نشریه علمی ژئومکانیک نفت
JOURNAL OF PETROLEUM GEOMECHANICS
(JPG)

مقاله پژوهشی

# مدل‌سازی ژئومکانیکی برای شناسایی مشکلات یکپارچگی چاه

**محمد عنایتی نجف آبادی[۱]؛ سعید نیکوسخن[۲]؛ سیده حسنا طالبیان[۳*]؛ احمد فهیمی فر[۴]**

۱- کارشناس ارشد؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- استادیار؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- استادیار؛ دانشکده نفت و مهندسی شیمی، دانشگاه ایلام

۴- استاد؛ دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

**دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۰۸ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۱۵**

**شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/jpg.2022.224711.1119**

**واژگان کلیدی**

**مدل تنیده ژئومکانیک و مخزن، روش اجزا محدود، یکپارچگی چاه، تولید آب اضافی، غلاف سیمانی**

**چکیده**

یکپارچگی چاه یک ضرورت جهت مجزا کردن چاه از ورود سیال سازندهای مجاور است و ازبین رفتن این یکپارچگی در طول عمر چاه، موجب بروز مشکلاتی از قبیل تولید آب اضافی در چاه تولیدی، نشت سیال سازند های مجاور، آسیب به تجهیزات، فوران چاه، صدمات به نیروی انسانی و آسیب به محیطزیست می شود. در صورت عدم رفع مشکل شاهد مسدود شدن چاه و از بین رفتن سرمایه خواهیم بود. از بین رفتن این یکپارچگی عوامل متعددی از جمله عملیات ناقص مسدود کننده، آسیب و تغییر شکل سیستم نگهداری، اتصال ضعیف ناشی از کیک گل، شکستگی‌های ایجاد شده در مسدودکننده و سازند و وجود کانال در سیمان دارد. کاربرد ژئومکانیک در صنعت نفت و گاز به صورت چشمگیری درحال توسعه است، تعیین خواص ژئومکانیکی سنگ از قبیل پایداری چاه و سیستم نگهداری و شبیه سازی کوپل جریان سیال، از موارد مختلف استفاده از مدل ژئومکانیکی در طول توسعه یک میدان هیدروکربنی می باشد؛ نشست مخزن و ایجاد تنش های برشی و کششی در سطوح مشترک بین مسدود کننده و سیستم نگهداری و همچنین سازند و مسدود کننده ،تغییرات فشار منفذی، تنش های مکانیکی ناشی از تزریق یا تولید می تواند در نزدیکی چاه منجر به تغییر تنش‌های موجود شود که این امر از بین رفتن یکپارچگی چاه را به دنبال خواهد داشت. در این مطالعه سعی براین بود که مدل‌سازی ژئومکانیکی با نگرش توامان هیدرومکانیک برای چاه‌های یکی از میادین غرب ایران با استفاده از روش اجزا محدود صورت پذیرد و با توجه به این مدل، یکپارچگی چاه در مرحله تولید چاه مورد بررسی قرار گیرد.

## ۱. پیش‌گفتار

حفظ یکپارچگی چاه نفت از اساسی‌ترین فعالیت‌های انجام شده در چاه تلقی می‌شود. غلاف سیمانی، جداری و سازند، اجزاء اصلی حفظ یکپارچگی چاه و مانع نشت سیالات مزاحم به درون چاه می باشند. اولین هدف غلاف سیمانی که بین جداری و سازند قرار می گیرد مجزا کردن چاه از ورود سیال مزاحم و محافظت از جداری می باشد. طراحی سیمان و جداری با ایجاد ناحیه نفوذناپذیر مانع حرکت سیال سازندهای مجاور و به سمت چاه و سطح می شود [۱].

غلاف سیمانی و جداری ممکن است توسط عملیات تکمیلی چاه، آزمایش‌های فشار، فرازآوری و تولید آسیب ببینند که باعث از دست رفتن یکپارچگی بین آنها می شود [۲]. ناحیه نفوذناپذیر سیمانی از ارتباط سیالی بین سازندهای حفاری شده جلوگیری می‌کند [۳]. آسیب غلاف سیمانی منجر به بسیاری از مشکلات پرهزینه می‌گردد مخصوصاً هزینه بالای عملیات تعمیری که هزینه ای بین نیم میلیون تا یک و نیم میلیون دلار را شامل می‌شود. به علاوه عملیات تعمیر همراره خطرناک می‌باشد و ممکن است باعث صدمات نیروی انسانی،

* دانشکده مهندسی نفت و شیمی دانشگاه ایلام، *hsn.talebian@gmail.com*

آسیب به تجهیزات و فوران چاه و آسیب به محیط زیست را شامل شود [۱].

جریان سیال می‌تواند از سازند نفوذپذیر عبور کند و اگر ناحیه آسیب سیمان یا جداری گسترده باشد به لبه آستری یا حتی به سطح برسد. مطالعات نشان می‌دهد که نشت یه مشکل تکرارشدنی برای چاه‌های دارای غلاف می‌باشد. به عنوان مثال در آلبرتا از بین ۳۱۶۴۳۹ حلقه چاه حدود ۰٫۶٪ دچار پدیده مهاجرت گاز و ۳٫۹٪ دارای مجرای تخلیه سطحی بودند که در ۹۸٪ آنها از غلاف سیمانی استفاده شده است [۲].

