



مدل سازی عددی تأثیر پارامترهای ژئومکانیکی سازندهای نمکی بر گسیختگی لوله جداری چاه های نفتی

مهدي باجولوند^{۱*}؛ احمد رمضان زاده^۲

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، تونل و فضاهای زیرزمینی، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود
۲. استادیار؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۰۹ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۰۳

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/JPG.2018.104127.1046

چکیده

امروزه استفاده از روش های عددی در برآوردهای مهندسی با وجود تمام محدودیت ها و پیچیدگی های این روش به دلیل ارائه پاسخ های کلی و سریع از شرایط مسئله مورد توجه قرار گرفته است. همچنین نیاز به پیش بینی رفتار بلند مدت یک سازه با در نظر گرفتن شرایط مختلف حاکم بر مسئله، استفاده از روش های عددی را ضرورت بخشیده است. رفتار خزشی نمک به عنوان یک رفتار وابسته به زمان همواره باعث بروز مشکلاتی همچون برش و مچالگی لوله های جداری چاه های نفتی شده است. با توجه به نقش سازندهای نمکی میادین نفتی در ایجاد تله های نفتی، بررسی رفتار بلند مدت این سازندها و میزان تأثیر جریان یافتگی ناشی از رفتار خزشی آن بر پایداری چاه از اهمیت بالایی برخوردار است. علاوه بر زمان، عوامل ژئومکانیکی متعدد در رفتار خزشی سازندهای نمکی تأثیر گذارند. در این پژوهش، با استفاده از نرم افزار تفاضل محدود *FLAC3D* مدل سازی عددی تأثیر پارامترهای ضخامت لایه نمک، شرایط توزیع تنش برجا و خصوصیات مقاومتی سنگ نمک پیرامون یک چاه نفتی واقع در میدان نفتی کوپال بر روی مچالگی و برش لوله جداری انجام شده است. بر اساس نتایج آزمون آزمایشگاهی خزش تک محوری انجام شده بر روی یک نمونه نمک برداشت شده از این میدان مدل رفتاری خزش برگر برای مدل سازی سازند نمکی استفاده شده است. بر اساس نتایج، در میان پارامترهای ژئومکانیکی مطالعه شده، شرایط توزیع تنش برجا سهم عمده ای در شدت رفتار خزشی سازند نمکی داشته است. تأثیر ضخامت لایه نمک در میزان آسیب وارد بر لوله ناچیز است. علاوه بر این مطالعه رفتار نمک با مدول الاستیک مختلف این پارامتر را به عنوان عاملی مهم در بروز گسیختگی لوله های جداری معرفی کرده است. همچنین بخش هایی از لوله جداری که در مجاورت فصل مشترک لایه نمکی با لایه های دیگر قرار دارد به عنوان یک محدوده مستعد بروز آسیب تعیین شده است.

واژگان کلیدی

مدل سازی عددی، پایداری
چاه نفت، لوله جداری،
رفتار خزشی نمک، نرم
فزار *FLAC3D*

۱. پیش گفتار

امروزه نیاز به در نظر گرفتن زمان در تحلیل های مهندسی رو به افزایش است. خزش نیز به عنوان یک رفتار وابسته به زمان در تحلیل و بررسی پدیده های زمین ساختاری و همچنین پیش بینی پایداری بلند مدت در مهندسی مکانیک سنگ مورد توجه قرار گرفته است. تغییر شکل های وابسته به زمان همواره می توانند پایداری فضاهای زیرزمینی مانند تونل، مغار و چاه را به تدریج و طی سال های زیاد پس از احداث سازه تهدید کنند.

چاه های نفتی به عنوان یکی از مهم ترین سازه های زیرزمینی هر کشوری همواره در معرض این تهدید قرار دارند که علت آن وجود سنگ های رسوبی مستعد رفتارهای وابسته به زمان در مناطق نفت خیز است. هزینه های بالای حفاری و از دست رفتن بخش عمده ای از ذخایر با متروک شدن چاه های تولیدی، لزوم پایداری بلندمدت چاه های نفتی را بیش از پیش آشکار می کند. در سال های گذشته تلاش های متعددی به منظور ارائه مدل های پیش بینی رفتار سنگ های دارای خاصیت تغییر شکل وابسته به زمان صورت گرفته است. در

