت شماتیک مدل شبه سه بعدی نشان داده شده است.



شکل ۳- مدل شبه سه بعدی [۲].

در روش مذکور، از گرادین فشار در جهت y صرف نظر گردیده و $\sigma(y)$ تنش در جای حداقل نیز در سراسر سازند ثابت فرض شده و یا تابعی خطی از عمق می‌باشد. گسترش عمودی شکاف با تمرکز تنش کنترل می‌شود. تنش برجای بیشتر در لایه‌های همجوار مانع گسترش شکاف به لایه‌های مجاور (همسایه) می‌شود.

۳-۳ مدل سه بعدی

یک مدل ساده و کامل توسط دولوو^۵ و همکاران با توجه به اثرات جریان سیال در داخل شکاف، نشت سیال از طریق دیواره شکاف و پاسخ الاستیک از محیط متخلخل بسط و ارائه شده است [۴].

شکاف، ناحیه‌ای در فضای سه بعدی در نظر گرفته شده که با زمان "t" قابل تغییر می‌باشد [۴]. تنظیمات مسطح، شامل تغییرات طول شکاف در جهت x، ارتفاع شکاف بر محور عمودی z و باز شدگی شکاف در جهت y می‌باشد، و در شکل (۴) نشان داده شده است. به طور معمول، شکاف هیدرولیکی ایجاد شده، بزرگ اما باریک است. علاوه بر این، فرض می‌شود که جریان سیال در شکاف از الگوی جریان بین صفحات موازی و فشار

^۱ Fully 3D

^۲ Pseudo 3D

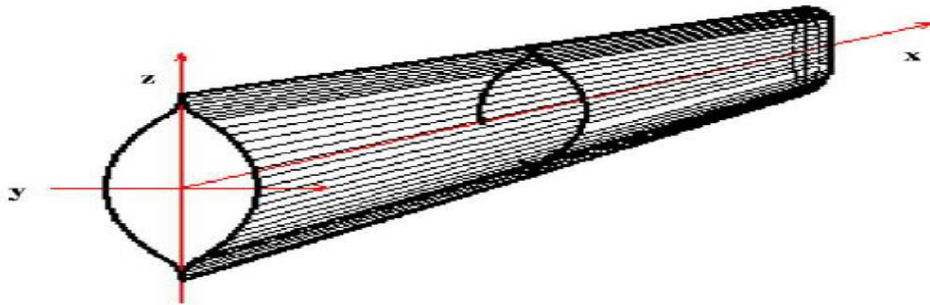
^۳ Crack Opening

^۴ Plain Strain Elasticity

^۵ Devloo

یکنواخت در امتداد محور y پیروی می کند. بنابراین، متغیرهای اصلی در داخل شکاف، فشار " P "، بازشدگی شکستگی " w " تنها به (x, z, t) بستگی دارد. در اینجا شکاف یک ناحیه تعریف شده توسط نقاط (x, y, z) است، به طوری که:

$$|y| \leq \frac{w(x, z, t)}{2} \quad (1)$$



شکل ۴- مدل سه بعدی [۴].

- از مقایسه میان هندسه شکاف در مدل‌های مختلف دو بعدی و سه بعدی و همچنین برنامه تزریق در این مدل‌ها نتایج زیر حاصل می‌شود:
- ۱- در درجه‌های مختلف از ارتفاع ثابت، مدل‌های دو بعدی KGD و PKN می‌توانند مشخصات قابل قبولی از شکاف ارائه دهند.
 - ۲- مدل KGD عموماً در شرایط تنش‌های محدود کننده پایین و مدل PKN در شرایط تنش‌های محدود کننده بالا کاربرد دارند. برای نسبت-های طول به ارتفاع بزرگ، مدل KGD بازشدگی‌های عریض تری در دهانه چاه و طول‌های کوتاه‌تری نسبت به مدل‌های PKN و سه بعدی نشان می‌دهد.
 - ۳- مدل‌های سه بعدی تعادلی، برای شکاف‌های محدود شده چاه که برای آنها موازنه استاتیکی برقرار است پرکاربرد می‌باشد.
 - ۴- هر سه مدل، برنامه جامع پروپانت و مشخصات انتقال مشابه را نشان می‌دهند. البته مدل‌های PKN و سه بعدی به دلیل بازدهی پایین تر و عرض شکاف کمتر نزدیک نوک شکاف، عموماً به میزان پد بیشتری نیاز دارند.
 - ۵- مسیریابی اولیه دوغاب و پروپانت جهت طراحی انتقال واقع بینانه ضروری می‌باشد. هرزروی سیال نزدیک نوک شکاف دارای رفتاری توانی می‌باشد.
 - ۶- بازدهی شکاف اثر شدیدی بر طراحی برنامه تزریق و گسترش شکاف دارد. ضریب نشتی کل، یکی از بحرانی‌ترین پارامترهای طراحی شکاف می‌باشد.
 - ۷- بیشترین توان پارامتری در روابط طول و عرض کمتر یا بسیار کمتر از یک است لذا اثر آنها را در طراحی شکاف به حداقل می‌رساند. در بهینه‌سازی طراحی شکاف، بیشترین تمرکز باید بر پارامترهایی که بزرگترین توان را دارند انجام شود [۵].

۴. روش‌شناسی پژوهش

به منظور تحلیل شکاف هیدرولیکی از نرم‌افزارهایی مانند FracPro، Frac Cade و GOHFER می‌توان بهره برد. نرم‌افزارهای نامبرده با حل معادلات مربوط به شکاف هیدرولیکی، و با در نظر گرفتن عوامل کلیدی همانند جهت‌گیری شکاف‌های طبیعی و نظایر آن شکاف را در ناحیه مخزنی پیش‌بینی می‌کند. در این مقاله با کمک نرم افزار FracPro برای تحلیل شکاف هیدرولیکی مخزن مورد نظر استفاده شده است.