مطالعات انجام شده بر روی ۱۵۵۰۰ حلقه چاه در خلیج مکزیک نشان می دهد که با گذشت ۱۵ سال از عمر چاهها، در حدود ۵۰ درصد چاه‌ها احتمال فشار گرفتن فضای حلقوی پشت جداری وجود دارد و درصد کلی چاه‌هایی که در معرض این مشکل قرار می گیرند حدود ۳۵ درصد بوده و آمار مشابهی نیز در دریای شمال گزارش شده است [۴]. اخیراً بالغ بر ۸۰۰۰ چاه در خلیج مکزیک فشار فضای حلقوی پشت جداری را نشان داده اند و بالغ بر ۱۸۰۰۰ چاه در آلبرتا کانادا دارای مشکلات نشت بوده‌اند [۵].

یکی از روش‌های متداول بررسی یکپارچگی چاه نفت، استفاده از مدل اجزا محدود ژئومکانیکی می‌باشد. راوی و همکاران، مدل اجزاء محدودی را معرفی کردند تا شرایطی را که در داخل چاه رخ می‌دهد، به طور واقعی‌تر مدل کند. مزیت این روش این است که با بارگذاری مدل در مراحل مختلف، کنترل بیشتری برهم کنش بین سطوح جداری، سنگ مخزن و سیمان حفاری فراهم می‌شود [۲]. گری و همکاران یک مدل اجزاء محدودی را ارائه دادند. بارهایی که در حین نصب سیمان وارد می‌شوند را در سه مرحله توصیف و در سه مرحله نهایی شرایط مختلف بارگذاری عملیاتی را توصیف کردند. در حالی که این مدل تعاریف بسیار دقیق و مرحله ای را ارائه می دهد اما این مراحل شامل یک مدل شیمیایی - حرارتی - الاستیک می باشد [۶].

بویز و همکاران، نشان دادند که گرچه گری و همکاران شرح مفصل شیمیایی - حرارتی - الاستیک از سیمان داشتند اما این به اندازه کافی برای تعیین دقیق وضعیت تنش دقیق نیست به همین دلیل است که مدل حرارتی- پرو الاستیک مورد نیاز است. وضعیت تنش در سیمان هنگامی که در فضای حلقوی قرار می گیرد کلیدی برای تعیین یکپارچگی سیمان فضای حلقوی است [۷].

فورمنترو و همکاران، نیاز به مدل‌هایی برای درنظرگرفتن پدیده‌های اضافی مشاهده شده در سیمان، به ویژه فشار منفذی و انقباض را تأکید کردند. برای انجام این کار پیشنهاد کردند که یک مدل شیمیایی - حرارتی - منفذی - مکانیکی برای مدل سازی دقیق جداری، سیمان، سازند و سطح تماس آنها لازم است. آنها از یک روش به نام منحنی پاسخ سیستم برای تحلیل شرایط بارگذاری مختلف استفاده کردند. این منحنی برای بررسی شکست سطح تماس استفاده شده است. این مدل ها پیچیده هستند و نیاز به دانش و محاسبات زیادی برای تعریف *SRC* دارند [۸].

بویز و همکاران، دریافتند که اگر فشار منفذی در سازند بیشتر از فشار منفذی در سیمان باشد، نیروی فشاری بر پوشش سیمانی اعمال می شود، اما اگر فشار منفذی در سیمان بزرگتر یا برابر با فشار منفذی سازند باشد، آنگاه با قرارگیری سیمان در حالت کشش، مایع منفذی نیرویی را به سازند و جداری اعمال می کند. شرایط بارگیری که در چاه رخ می دهد می تواند به عنوان تغییرات فشار و (یا) دما توصیف شود. هنگام حفاری، گل حفاری از سطح به سمت پایین پمپ می شود. گل حفاری دارای فشار هیدرواستاتیک است و پمپ فشاری را برای جریان یافتن گل اعمال می کند و گل حفاری دمایی پایین تر از سازند دارد زیرا از تجهیزات سطحی می‌آید. عملیات دیگری مانند شکست هیدرولیکی، تزریق سیال، اسیدکاری و غیره تغییرات فشار و دما را به داخل جداری مشابه گل حفاری اعمال می‌کند [۷].

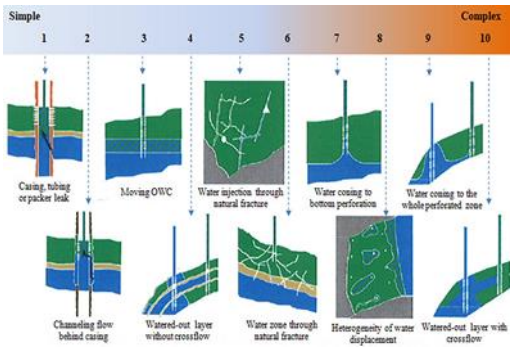
اگر چه در نظر گرفتن ناهمگنی واقع گرایانه‌تر است اما خارج از محدوده این مطالعه است؛ زیرا هدف اصلی از این مدل‌سازی عددی ارائه یک روش قوی مدل سازی برای بررسی یکپارچگی ناحیه نزدیک چاه و تأثیر بارهای وارده بر سیمان فضای حلقوی است. مدل اجزاء محدود، از ویژگی هم‌افزایی برای ایجاد شرایط اولیه مدل قبل از هر مرحله بارگذاری استفاده می کند. مزیت ساخت مدل اجزائ محدود، مشاهده و ثبت تغییرات تنش و تغییر شکل پس از بارگذاری است [۶].