نتایج حاصل از این پژوهش بیان‌کننده تأثیرپذیری رفتار خزشی از تنش‌های تفاضلی و محصورکننده است (Zhang *et al.*, 2015). جانگ^۵ و همکاران با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی مغزه‌های به دست آمده از یک میدان نفتی به بررسی رفتار خزشی نمونه‌ها پرداخته‌اند. در این مطالعه با استفاده از رگرسیون‌گیری نتایج، مقادیر مقاومت، مدول الاستیک، خواص ویسکوز سنگ و ثابت خزش و نیز معادلات رفتار مواد تعیین شده است (Jang *et al.*, 2014). هامپل^۶ و همکاران با انجام آزمایش‌هایی بر روی دو گروه اصلی مغزه‌های نمک خالص و نمک دارای درصدی رس، برداشت شده از یک سایت دفن زباله‌های اتمی به بررسی خواص ترمومکانیکی سنگ نمک پرداخته‌اند. نتایج این مطالعه حاکی از تأثیر دما بر مقاومت تراکمی تک محوره نمونه‌ها است، به این ترتیب که با افزایش دما مقاومت کم شده است. همچنین مقاومت نمونه‌ها تابع نرخ تغییر شکل آن است. محققان این پژوهش همچنین با انجام آزمون‌های خزشی بر روی مغزه‌های نمک خالص دریافتند که رفتار این نمک در تنش‌های کمتر از ۱۰ مگاپاسکال از مدل ساده توانی پیروی می‌کند (Hampel *et al.*, 2015).

با انجام آزمون خزش بلند مدت ۳۰ ماهه بر روی تعداد زیادی از نمونه‌های سنگ نمک در ایسلند، برست^۷ و همکاران رفتار خزشی نمک را مورد بررسی قرار دادند. به منظور کنترل دمای محیط و ثابت نگه داشتن آن در طول مدت آزمایش‌ها، محل آزمون در داخل گالری نمک استخراج شده در نظر گرفته شده است. بارگذاری نمونه‌ها تحت بار ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ مگاپاسکال انجام شده است. نتایج این تحقیق در مرحله خزش پایا، نرخ کرنش بیشتر نمونه‌ها را نسبت به مقدار مورد انتظار برای بارهای محوری بزرگ‌تر نشان می‌دهد. این امر وابستگی نرخ کرنش را به میزان بار محوری تأیید می‌کند (Berest *et al.*, 2015). زارعیان‌جهرمی اثر خزش لایه‌های نمک را در بروز گسیختگی لوله‌های جداری در مغاره‌های نمکی با استفاده از نرم‌افزار *FLAC2D* بررسی کرده است. در این مطالعه تأثیر

این مطالعات، سنگ نمک به عنوان ماده‌ای با رفتار ویسکوالاستیک خزشی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده است. بطور کلی این مطالعات را می‌توان به دو دسته مطالعات آزمایشگاهی و استفاده از روش‌های عددی تقسیم کرد. کارتر^۱ طی آزمایشاتی به بررسی اثر دما بر نرخ کرنش پرداخته است. بر اساس نتایج این تحقیق، خواص وابسته به زمان سنگ‌ها به شدت به دما هم بستگی دارد (Carter *et al.*, 1993). یلگ^۲ و همکاران با انجام تعداد زیادی آزمون خزش تک محوره و سه محوره و بررسی نقش فشارهای محصورکننده و محوری بر نرخ کرنش انواع مختلف سنگ‌های رسوبی، تابعی برای مدل‌سازی خزش از مرحله خزش انتقالی به خزش پایا ارائه کردند (Yang *et al.*, 1999). رحیمی و حسینی نقش فشار محصورکننده و تنش تفاضلی را بر روی رفتار خزش و سرعت کرنش سنگ نمک بررسی کردند و دریافتند که با افزایش خطی فشار محصورکننده نرخ کرنش به صورت غیر خطی کاهش می‌یابد. همچنین با بررسی تأثیر فشار محصورکننده و تنش تفاضلی رابطه‌ای برای سرعت کرنش به دست آوردند (Rahimi and Hosseini, 2014).

در مطالعات متعددی بر روی سنگ نمک، اثر دما، تنش تفاضلی و فشار محصورکننده بر مرحله کرنش ثانویه نمک مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس این نتایج، با افزایش تنش تفاضلی و دما مدت مرحله خزش ثانویه کمتر می‌شود. همچنین نقش تنش‌های محصورکننده در افزایش مدت خزش ثانویه مشخص شده است (Gunther *et al.*, 2015). ماسینی^۳ و همکاران با بررسی مدل‌های مختلف دریافتند که مدل برگر از آن جهت که ترکیبی از مدل کلونین و مدل ماکسول است، برای مدل‌سازی بارگذاری لوله‌های جداری ناشی از رفتار ویسکوپلاستیک سازند نمکی بهترین گزینه محسوب می‌شود (Macini *et al.*, 2006). ژانگ^۴ و همکاران با استفاده از آزمون خزش سه محوره بر روی مغزه‌های سنگ-های کلاستیک برداشت شده از پی سد یک نیروگاه برق-آبی در کشور چین رفتار خزشی این سنگ‌ها را ارزیابی کرده‌اند.