نرم افزار مذکور با کمک اندازه گیری سرعت جریان، غلظت پروپانت^۱، و پارامترهای رئولوژیکی سیال برای محاسبه افت فشار پایین چاه جهت- دار با قطر متغیر، و رشد رفتار شکاف هیدرولیکی مورد استفاده قرار می گیرد. در داخل شکاف هیدرولیکی، جابه جایی پروپانت، از جمله همرفتی^۲، و تشکیل بانک‌هایی از پروپانت محاسبه می شوند. به عنوان خروجی در میان سایر متغیرها، ابعاد شکاف هیدرولیکی و فشار شکاف هیدرولیکی اضافی خالص (فشار سیال بیشتر از فشار بسته شدن) محاسبه می شود.

۵. تجزیه تحلیل و طراحی عملیات شکاف هیدرولیکی و پیش بینی تولید

همان گونه که در قبل بیان شد، روند طراحی یک عملیات ایجاد شکاف هیدرولیکی به این ترتیب خواهد بود که، ابتدا داده‌های مورد نیاز چاه، داده‌های تکمیل چاه، داده‌های مخزن و همچنین پارامترهای اولیه طراحی جمع آوری می شود. از پارامترهای مهم در این عملیات فاکتور تمرکز تنش می باشد. با توجه به آنکه انتخاب مدل توسعه شکاف در طراحی عملیات بسیار حائز اهمیت است بررسی نزدیک ترین مدل به شرایط محیط در برگیرنده شکاف (لایه تولیدی و لایه‌های مجاور بالایی و پایینی) از گام‌های نخست در طراحی می باشد. در ادامه بایستی مواد مورد نیاز عملیات، شامل سیالات و پروپانت انتخاب شوند. مهمترین بخش طراحی، برنامه تزریق می باشد. در این برنامه میزان سیال و پروپانت، دبی تزریق و تعداد مراحل تزریق بر اساس بالاترین بازدهی و بهره‌دهی محاسبه می شود.

به طور کلی روش طراحی از دو فلسفه متفاوت بهره می گیرد. اول آنکه محاسبات رفتار واقعی و کمی شکاف را نشان می دهد، تا محاسبات به- صورت فنی انجام و عملیات بهتر انتخاب شود. شواهد اخیر نشان می دهد که مدل‌های موجود شکاف، به صورت کمی، رفتار واقعی شکاف را نشان می- دهد.

فرآیند طراحی شامل مراحل زیر می باشد:

- جمع آوری کلیه اطلاعات مورد نیاز چاه، به انضمام مخزن، تکمیل و پارامتر تقریبی عملیات
- انتخاب چند سیال مناسب با مقدار ویسکوزیته که برای یک عملیات خاص، مناسب تشخیص داده شود.
- تخمین تولید که از عملیات کوچک و بزرگ با پروپانت مقاومت بالا حاصل می شود.
- انجام مدل سازی دقیق عملیاتی به منظور برآورد اثر اندازه و نوع عملیات در تولید حاصله
- انتخاب اندازه نوع عملیاتی که بهترین نرخ بازگشت سرمایه را دارد و انجام محاسبات مربوطه جهت رسیدن اندازه مورد نیاز با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی
- بهینه سازی طراحی عملیات و قرارداد شکاف طراحی شده در چاه با حداقل ریسک و هزینه [۶].

۱-۵ مشخصات چاه

چاه در نظر گرفته شده برای طراحی عملیات شکاف هیدرولیکی، یک چاه عمودی به عمق واقعی "TVD" ۷۲۹۵،۲۸ فوت می باشد. تکمیل این چاه دارای قطر حفره ۴،۸۹ اینچ می باشد. این چاه در خشکی حفر شده و دمای ته چاهی آن برابر ۲۰۰ درجه فارنهایت می باشد. مشبک کاری این چاه در عمق ۷۱۳۴،۵ فوتی انجام شده و تعداد مشبک‌ها مجموعاً ۹۹ عدد می باشد.

۲-۵ مشخصات مخزن

^۱ Proppant
^۲ Convection
^۳ True Vertical Depth

مخزن مورد نظر یک مخزن گازی می باشد، و این سازند به طور عمده از سنگ های رسوبی ریزدانه و شیل تشکیل شده است و دارای ۴۴ زون یا لایه مختلف است. در این سازند لایه های ۱۶، ۱۸، ۲۰، ۲۲، ۲۴، ۲۶، ۲۸ و ۳۰ دارای ذخیره می باشند.

در این مقاله، مبنای طراحی شکاف هیدرولیکی، لایه های ذکر شده در بالا می باشند و با توجه به وضعیت تنش های لایه های دیگر، در صورت گسترش قائم شکاف به لایه های مجاور در طراحی دخالت داده می شوند.

اختلاف مقادیر تنش بین لایه های مجاور، فاکتور کنترل کننده گسترش قائم شکاف می باشد. بر اساس مقادیر تنش های محاسبه شده، اختلاف ناچیز میان این پارامتر در لایه تولیدی و لایه مجاور بالایی سبب خواهد شد تا شکاف به مقدار زیادی در لایه بالایی نفوذ کند.

۳-۵ انتخاب مدل توسعه شکاف

فلسفه مدل های توسعه شکاف هیدرولیکی، پیش بینی هندسه شکافی است، که در اعماق زمین ایجاد شده و اطلاعات بسیار کمی از آن در دسترس است. برای شبیه سازی صحیح شکاف هیدرولیکی انتخاب مدل مناسب جهت شناخت و تحلیل هندسه شکاف بسیار حائز اهمیت است. به گونه ای که انتخاب اشتباه مدل هندسه شکاف، طراحی عملیات را کاملاً به انحراف می کشد.