بررسی‌های صورت گرفته بر روی یکی از چاه‌های واقع شده در یکی از میادین غرب ایران، تولید آب بیش از مقادیر پیش‌بینی شده را اثبات نمود. در این مقاله، به منظور مشخص کردن ترازهای ازبین رفتن یکپارچگی در چاه مورد نظر، از

مدل‌سازی ژئومکانیکی به کمک روش‌های اجزا محدود و بر اساس فرآیندهای توامان هیدرومکانیک استفاده شده است. بر این اساس، مدل اجزا محدود، پنج تراز منتخب از چاه مورد نظر مورد بررسی قرارگرفته و در نهایت محل از بین رفتن یکپارچگی چاه مشخص شده است. همچنین نتایج بدست آمده از مدل ژئومکانیکی هیدرومکانیک با نتایج بدست آمده از تست‌های *CBL* و *VDL* مورد صحت سنجی واقع شده و نتایج بدست آمده مورد وثوق قرار گرفته است.

## ۲. بررسی فرآیندهای تولید آب در مخزن

تولید آب بیش از اندازه به عنوان سیال مزاحم در فرآیند تولید نفت در یکی از میادین جنوب غربی کشور منجر به بروز مشکلات فراوان و آسیب به تجهیزات سطح‌الارضی شده است. فرآیندهای مختلف به منظور توجیه حضور آب یکی از میادین جنوب غربی ایران به ۲ دسته کلی موارد مرتبط با تجهیزات چاه و موارد مربوط به مخزن سیال تولیدی تقسیم می‌شوند. موارد مرتبط به تجهیزات چاه شامل اجرای نامناسب تجهیزات خارجی و ازبین رفتن غلاف سیمانی می‌باشد. همچنین موارد مربوط به مخزن شامل نفوذ آب از طریق لایه با تراوایی بالا، افزایش تراز سطح آب و نفت، تماس لایه‌های تراز با سطح تماس بین آب و نفت، رسیدن سطح تماس آب و نفت به ناحیه‌ی مشبک‌کاری شده و تولید آب به دلیل تزریق سیال‌های دیگر می‌باشد [۹].

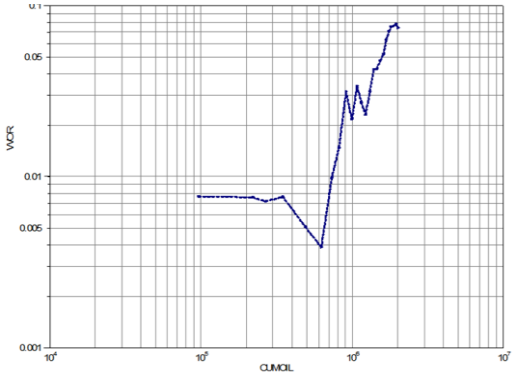



**شکل۱. فرآیندهای ده‌گانه تولید آب در حین تولید نفت [۹]**

### ۱,۲ مطالعه موردی تولید آب در یکی از مخازن غرب ایران

بر اساس مطالعات انجام شده در خصوص تولید آب در چاه مورد نظر در یکی از میادین غربی ایران، مشخص شد تولید آب در مدت زمان کوتاه بر اساس نمودار ۲ رشد قابل توجهی داشته است.

بررسی فرآیندهای مختلف تولید آب در چاه مورد نظر، ازبین رفتن یکپارچگی و تخریب غلاف سیمانی را از دلایل اصلی افزایش ناگهانی تولید آب تلقی کرده است. بدین ترتیب، مشخص کردن ترازهای آسیب سیمان و از بین رفتن یکپارچگی، نقش به سزایی در جلوگیری از تولید آب ایفا خواهد کرد.




**شکل ۲. نمودار نرخ تولید آب بر حسب تولید نفت تجمعی در یکی از چاه‌های میدان نفتی غرب ایران [۹]**

## ۳. مدل‌سازی کوپل هیدرومکانیک

به منظور شناسایی ترازهای ازبین رفته یکپارچگی چاه، از مدل‌سازی ژئومکانیکی با دیدگاه فرآیندهای توامان هیدرومکانیک استفاده شده است.

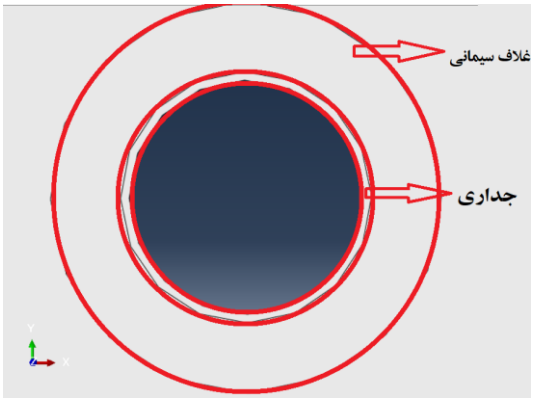
### ۱,۳ هندسه مدل‌سازی

در این بخش ۵ تراز ۴۱۰۰ متر، ۴۲۲۵ متر، ۴۲۷۵ متر، ۴۵۷۵ متر و ۴۶۲۵ متر مورد بررسی قرار گرفته است. هندسه مدل در طول تراز ۴۱۰۰ تا ۴۶۲۵ متر ثابت بوده و اطلاعات مربوط به هندسه در جدول ۱ درج شده است.