به طور کلی تفاوت اصلی مدل های دو بعدی و سه بعدی در بعد سوم شکاف یعنی ارتفاع است، ارتفاع شکاف نیز تحت تاثیر شرایط تنش های درجای مینیمم و فاکتور تمرکز تنش برای هر لایه می باشد. پس نیازمند داشتن اطلاع دقیق از وضعیت تنش های درجای مینیمم و لایه های تولیدی و لایه های بالایی و پایینی مجاور و فاکتور تمرکز تنش می باشد. در اینجا جهت محاسبه میزان تنش های مینیمم درجای لایه های مختلف از میزان گرادیان شکست استفاده شده است، به این دلیل که میزان تنش درجای مینیمم، به میزان جرم روباره، تنش های تکنیکی در عمق مورد نظر و فشار منفذی لایه در آن عمق وابسته است.

در این مقاله از مدل سه بعدی 3D Tip-Dominated استفاده شده است. این مدل را نمی توان جز مدل های شبه سه بعدی در نظر گرفت. این مدل جهت استفاده در چاه های گازی گسترش و توسعه داده شده است. با توجه به فشار خالص زیاد، توسط این مدل می توان شکاف های هیدرولیکی عریض و کوتاه را پیش بینی کرد، که انطباق خوبی با آنچه در سایت مشاهده می شود، دارد.

۴-۵ انتخاب مواد

تصمیم نهایی قبل از طراحی عملیات، انتخاب سیال شکافنده، مواد افزودنی و انتخاب پروپانت می باشد. در مورد انتخاب سیال ضروری است، پنج جنبه فنی شامل ویسکوزیته، افت اصطکاکی سیال^۱، هرزروی سیال، تمیز کاری^۲ و سازگاری با سنگ و سیال مخزن مورد توجه قرار گیرد. مقدار ویسکوزیته، توزیع عرض و طول شکاف و همچنین توزیع نهایی پروپانت را تحت تاثیر قرار می دهد. اکثر عملیات هایی که تاکنون طراحی شده اند از سیال با ویسکوزیته متوسط تا بالا استفاده می کند، تا ایجاد شکاف با عرض کافی و قابلیت انتقال پروپانت با غلظت زیاد را فراهم نمایند.

تجربه نشان داده است که قابلیت پمپاژ سیال در لوله ها از ویسکوزیته مجزا است و باید در طراحی مورد توجه قرار گیرد. سیال تزریقی باید دارای ویسکوزیته بالا برای ایجاد شکاف، قابل تولید مجدد، و دانسیته آن به اندازه ای کم باشد. جنبه های مهم انتخاب پروپانت شامل، تراوایی پروپانت در تنش مربوطه در مقایسه با تراوایی مخزن، قابلیت انتقال پروپانت در مجاری مشبک کاری و طول شکاف می- باشد [۶].

۵-۵ انتخاب سیال

¹ Fluid Friction Loss

² Clean Up

انتخاب سیال، پیچیده ترین بخش در طراحی شکاف هیدرولیکی محسوب می شود. فاکتوری بسیار حساس است که با تغییرات جزئی در مشخصات آن، طراحی شکاف به طور کامل دستخوش تغییر می شود. خواص موثر در انتخاب سیال شکافنده شامل دو پارامتر رئولوژی (سیال توانی) و پارامترهای هرزروی سیال می باشد. برای انتخاب سیال معمولاً ویسکوزیته (برای عرض شکاف، انتقال پروپانت و کنترل هرزروی سیال) و تمیزگری به منظور حداکثر مقدار گذردهی شکاف می باشد. موارد دیگر جهت انتخاب سیال که ممکن است در بعضی شرایط خاص حائز اهمیت باشند عبارتند از:

- سازگاری با سیال و سنگ مخزن
- سازگاری با فشار مخزن (مانند کف که در فشار پایین مخزن به پس فشار کمک می کند).
- در نظر گرفتن فشار سطحی پمپ و اصطکاک لوله
- هزینه
- سازگاری با دیگر مواد (مانند پروپانت رزین دار)
- ایمنی و حفظ محیط زیست

اساس روش انتخاب سیال دما و فشار مخزن می باشد. همچنین میزان حساسیت به آب سازند از فاکتورهایی است که در این انتخاب ایفای نقش می کند. میزان حساسیت به آب برای هر سنگ بر اساس درصد کانی های رسی موجود در آن تعیین می شود.

سیالات Uncross Linked معمولاً آب پایه و یا هیدروکربن پایه می باشند، و از انحلال پلیمرها، با وزن مولکولی بالا در آب یا هیدروکربن ساخته می شوند. این محلول ها، غیر نیوتنی بوده و کاهش دهنده اثر کششی^۱ هستند و نسبت به دما و دبی برشی حساس می باشند. معمولاً پلیمرهای محلول در آب با وزن مولکولی بالا در محلول های شکافنده ای که شامل گاور^۲ و مشتقات آن مانند CMHPG و HPG و مشتقات سلولزی مانند CMHEC و HEC هستند. اگرچه، محلول های هیدروکربنی به صورت نفت ویسکوز و نفت خام لیز^۳ به طور گسترده برای تحریک سازندهای حساس به آب استفاده نمی شود. این محلول های هیدروکربونی می توانند شامل افزودنی های کاهنده اصطکاک و افت صافی باشند [۶].

ژل های شکافنده معمولاً نمونه ای از نوع سیالات Cross Linked می باشد که ویسکوزیته و قابلیت انتقال پروپانت را ارتقاء می دهد.