**جدول ۱. هندسه مدل**

| اجزای چاه | ابعاد ($m$) |
|---|---|
| قطر چاه | ۰٫۱۲۷ |
| ضخامت جداری | ۰٫۰۰۹۲۷۱ |
| ضخامت سیمان | ۰٫۰۷۶۲ |
| قطر مدل دوبعدی | ۵۰٫۸ |

لازم به ذکر است استفاده از مدل دوبعدی حالت کرنش صفحه‌ای در شرایط استفاده شد که مطابق مشخصات هندسی، طول چاه در راستای محور $Z$ بسیار بزرگتر از طول مدل در راستای محور $X$ و $Y$ است. بنابراین، تغییر شکل‌های در راستای محور $Z$ نسبت طول چاه در این محور ناچیز و قابل صرف‌نظر است. تعیین محدوده مدل از شرایط مکانیک سنگی پیروی نکرده و با توجه به اینکه شرایط فشار منفذی و جریان سیال به منظور تولید نفت، در رژیم استرس‌های اطراف چاه اثر دارند و مدل ساخته شده از قوانین فرآیندهای توامان بهره می‌گیرد؛ در نتیجه دایره‌ای به شعاع ۵۰ متر را به عنوان محدوده نهایی مدل در نظر گرفته ایم تا فرآیند تغییر فشار منفذی و حرکت سیال به سمت چاه با مشکل مواجه نشود. مدل ساخته شده در ترازهای متفاوت با توجه به شرایط مطرح شده مطابق شکل ۳ طراحی شده است.




**شکل ۳. مدل چاه مورد نظر در تراز ۴۱۰۰ تا ۴۶۲۵ متر**

## ۲,۳. پارامترهای هیدرومکانیکی مدل‌سازی

به منظور نزدیک کردن مدل ساخته شده با شرایط واقعی چاه مورد نظر، اطلاعات موجود مربوط به خواص الاستیک هر بخش و همچنین خواص نفوذپذیری از سازند در برگیرنده مطابق جدول ۲ اعمال شده است. همچنین، اطلاعات مربوط به غلاف سیمانی و فضای جداری مطابق جدول ۳ لحاظ شده است.

فرض می‌شود سازند در برگیرنده، غلاف سیمانی و جداری به صورت همگن و همسانگرد بود و رفتار الاستیک تا لحظه شکست پلاستیک بر مدل سازگار است. همچنین برای بررسی شکست و از بین رفتن غلاف سیمانی از مدل موهر-کلمب بهره گرفته شده است. با توجه به اینکه خواص نفوذپذیری در مدل در محدوده غلاف سیمانی و جداری، به نحوی است که اجازه ورود سیال به چاه و در نتیجه تولید نفت را نمی‌دهد. لذا از دادن خواص واقعی نفوذپذیری برای غلاف سیمانی و جداری صرف نظر شده و برای یکپارچگی مدل، خواص مشابه سازند فرض شده است. این عمل به واسطه مقدار کم ضخامت جداری و غلاف سیمانی در مقابل محدوده مدل، تاثیری در پاسخ‌های بدست آمده به وجود نمی‌آورد.

**جدول ۲. پارامترهای سازندی استفاده شده در مدل‌سازی ژئومکانیکی ترازهای سازندی**

| متر تراز سازند | پارامتر مخزن | مقدار | واحد | منبع |
|---|---|---|---|---|
| ۴۱۰۰ | مدول الاستیسیته | ۲۹,۴۳ | *GPa* | اطلاعات مغزه |
| | ضریب پواسون | ۰,۲۱ | - | اطلاعات مغزه |
| | تراوایی | $۲,۹\times۱۰^{-۷}$ | *M/S* | *NMR* |
| | نسبت پوکی | ۰,۱۹ | - | لاگ نوترون |
| ۴۲۲۵ | مدول الاستیسیته | ۳۰,۲۱ | *GPa* | اطلاعات مغزه |
| | ضریب پواسون | ۰,۲۰ | - | اطلاعات مغزه |
| | تراوایی | $۱,۷۱\times۱۰^{-۷}$ | *M/S* | *NMR* |
| | نسبت پوکی | ۰,۲۲ | - | لاگ نوترون |
| ۴۲۷۵ | مدول الاستیسیته | ۳۱,۷۱ | *GPa* | اطلاعات مغزه |
| | ضریب پواسون | ۰,۲۰ | - | اطلاعات مغزه |
| | تراوایی | $۱,۷۱\times۱۰^{-۷}$ | *M/S* | *NMR* |
| | نسبت پوکی | ۰,۲۲ | - | لاگ نوترون |
| ۴۵۷۵ | مدول الاستیسیته | ۳۴,۴۷ | *GPa* | اطلاعات مغزه |
| | ضریب پواسون | ۰,۲۲ | - | اطلاعات مغزه |
| | تراوایی | $۲,۸\times۱۰^{-۷}$ | *M/S* | *NMR* |
| | نسبت پوکی | ۰,۲۵ | - | لاگ نوترون |
| ۴۶۲۵ | مدول الاستیسیته | ۳۴,۵۱ | *GPa* | اطلاعات مغزه |
| | ضریب پواسون | ۰,۲۱ | - | اطلاعات مغزه |
| | تراوایی | $۲,۹\times۱۰^{-۷}$ | *M/S* | *NMR* |
| | نسبت پوکی | ۰,۲۵ | - | لاگ نوترون |

**جدول ۳. پارامترهای استفاده شده در مدل‌سازی ژئومکانیکی غلاف سیمانی و لوله جداری در طول تراز سازندی**

| واحد های چاه | پارامتر | مقدار | واحد | منبع |
|---|---|---|---|---|
| غلاف سیمانی | مدول الاستیسیته | ۲۰,۷ | *GPa* | اطلاعات مغزه |
| | ضریب پواسون | ۰,۲ | - | اطلاعات مغزه |
| | تراوایی | $۲,۹\times۱۰^{-۷}$ | *M/S* | لاگ *NMR* |
| | نسبت پوکی | ۰,۲۵ | - | لاگ نوترون |
| جداری | مدول الاستیسیته | ۲۰۰ | *GPa* | اطلاعات مغزه |
| | ضریب پواسون | ۰,۲۷ | - | اطلاعات مغزه |
| | تراوایی | $۲,۹\times۱۰^{-۷}$ | *M/S* | لاگ *NMR* |
| | نسبت پوکی | ۰,۲۵ | - | لاگ نوترون |