۵-۶ انتخاب پروپانت

در انتخاب پروپانت باید قابلیت هدایت در شرایط تنش درجا را در نظر گرفت. (اثر تنش بر روی نفوذپذیری پروپانت) همچنین سایز بزرگتر پروپانت به گذردهی بیشتر منجر می شود. البته در انتخاب سایز پروپانت باید به میزان عرض شکاف و قطر مشبک کاری توجه داشت. در نهایت باید میزان تمرکز پروپانت را تعیین نمود. تمرکز پروپانت مشخص می سازد که تا چه میزان می توان شکاف هیدرولیکی ایجاد شده را باز نگه داشت [۶]. اندازه ذرات پروپانت اثر زیادی در تراوانی شکاف دارد، گذردهی شکاف در صورت استفاده از ذرات بزرگتر در تنش های پایین بیشتر از ذرات کوچکتر است. وقتی تنش افزایش می یابد، این تفاوت در گذردهی کاهش می یابد. چون توزیع دانه بندی، تخلخل و سطح تماس تقریباً یکسان می شود.

نکته مهم اینکه اندازه پروپانت باید به گونه ای انتخاب شود تا بتواند داخل شکاف با عرض حداقل وارد شود. معمولاً برای ریزش پروپانت، عرض حداقل شکاف باید دو یا سه برابر بزرگترین دانه پروپانت باشد [۶].

در انتخاب قطر پروپانت باید دقت کرد که پروپانت تزریقی به شکاف موجب ایجاد انسداد^۴ در شکاف نشود و بتواند به میزان کافی در شکاف نفوذ کند. انتخاب نامناسب قطر پروپانت می تواند منجر به انسداد پلی^۵ یا انسداد هیدراته ای^۶ در شکاف شود. انسداد نوع اول موجب نفوذ کم پروپانت در شکاف می شود و لذا به طول مورد نظر دست نخواهیم یافت و انسداد هیدراته ای از گسترش شکاف به طور کامل جلوگیری می کند و همچنین به شدت موجب افزایش هرزروی سیال می شود.

¹ Drag

² Guar

³ Lease Crude Oil

⁴ Screen – Out

⁵ Bridging Screen – Out

⁶ Hydration Screen – Out

تمرکز پروپانت به مقدار پروپانتی اطلاق می شود، که در واحد سطح یک دیواره شکاف اندازه گیری شود. گذردهی شکاف با افزایش تمرکز پروپانت در شکاف افزایش می یابد [۶].

پروپانت بر اساس شکل ظاهر و میزان تنش اعمالی بر آن نفوذپذیری های مختلفی از خود نشان می دهد. هر چه میزان تنش اعمالی به پروپانت بیشتر باشد میزان نفوذپذیری تجمع پروپانت کمتر خواهد بود، و گذردهی شکاف نگهداری شده با آن کمتر می شود، که این امر بر میزان تولید حاصل از شکاف هیدرولیکی ایجاد شده اثر می گذارد. شکل (۷) این اثر را نشان می دهد.

شکل ۷- تاثیر تنش اعمالی بر نفوذپذیری پروپانت

مهمترین فاکتور جهت انتخاب پروپانت میزان نفوذپذیری آن خواهد بود. هر چه فاکتورها جهت انتخاب بیشتر باشد دامنه انتخابی محدودتر خواهد شد، و در نهایت انتخاب از میان تنوع کمتری صورت می پذیرد، و این امر طراحی بهینه را آسان تر می کند.

۵-۲ برنامه تزریق^۱

سیالات در یک الگو برنامه ریزی می شوند. ویسکوزیته های مناسب، برای عرض مطلوب شکاف و معلق کردن پروپانت ها لازم می باشد. ویسکوزیته های بالاتر سیال برای حفظ فشارهای پمپاژ استفاده می شود. افت سیال می تواند تحت تاثیر غلظت پلیمر سیال قرار گرفته و همچنین زمان ظهور سیال در دما به وسیله برنامه ریزی سیال تحت کنترل قرار می گیرد.

برای داشتن یک برنامه ریزی سیال مفید، مدل باید امکان تشریح دمای سیال را فراهم کند. ساده ترین تقریب فرض می کند که در کل عملیات، سیال در دمای مخزن قرار دارد. هر چند در حالتی که دبی پمپ بالاست و حجم سیال به طور بخصوصی زیاد است رفتار واقع بینانه تر فرض می کند، در اغلب نقاط شکاف، دمای سیال از دمای محیط پیرامون در دهانه چاه تا نزدیکی دمای مخزن افزایش می یابد [۶].

پروسه طراحی شکاف، شامل مهندسی مخزن جهت تعریف پارامترهای طول شکاف "L" و حاصل ضرب نفوذپذیری شکاف در طول شکاف "k.L" و مکانیک سنگ به منظور بررسی امکان دست یابی به هندسه شکاف مطلوب، مکانیک سیالات جهت تایید امکان انتقال پروپانت مورد نیاز و ارائه تئوری رئولوژی برای تعیین خواص سیالات مورد نیاز می باشد. حاصل این پروسه برنامه پمپاژ می باشد.

این برنامه شامل تعیین حجم سیال پد مورد نیاز برای ایجاد نفوذ شکاف مطلوب به همراه اسید و یا پروپانت برای دست یابی به گذردهی شکاف نهایی مناسب می باشد.

برای یک شکاف نگهداری شده، برنامه پمپاژ، شامل انتخاب سیال، انتخاب پروپانت، حجم پد، ماکزیمم تمرکز پروپانت مورد استفاده، برنامه پروپانت اضافه است.

¹ Injection Schedule

بعد از تعریف اهداف طراحی و متغیرها، برنامه تزریق اضافی پروپانت توسط یک شبیه‌ساز شکاف انجام می‌شود. البته می‌توان توسط روش تحلیلی بر اساس میزان بازدهی سیال آنرا به‌سادگی طراحی نمود.

طراحی برنامه تزریق مورد نیاز برای رسیدن به یک طول شکاف و تمرکز پروپانت مطلوب، نیازمند صرف زمان زیادی است. یک راه برای ساده کردن این امر، استفاده از یک تولید کننده برنامه پمپ توسط شبیه‌ساز عددی است. [۶]

۸-۵ شبیه‌سازی برنامه تزریق

مبنای شبیه‌سازی برنامه تزریق، ابعاد شکاف هیدرولیکی، میزان پروپانت و دبی تزریقی به چاه می‌باشد. برای شبیه‌سازی برنامه تزریق، پیش‌فرض طول شکاف و ماکزیمم تمرکز پروپانت الزامی است. به‌صورت عملیاتی، برنامه تزریق عبارت است از یک زمان‌بندی جهت تزریق مقادیر معین از سیال و پروپانت.

برنامه با تزریق سیال پد شروع می‌شود، و با تزریق دوغاب مورد نیاز، در چند مرحله ادامه می‌یابد و در نهایت به تزریق سیال تمیزگر ختم می‌شود. در هر مرحله، میزان سیال و درصد پروپانت، بر اساس میزان پروپانت تزریقی نهایی و میزان هرزروی محاسبه می‌شود.

با توجه به اینکه قبل از شبیه‌سازی برنامه تزریق، طول شکاف مجهول است، یک پیش‌فرض برای طول طراحی شکاف انتخاب می‌شود. همچنین برای شبیه‌سازی نیازمند همه داده‌های سیال و سازند لازم برای شبیه‌سازی هستیم.

در ادامه حجم سیال گردشی، حجم پد، حجم دوغاب و حجم سیال تمیزگر با کمک روابط مرتبط محاسبه می‌شود.

۹-۵ بررسی تولید

جهت انتخاب اندازه عملیات و نوع مواد مورد استفاده در طراحی، اثر شکاف با خواص و هندسه مشخص در بهره‌دهی چاه، باید تخمین زده شود. روش‌های مختلفی ارائه شده است.

عوامل قابل کنترل در برداشت و نرخ تولید بعد از عملیات شکاف عبارتند از: طول شکاف، نسبت تراوایی شکاف به عرض و ارتفاع شکاف. در خصوص چگونگی تاثیر پارامترهای فوق در تولید، بهترین عملیات، عملیاتی با بیشترین مقاومت تراوایی و طول‌ترین شکاف پروپانت شده می‌باشد [۶].

۱۰-۵ قابلیت گذردهی شکاف

در سازندهای با تراوایی پایین، طول شکاف تولید کننده حائز اهمیت می‌باشد. در سازندهای با تراوایی بالا نیز قابلیت گذردهی شکاف مهم است. هدف از شکاف هیدرولیکی، افزایش بهره‌دهی چاه با تغییر رژیم جریان اطراف چاه از حالت شعاعی به جریان خطی^۲ یا دو بعدی^۳ از طریق شکاف است. در این صورت شکاف باید تراوایی بالائی داشته باشد.

برای به‌دست آوردن شکاف با تراوایی بالا (پروپانت) دانه‌ای باید به سیال شکافنده اضافه شود. هدف از انتقال پروپانت، باز نگه‌داشتن شکاف می‌باشد. در این صورت، پس از اتمام عملیات یک راه هادی از چاه به سمت داخل سازند باقی می‌ماند. در غیر این صورت، پس از پایان عملیات، تنش‌های درجا باعث بسته شدن شکاف و تقریباً حفظ شرایط اولیه سازند قبل از انجام عملیات، می‌شود. گذردهی شکاف به‌صورت حاصل‌ضرب تراوایی و عرض شکاف تعریف می‌شود. این امر نشان دهنده مقاومت پروپانت متراکم شده داخل شکاف در مقابل جریان سیال است. در شرایط ایده‌آل گذردهی شکاف به‌قدری زیاد است که افت فشار در طول شکاف قابل اغماض می‌باشد. در عمل ممکن است در دوره تولید، افت فشاری در آن ایجاد شود.

¹ Conductivity

² Linear

³ Bilinear

۱۱-۵ پروفایل عملکرد مخزن بعد از ایجاد شکاف

جهت بررسی اقتصادی طرح ایجاد شکاف، باید پروفیل تولید، تولید انباشتی و هزینه عملیاتی قبل و بعد از ایجاد شکاف مشخص شود. روش‌های گسترده و متنوع تحلیلی، گرافیکی و کامپیوتری جهت تخمین اثر طول شکاف و گذردهی آن در بهره‌دهی چاه وجود دارد. روش‌هایی که بدین منظور استفاده می‌شود به نوع رژیم جریان پایدار^۱، نیمه پایا^۲ و گذرا^۳ بستگی دارد. به‌طور کلی جریان پایا در تراوایی بیشتر از ۱۰ md، برای تراوایی کمتر از ۱ md جریان گذرا و در شرایط بین ۱-۱۰ md روشی که نتایج قابل قبول اقتصادی را ارائه دهد باید انتخاب شود [۶].