## ۳،۳. کوپل هیدرومکانیکی

در تئوری پورالاستیک، معادله تعادل انرژی برای یک واحد ماتریس سنگ مخزن کربناته مدنظر با معادله ۱ نوشته می‌شود:

$$df = \sigma d\epsilon + s_{ij} de_{ij} + p d\phi \qquad (۱)$$

که در آن، $f$ انرژی آزاد هلمهولتز یک واحد حجمی مخزن، $\sigma$، $s_{ij}$ و $p$ به ترتیب عبارتند از استرس حجمی، مشتق استرس و فشار منفذی. $\epsilon$، $e_{ij}$ و $\phi$ به ترتیب عبارتند از تنش حجمی، مشتقات تنش و تخلخل لاگرانژی. براساس این معادله تعادل انرژی، معادلات سازنده ماتریس مخزن کربناته به این صورت نوشته می‌شود:

$$d\sigma = (K + b^2 N) d\epsilon - bN d\phi \qquad (۲)$$

$$dp = -bN d\epsilon + N d\phi \qquad (۳)$$

$$ds_{ij} = 2G de_{ij} \qquad (۴)$$

که در این معادلات، $K$، $b$، $N$ و $G$ ثابتهای پورالاستیک مربوط به مخزن هستند که عبارتند از مدول فشار زهکشی[۱]، ضریب بایوت[۲]، مدول بایوت[۳] و مدول برشی[۴]. از طریق معادله کارمن-کوزنی، تغییرات ناشی از استرس تخلخل به تراوایی مرتبط می شود که با معادله ۵ نشان داده می‌شود:

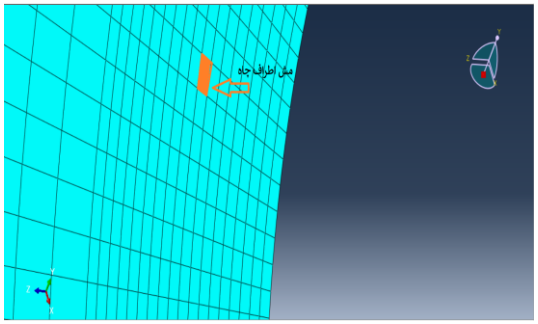
$$\frac{k}{k_0} = \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \times \frac{(1-\phi_0)^2}{\phi_0^3} \qquad (۵)$$

که در آن، $\phi_0$ و $k_0$ تخلخل و تراوایی حالت اولیه و $\phi$ و $k$ تخلخل و تراوایی حالت ثانویه بعد از تغییرات ناشی از استرس می باشد.

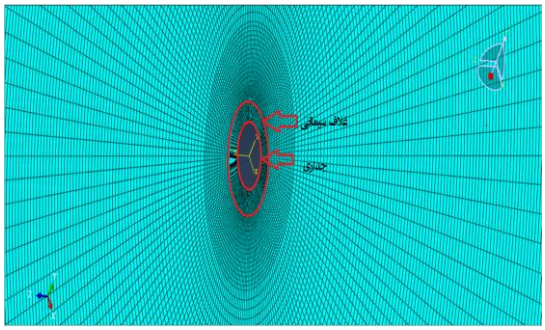
بنابر شرایط برجای رژیم تنش در منطقه قبل از انجام هرگونه تولید، نیاز به تعریف گامی برای تصدیق رژیم استرس منطقه وجود دارد. از این رو گام اول تحلیل مدل به منظور تحلیل رفتار سازند در برگیرنده به نام ژئواستاتیک تعریف شده است.لازم به ذکر است در گام اول، تغییر شکل‌های بزرگ در صورت انجام شدن لحاظ خواهد شد.

در گام دوم، شرایط تولید چاه و سوق دادن سیال موجود در سازند به سمت چاه مدل خوهد شد، از این رو در این گام تولید در ۱۰۰۰ روز مورد تحلیل واقع شده است. لازم به ذکر است در این مرحله، فشار منفذی در شرایط توامان هیدرومکانیکی تحلیل خواهد شد. بدین ترتیب با تغییر فشار منفذی به دلیل تولید نفت در مدت ۱۰۰۰ روز، رژیم استرس و تنش‌های وارده تغییر خواهد کرد.

لازم به ذکر است، به منظور تحلیل حساسیت برای اطمینان از نحوه مش بندی در مدل‌های ۶-گانه، مش بندی به صورت هوشمند و با تعداد ۱۵۰۰ المان نزدیک به چاه به عنوان پارامترهای تحلیل حساسیت، مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور نتایج تنش در این ۱۵۰۰ المان از تعداد ۱۰۰۰ مش تولیدی تا تعداد ۴۲۰۰۰ مش تولیدی بررسی شده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد افزایش تعداد مش مدل بالاتر از ۴۰۰۰۰ مش تولیدی تاثیری در روند جواب‌ها نداشته است. در نتیجه بیش از این تعداد مش در مدل تنها منجر به بالارفتن زمان تحلیل نرم افزار شده و به دقت جواب‌ها کمک شایانی نمی‌کند. نوع مش‌بندی در اطراف چاه در شکل ۴ و مش‌بندی سراسری مدل‌های ۵ گانه در شکل ۵ قابل مشاهده است.