۱-۱۱-۵ شرایط پایدار یا نیمه پایدار

شرایط پایدار یا نیمه پایدار جریانی وقتی در مخزن پایدار می‌شود، که تراوایی سازند مخزنی نسبتاً زیاد باشد و در زمان کوتاهی این رژیم‌های جریانی پدید آید. با استفاده از روش‌های پرتس، کورو و تینسلی، نرخ افزایش تولید حاصل از عملیات قابل محاسبه است. سپس پروفایل تولید از طریق روش‌های کاهش درصد ثابت، هیپربولیک و یا روش کاهش‌های مونیگ تخمین زده می‌شود. لازم به ذکر است که انتخاب روش افزایش نرخ تولید و پروفایل مربوطه تاثیر به‌سزایی در اقتصاد طرح دارد. رژیم جریان نیمه پایا اغلب در یکی از سه دسته زیر قرار می‌گیرد:

- کاهش با درصد ثابت
- کاهش هیپربولیک
- کاهش هارمونیک

۲-۱۱-۵ جریان گذرا

اگر تراوایی سازند کم باشد و جریان گذرا بر تولید حاکم شود، مدل‌های شبیه‌سازی کامپیوتری دو یا سه بعدی یا نمودارهای تیبیک هلدیچ و آگاروال باید مورد استفاده قرار گیرد. مدل‌های شبیه‌سازی مخزن که به‌صورت المان محدود^۴ یا تفاضل محدود^۵ حل شده‌اند، روش ترجیحی پیش‌بینی عملکرد چاه با شکاف می‌باشند، اما دارای محدودیت‌هایی به قرار ذیل می‌باشد:

- کیفیت و کمیت اطلاعات شکاف و مخزن جهت مدل‌سازی.
- هزینه محاسباتی مرتبط با این روش حل معادله، بسیار بیشتر از روش‌های تحلیلی است

به‌دلیل هزینه‌ها و مشکلات مرتبط با روش فوق روش‌های تحلیلی متعددی طراحی و مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶].

۶. نتایج تجزیه تحلیل

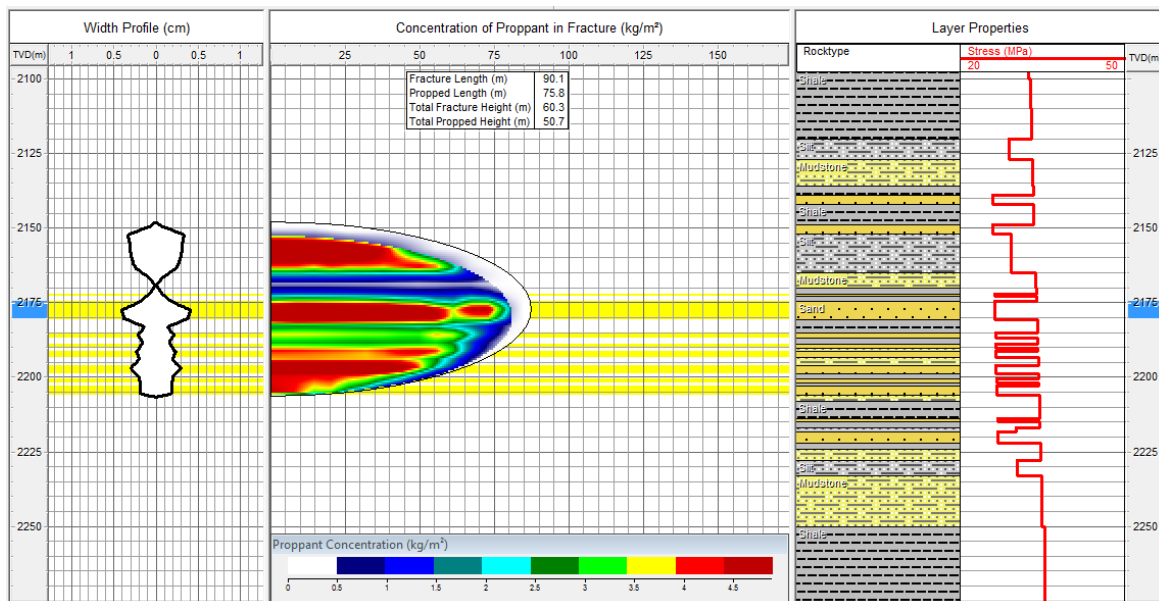
جهت بررسی و ایجاد شکاف در این مخزن، دو سناریوی مختلف بر اساس طول و گذردهی موثر شکاف انتخاب شده است. در هر سناریو، شکافی با طول و میزان گذردهی موثر، متفاوت از دیگر سناریوها طراحی می‌شود. سپس برای شکاف در هر سناریو پارامترهای مختلف، حساسیت‌سنجی شده و بر

¹ Steade State
² Semi Steady State
³ Transient
⁴ Finite Element
⁵ Finite Diffrence

اساس آن مناسب ترین شکاف با مشخصات سناریو مورد نظر طراحی می شود. در هر سناریو جداولی شامل برنامه تزریق و پارامترهای شکاف و اشکالی شامل پروفایل شکاف ارائه می شود.

۱-۶ سناریو اول

در این سناریو شکافی با میزان گسترش زیاد و گذردهی بالا طراحی شده است. شکل (۸) پروفیل گسترش شکاف در سازند را نشان می دهد. گسترش این شکاف در تمام لایه های انتخابی صورت پذیرفته است. در شکل (۸) نحوه تمرکز پروپانت در سطح شکاف نشان داده شده است. تصویر بیانگر آن است که انتقال پروپانت در نوک شکاف به خوبی انجام نشده و این بخش از شکاف دارای تمرکز پایین پروپانت است.



شکل ۸- شماتیک گسترش شکاف در سازند و نمایش نحوه توزیع پروپانت در شکاف (سناریو اول)

برای دست یافتن به شکافی با مشخصات مورد نظر باید پارامترهای دبی تزریقی، نوع سیال، نوع پروپانت و گام های رشد غلظت پروپانت به درستی تعیین شود. هر چه قطر متوسط پروپانت بیشتر باشد طول نگهداری شده کمتر و گذردهی بیشتر خواهد شد. تاثیر قطر پروپانت بر طول و گذردهی به میزان پروپانت، تعداد مراحل تزریق و دبی تزریق وابسته است.

به منظور ایجاد شکاف در ۲۰ مرحله با دبی های متفاوت تزریق صورت پذیرفته است. سیال شکافنده به منظور ایجاد شکاف، HL-2% KCL، Linear Gel و XL Gel و پروپانت تزریقی در این شکاف 100-Mesh و CarboLt-2040 می باشد. در مرحله اول با تزریق ۱۵/۲۵۰ متر مکعب سیال پد، شکاف اولیه ایجاد می شود. در مراحل بعد، دوغاب با غلظت متغیر افزوده می شود. این شکاف دارای نصف طول نگهداری شده ماکزیمم ۹۰ متر و گذردهی متوسط ۱۲۷,۴ میلی داری در متر است. بازشدگی متوسط این شکاف ۰,۱۸۸ سانتی متر می باشد.

جداول (۱) و (۲) به ترتیب مشخصات هندسه شکاف و هدایت پذیری شکاف را نشان می دهد.

جدول ۱- خلاصه اطلاعات هندسه شکاف برای سناریو اول*

Fracture Half-Length (m)	90	Propped Half-Length (m)	76
Total Fracture Height (m)	60	Total Propped Height (m)	51
Depth to Fracture Top (m)	2147	Depth to Propped Fracture Top (m)	2156
Depth to Fracture Bottom (m)	2207	Depth to Propped Fracture Bottom (m)	2207
Equivalent Number of Multiple Fracs	1.0	Max. Fracture Width (cm)	0.81
Fracture Slurry Efficiency**	0.41	Avg. Fracture Width (cm)	0.40
		Avg. Proppant Concentration (kg/m ²)	3.60

* All values reported are for the entire fracture system at a model time of 115.00 min (middle of Stage 20 Shut-in after Main frac flush)

** Value is reported for the end of the last pumping stage (Stage 19, Main frac flush)

جدول ۲- خلاصه اطلاعات هدایت پذیری شکاف برای سناریو اول*

Avg. Conductivity** (mD·m)	127.5	Avg. Frac Width (Closed on prop) (cm)	0.188
Dimensionless Conductivity**	0.42	Ref. Formation Permeability (mD)	4
Proppant Damage Factor	0.75	Undamaged Prop Perm at Stress (mD)	439380
Apparent Damage Factor***	0.00	Prop Perm with Prop Damage (mD)	109845
Total Damage Factor	0.75	Prop Perm with Total Damage (mD)	109845
Effective Propped Length (m)	76	Proppant Embedment (mm)	0.467

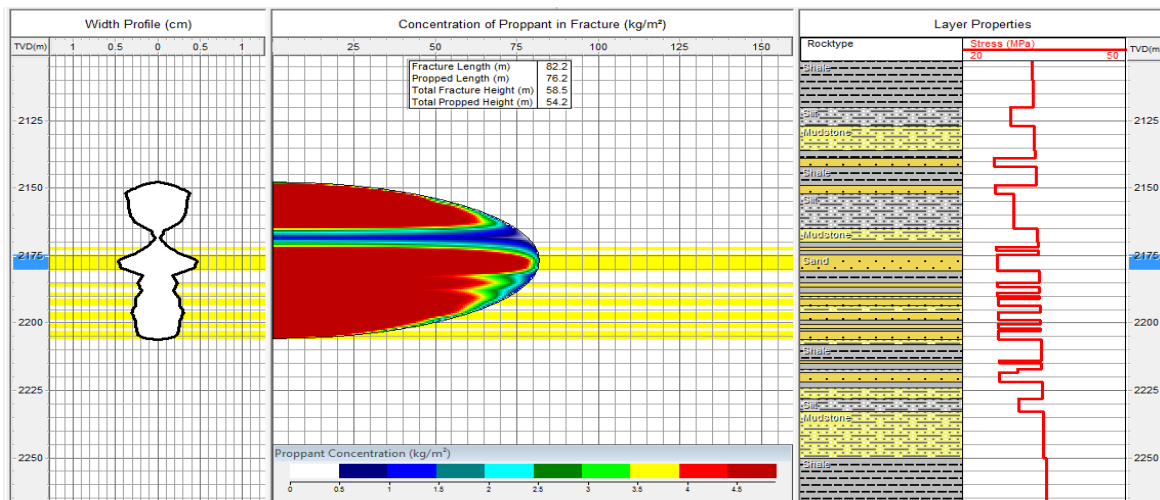
* All values reported are for the entire fracture system. Actual conductivity could be lower if equivalent multiple fractures have been modeled

** Total Damage Factor and Proppant Embedment have been applied

*** Apparent Damage due to non-Darcy and multi-phase flow

۲-۶ سناریو دوم

در این سناریو شکافی با میزان گسترش کمتر نسبت به حالت قبل و گذردهی قابل توجهی طراحی شده است. مانند قبل گسترش شکاف در تمام لایه‌های انتخابی صورت پذیرفته است. شکل (۹) نحوه تمرکز پروپانت در سطح شکاف را نشان می‌دهد. این شکل بیانگر این است که انتقال پروپانت در نوک شکاف نسبت به حالت قبل بهتر انجام شده است.



شکل ۹- شمایک گسترش شکاف در سازند و نمایش نحوه توزیع پروپانت در شکاف (سناریو دوم)

مانند سناریو قبل جهت رسیدن به شکافی با مشخصات مورد نظر باید پارامترهای دبی تزریقی، نوع سیال، نوع پروپانت و گام‌های رشد غلظت پروپانت به درستی تعیین شود.

به منظور ایجاد شکاف در ۲۰ مرحله با دبی‌های متفاوت، تزریق صورت پذیرفته است. در این حالت نسبت به سناریو قبلی تغییری در نوع سیال شکافنده به منظور ایجاد شکاف، و پروپانت تزریقی در این شکاف حاصل نشده است. در مرحله اول با تزریق ۱۵/۲۵۰ متر مکعب سیال پد، شکاف اولیه ایجاد می‌شود. در مراحل بعد، دوغاب با غلظت متغیر افزوده شده، و دبی تزریق نسبت به حالت اول کاهش می‌یابد. در برخی مراحل حجم سیال شکافنده افزایش یافته است.