**شکل۴. مش‌بندی انجام شده در اطراف چاه**




**شکل۵. مش‌بندی انجام شده در محیط مدل**

اطلاعات بدست آمده از مدل‌های ۶-گانه در تراز ۴۱۰۰ متری تا ۴۶۲۵ متری در فرآیند تولید ۱۰۰۰ روزه مشخص کننده شرایط غلاف سیمانی اطراف چاه در هر مدل می‌باشد. بدین منظور در حالی که اجرای عملیات سیمان‌کاری پس از نصب جداری در چاه مورد نظر، بدون نقص و منجر به یکپارچه‌شدن دیواره چاه در ترازهای مورد نظر گردد. مدل اجزا محدود بر

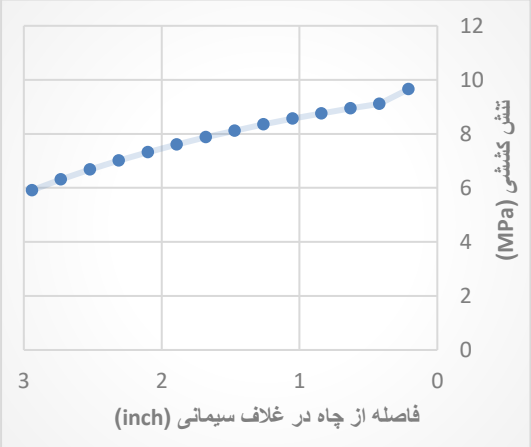
اساس فرآیند توامان هیدرومکانیک، مشخص‌کننده آسیب‌های وارده به غلاف سیمانی در اثر تغییرات تنش ناشی از تولید ۱۰۰۰ روزه خواهد بود.

## ۴. بحث و بررسی نتایج

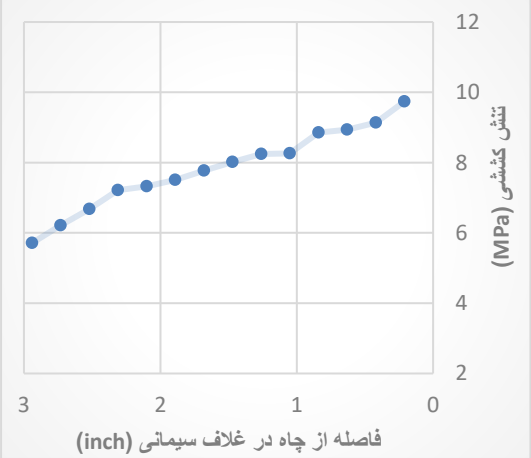
به استناد اطلاعات بدست آمده از مدل اجزا محدود بر اساس فرآیندهای توامان، تغییرات تنش در غلاف سیمانی مطابق شکلهای فلان می باشد. غلاف سیمانی به دلیل تفاوت در مقدار مقاومت فشار و مقاومت کششی در رده مواد شکننده جای می‌گیرد. بدین ترتیب عامل شکست در غلاف سیمانی ناشی از ضعف در تحمل بارهای کششی خواهد بود. بر اساس نتایج بدست آمده از تنش ایجاد شده در غلاف سیمانی مدل اجزا محدود و مقایسه آن با میزان مقاومت کششی غلاف سیمانی، می‌توان ناحیه‌های آسیب‌دیده غلاف سیمانی را مشخص کرد.

همچنین با توجه به اینکه اجزای مدل در مدل رفتاری از مدل موهر-کلمب پیروی می‌کنند. و مواد در این مدل رفتاری، تنها در محدوده‌ای قبل از حد کشش، تنش کششی را تحمل می‌کنند. لذا هنگامی که کشش به نمونه وارد می‌شود، مقاومتی از سیمان دیده نخواهد شد. از طرفی با توجه به اینکه وجود یک میکروآنالوس، می‌تواند یکپارچگی چاه را تحت تاثیر قرار دهد، لذا مقادیر پایین تنشش کششی توان از بین بردن یکپارچگی را خواهد داشت.

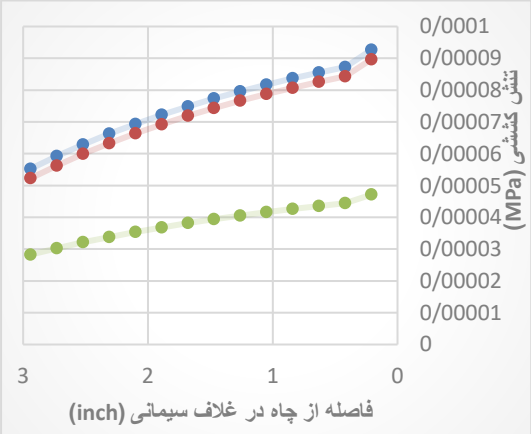
مطابق نتایج به دست آمده از تنش در نواحی اطراف چاه، که در شکل های ۶ تا ۸ نمایش داده شده است، در تراز ۴۵۷۵ متری، غلاف سیمانی تحت کشش ۹٫۶۵۱ مگاپاسکالی قرار خواهد گرفت. همچنین در تراز ۴۶۲۵ متری ، غلاف سیمانی تحت کشش، ۹٫۷۳۹ مگاپاسکالی واقع شده است. مطابق رفتار بدست آمده از غلاف سیمانی تحت کشش در ترازهای ۴۶۲۵ و ۴۵۷۵ متری، پدیده شکست غلاف سیمانی و از بین رفتن یکپارچگی قطعی خواهد بود. همچنین در ترازهای ۴۱۰۰ متری، ۴۲۲۵ متری و ۴۲۷۵ متری تنش کششی بسیار ناچیز و در حد صفر مشاهد شده است.