این شکاف دارای نصف طول نگهداری شده ماکزیمم ۸۲ متر و گذردهی متوسط ۳۱۳٫۸ میلی‌داری در متر است. بازشدگی متوسط این شکاف ۰٫۴۰۱ سانتی‌متر می‌باشد.

جداول (۳) و (۴) به ترتیب مشخصات هندسه شکاف و هدایت پذیری شکاف را نشان می‌دهد.

جدول ۳- خلاصه اطلاعات هندسه شکاف برای سناریو دوم*

Fracture Half-Length (m)	82	Propped Half-Length (m)	76
Total Fracture Height (m)	58	Total Propped Height (m)	54
Depth to Fracture Top (m)	2148	Depth to Propped Fracture Top (m)	2150
Depth to Fracture Bottom (m)	2206	Depth to Propped Fracture Bottom (m)	2205
Equivalent Number of Multiple Fracs	1.0	Max. Fracture Width (cm)	0.94
Fracture Slurry Efficiency**	0.29	Avg. Fracture Width (cm)	0.40
		Avg. Proppant Concentration (kg/m ²)	6.58

* All values reported are for the entire fracture system at a model time of 168.40 min (end of Stage 20 Shut-in after Main frac flush)

** Value is reported for the end of the last pumping stage (Stage 19, Main frac flush)

جدول ۴- خلاصه اطلاعات هدایت پذیری شکاف برای سناریو دوم*

Avg. Conductivity** (mD-m)	313.8	Avg. Frac Width (Closed on prop) (cm)	0.401
Dimensionless Conductivity**	1.03	Ref. Formation Permeability (mD)	4
Proppant Damage Factor	0.75	Undamaged Prop Perm at Stress (mD)	439380
Apparent Damage Factor***	0.00	Prop Perm with Prop Damage (mD)	109845
Total Damage Factor	0.75	Prop Perm with Total Damage (mD)	109845
Effective Propped Length (m)	76	Proppant Embedment (mm)	0.467

* All values reported are for the entire fracture system. Actual conductivity could be lower if equivalent multiple fractures have been modeled

** Total Damage Factor and Proppant Embedment have been applied

*** Apparent Damage due to non-Darcy and multi-phase flow

۷. نتیجه گیری

در این فصل نتایج حاصل از تحلیل داده های سناریوها و مقایسه آنها با یکدیگر ارائه شده است. همچنین پیشنهاداتی راجع به انجام عملیات هیدرولیکی در مخازن مشابه این پروژه ارائه خواهد شد.

- میزان اختلاف تنش های لایه های بالایی و پایینی لایه تولیدی در انتخاب مدل توسعه شکاف نقش بسیار مهمی دارد. در این مخزن با توجه به اختلاف نسبتاً زیاد لایه های انتخابی، نفوذ شکاف در تمام لایه های انتخابی دیده می شود.
- در این پروژه با کاهش دبی تزریق و افزایش حجم سیال در سناریو دوم در مقایسه با سناریو اول، تجمع پروپانت در نوک شکاف افزایش یافته که سبب استحکام شکاف و افزایش هدایت پذیری آن می شود.
- بر اساس نتایج حاصله نفوذ پذیری و هدایت پذیری CarboLt- 2040 از بقیه پروپانت ها بیشتر است و در مراحل تزریق از این پروپانت بیشتر استفاده شده است.
- سیال XL Gel با توجه به میزان ویسکوزیته مناسب و بازدهی مطلوب در عملیات طراحی شده، پیشنهاد می شود در مراحل تزریق بیشتری، نسبت به دو سیال دیگر استفاده شود.
- افزایش تولید، معیار کافی برای سنجش یک عملیات شکاف هیدرولیکی نیست. ممکن است یک عملیات منجر به تولید بالایی شود، اما از نظر اقتصادی دارای صرفه نباشد. به این معنی که ارزش خالص حاضر مطلوبی نداشته باشد.
- نفوذ پذیری نسبت به طول اهمیت بیشتری در میزان تولید جمعی این مخزن دارد. به گونه ای که، افزایش جزئی نفوذ پذیری نسبت به افزایش قابل توجه طول شکاف، تاثیر بیشتری در میزان تولید جمعی خواهد داشت. همچنین ارتقا نفوذ پذیری جهت افزایش تولید دارای ارزش خالص بسیار بالاتری نسبت به ارتقا طول شکاف می باشد.

مراجع

1. آیت الهی، مجید رضا؛ پور کاویان، محمد حسن؛ تحلیل عددی عملیات شکست هیدرولیکی در چاه های مایل؛ تهران، نارمک، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مکانیک، آزمایشگاه خستگی و شکست، ۱۳۸۹.
2. Brady, B. et al., "Progress in Fracture Treatment Design", Houston, Texas, USA, October 1992.
3. Economides, M.J. and Nolte, K.G.: "Reservoir Stimulation", Third Edition, John Wiley & Sons, LTD, West Sussex, England, 2000.
4. P.R.B. Devloo, P.D. Fernandes, S.M. Gomes, C.M.A. Ayala Bravo, R.G. Damas, A finite element model for three dimensional hydraulic fracturing, Mathematics and Computers in Simulation, Vol. 73, 142-155, 2006
5. Meyer, B.R., "Design Formulae for 2-D and 3-D Vertical Hydraulic Fractures : Model Comparison and Parametric Studies". SPE 15240, Louisville, May, 1986.
6. Gidley et al.: "Recent Advances in Hydraulic Fracturing", SPE Monograph, Richardson, Texas, 2001.