**شکل۶. تغییرات تنش در عمق ۴۵۷۵ متری**

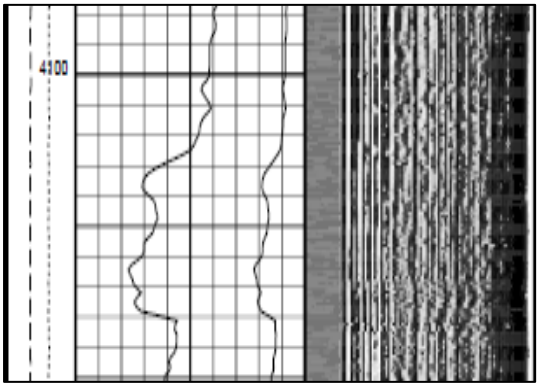



**شکل۷. تغییرات تنش در عمق ۴۶۲۵ متری**

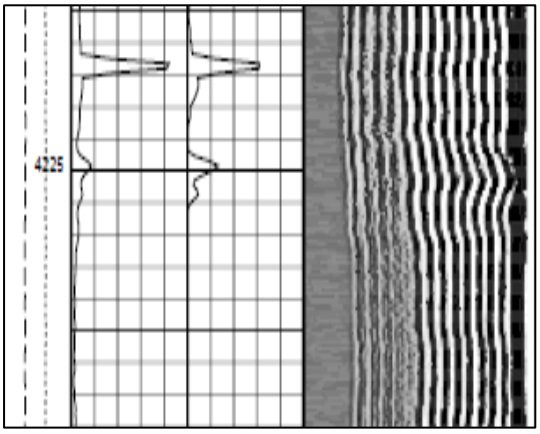



**شکل۸. تغییرات تنش در عمق ۴۱۰۰ متری (نمودار سبز)، عمق ۴۲۲۵ متری (نمودار قرمز) و عمق ۴۲۷۵ متری (نمودار آبی)**

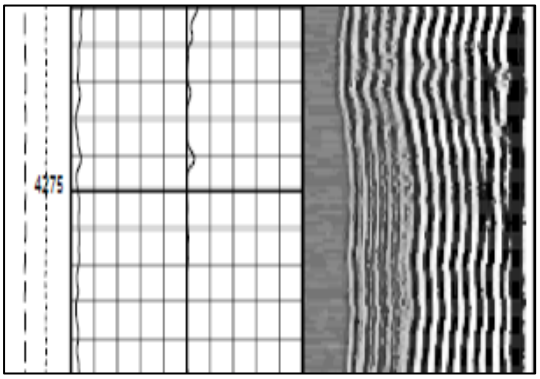
لاگ‌های سنجش سیمان چاه مدنظر در ترازهای مورد مطالعه در اشکال ۹ تا ۱۳ نمایش داده شده است. بررسی و صحت سنجی نتایج بدست آمده از مدل اجزا محدود بر اساس نگرش توامان هیدرومکانیک، با استفاده از نتایج لاگ‌های *CBL* و *VDL* که برای بررسی عملیات سیمان‌کاری گرفته می‌شود، در عمق‌های ۴۱۰۰ متری، ۴۲۲۵ متری، ۴۵۷۵ متری و ۴۶۲۵ متری انجام شد. این بررسی مشخص کرد بر اساس نمودارهای بدست آمده از *VDL*و *CBL*، دو تراز ۴۵۷۵ و ۴۶۲۵ متری دچار آسیب در یکپارچگی و ناحیه غلاف سیمانی می‌باشد. همچنین ترازهای ۴۱۰۰ متری، ۴۲۲۵ متری و ۴۲۷۵ متری، دارای آسیب قابل توجهی نمی‌باشد. بدین ترتیب ادعای صحت پاسخ‌های بدست آمده از مدل اجزا محدود با نگرش توامان هیدرومکانیک قابل تایید خواهد بود.



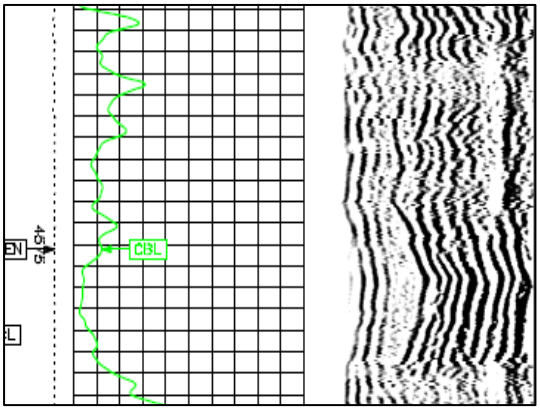

**شکل۹. نتایج لاگ‌های *VDL/CBL* در عمق ۴۱۰۰ متری**



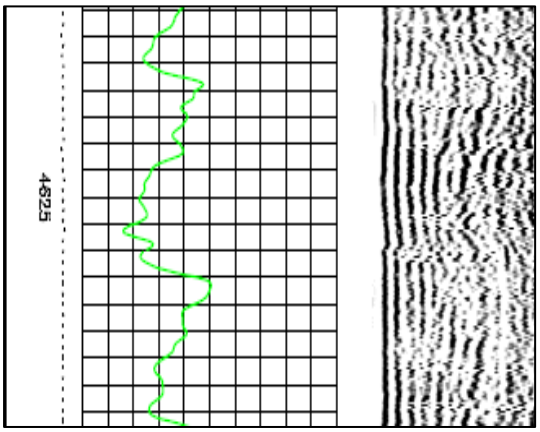

**شکل۱۰. نتایج لاگ‌های *VDL/CBL* در عمق ۴۲۲۵ متری**




**شکل۱۱. نتایج لاگ‌های *VDL/CBL* در عمق ۴۲۷۵ متری**




**شکل۱۲. نتایج لاگ‌های *VDL/CBL* در عمق ۴۵۷۵ متری**




**شکل۱۳. نتایج لاگ‌های *VDL/CBL* در عمق ۴۶۲۵ متری**

## ۵. نتیجه‌گیری

براساس بررسی صحت سنجی صورت گرفته، مدل اجزا محدود با نگرش توامان هیدرومکانیک در چاه مورد نظر در یکی از میادین جنوب غرب ایران، شباهت بسیار زیادی به محیط

واقعی داشته است. بررسی‌های صورت گرفته در ۵ تراز ۴۱۰۰ متری، ۴۲۲۵ متری، ۴۲۷۵ متری، ۴۵۷۵ متری و ۴۶۲۵ متری، تطابق نتایج مدل‌سازی انجام شده با مشاهدات اندازه‌گیری شده را تایید می‌کند. به استناد نتایج بدست آمده از مدل ژئومکانیکی اجزا محدود، تنش در ناحیه غلاف سیمانی در تراز ۴۵۷۵ متری، غلاف سیمانی تحت کشش ۹,۶۵۱ مگاپاسکالی قرار خواهد گرفت. همچنین در تراز ۴۶۲۵ متری، غلاف سیمانی تحت کشش، ۹,۷۳۹ مگاپاسکالی واقع شده است. مطابق رفتار بدست آمده از غلاف سیمانی تحت کشش در این ترازها پدیده شکست غلاف سیمانی قطعی است. به منظور صحت‌سنجی نتایج بدست آمده با مراجعه به عملیات ارزیابی چاه ۷، لاگ‌های *CBL* و *VDL* بدست آمده صحت ادعا را مشخص می‌کند و از خرابی سیمان در این ترازها خبر می‌دهد.

به استناد نتایج بدست آمده از مدل ژئومکانیکی اجزا محدود، تنش در ناحیه غلاف سیمانی در تراز ۴۱۰۰ متری، ۴۲۲۵ متری و ۴۲۷۵ متری، کمتر از ۰,۰۰۰۱ مگاپاسکال محاسبه شده و این مقدار تنش کششی خللی در عملکرد غلاف سیمانی وارد نخواهد کرد. بررسی صحت ادعا مدل با استفاده از لاگ‌های *CBL* و *VDL* صحت این ادعا را مشخص نمود.

باتوجه به اینکه ارزیابی عملیات سیمان‌کاری، عمدتا با استفاده از لاگ‌های *CBL* و *VDL*، انجام می‌پذیرد و هزینه بدست آوردن این اطلاعات بالا است، مدل‌های ژئومکانیکی اجزا محدود با نگرش توامان هیدرومکانیک، می‌تواند جایگزین مناسبی برای صرفه جویی در هزینه‌های ارزیابی عملیات سیمان‌کاری تلقی شوند.

آسیب غلاف سیمانی و ازبین رفتن یکپارچگی چاه علت اصلی افزایش تولید آب در یکی از چاهها بود که این ادعا با استفاده از نتایج بدست آمده از مدل ژئومکانیکی اجزا محدود با نگرش توامان هیدرومکانیک و تایید آسیب دیدن غلاف سیمانی در دو تراز ۴۵۷۵ متری و ۴۶۲۵ متری به اثبات رسید.

## ۷. مراجع

[1] Bell, J.s., *Practical methods for estimating in situ stresses for borehole stability applications in sedimentary basins.* Journal of petroleum science and engineering, 2003(38): p. 111-119.

[2] Benjamin L.W, *Investigation of Cased Wellbore Integrity in the Wabamun*. 2014, Missouri University.

[3] Le Roy-Delage, S., et al., *New Cement Systems for Durable Zonal Isolation.* Society of Petroleum Engineers, 2000.

[4] Alexandre Lavrov and M. Torsæter, *Physics and Mechanics of Primary Well Cementing*, in *SpringerBriefs in Petroleum Geoscience & Engineering*. 2016.

[5] (MMS), M.M.S. *Annular Casing Pressure Management for Offshore Wells*. Federal Register 2010; Available from: https://www.federalregister.gov/documents/2010/05/04/2010-10291/annular-casing-pressure-management-for-offshore-wells.

[6] Gray, K.E., E. Podnos, and E. Becker, *Finite-Element Studies of Near-Wellbore Region During Cementing Operations: Part I.* SPE Drilling & Completion, 2009. **24**(01): p. 127-136.

[7] Bois, A.-P., et al., *Use of a Mechanistic Modello Forecast Cement-Sheath Integrity.* Society of Petroleum Engineers, 2012.

[8] Fourmaintraux, D., et al. *Efficient Wellbore Cement Sheath Design Using the SRC (System Response Curve) Method*. in *SPE Europec/EAGE Annual Conference*. 2005.

[9] Talebian, S.H. and A .Beglari, *Application of production data-driven diagnostics workflow for water shut-off candidate selection in tight carbonate field.* SN Applied Sciences, 2019. **1**(12): p. 1723.