¹ Carter

² Yang

³ Macini

⁴ Zhang

⁵ Jang

⁶ Hampel

⁷ Berest

دما، جنس نمک، اندازه قطر چاه، سیال حفاری بر همگرایی دیواره چاه مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان نتیجه نهایی، ارائه مدل لوله‌های دوجداره به عنوان مؤثرترین راهکار بیان شده است (Zareiyanjahromi, 2009). امیرشیرزاد با استفاده از نرم‌افزار *FLAC2D*، رفتار خزشی سنگ نمک میدان نفتی مارون را در تماس با لوله‌های جداری چاه شبیه‌سازی کرده است. نتایج این مطالعه قدرت جریان لایه-های نمک در بروز مچالگی و گسیختگی لوله‌های جداری را نشان داده است. همچنین در این پژوهش استفاده از لوله‌های دو جداره به منظور کنترل گسیختگی پیشنهاد شده است (Amirshirzad, 2011). محبی و جلالی فر مدل سازی از چاه در مجاورت قسمت نمکی از سازند گچساران با نرم‌افزار *ABAQUS* انجام داده‌اند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داده است که عدم سیمان کاری فضای خالی بین سازند نمکی و لوله جداری باعث توزیع یکنواخت تنش‌های بر سطح خارجی لوله جداری و کاهش نرخ کرنش آن در بلند مدت شده است (Mohebbi and Jalalifar, 2015).

قدوسی بروجنی در مطالعه خود با استفاده از نرم‌افزار *ABAQUS* به بررسی بارگذاری خارجی ناشی از خزش لایه-های نمک بر لوله‌های جداری و در نهایت مچالگی آن پرداخته است. کاهش مقاومت مچالگی لوله جداری ناشی از وجود نواقص ساختاری لوله، تأثیر نامحسوس دما بر رفتار خزشی نمک این میدان و پیشنهاد لوله جداری با گرید *L-80* با توجه به میزان تغییر شکل و در نظر گرفتن جنبه اقتصادی از قابل ذکرترین نتایج این مطالعه هستند (Ghodosiborujeni, 2016). در مطالعه‌ی میرالی و حسینی، ابتدا با نمونه‌گیری از عمق ۳۱۹۲ متری و انجام آزمون‌های آزمایشگاهی، مشخصات ژئومکانیکی نمک موجود در یکی از چاه‌های میدان نفتی کوپال به دست آمده است. سپس با استفاده از نتایج آزمون خزش تک محوره مقادیر پارامترهای مدل برگر تعیین و مدل سازی عددی رفتار خزشی لایه‌های نمک پیرامون این چاه انجام شده است. در این پژوهش مدل سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار *FLAC2D* و در شرایط تنش همسانگرد ۸۱/۳۹ مگاپاسکال انجام شده است. نتایج این مطالعه بیان کننده

عدم آسیب جدی وارد بر لوله جداری تحت تأثیر لایه نمک است (Miral and Hosseini, 2016). لائو^۸ و همکاران با هدف ارزیابی میزان آسیب وارد بر لوله جداری مجاور لایه نمکی، به مدل سازی یک چاه جهت دار میدان نفتی در خلیج مکزیک با نرم‌افزار *FLAC3D* در شرایط تنش و دمای بالا با حضور لایه نمک پرداخته و با بررسی نتایج مدل سازی، این روش را به عنوان یک روش کم هزینه و سریع در ارزیابی آسیب لوله‌های جداری ارائه داده‌اند (Lao et al., 2012). وانگ^۹ و همکاران با روش المان محدود و نرم‌افزار *ABAQUS* به طور مفهومی اثر دما و نقش تنش تفاضلی در آسیب وارد بر لوله جداری ناشی از رفتار خزشی سازند نمکی را مورد بررسی قرار دارند. در این پژوهش با هدف نمایش اثر تغییر شکل‌های قائم ناشی از وزن روباره، مقایسه‌ای بین نتایج مدل سازی در دو بعد و سه بعد صورت گرفته است. نتایج این مطالعه به خوبی غیر واقعی بودن نتایج مدل‌های دو بعدی ناشی از در نظر نگرفتن پارامترهای اساسی مؤثر در نرخ کرنش سازند نمکی نشان داده است. مقادیر تنش وارد بر لوله جداری در زمان یکسان در مدل دوبعدی تقریباً نصف تنش برآورد شده مدل سه بعدی است. این امر در سازندهای پرفشاری-می تواند بسیار بحرانی باشد (Wang et al., 2016). بنابراین در مطالعات آزمایشگاهی، می‌توان زمان آزمایش‌ها را به عنوان بزرگ‌ترین محدودیت به شمار آورد.

هزینه بر بودن آزمون‌های طولانی مدت، سختی نمونه‌گیری و برقراری شرایط مرزی در آزمایشگاه نیز عواملی هستند که مطالعات آزمایشگاهی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در مطالعات عددی دوبعدی نمی‌توان نقش مهم تنش‌های تفاضلی در نرخ کرنش سازندهای نمکی که در بسیاری از مطالعات آزمایشگاهی به اثبات رسیده است را در نظر گرفت. عدم در نظر گرفتن این پارامتر، مقدار تنش وارد بر لوله جداری را بسیار پایین‌تر از واقعیت ارزیابی می‌کند، این در حالی است که در سازندهای پرفشاری مانند سازند گچساران، چنین خطایی می‌تواند منجر به از دست رفتن چاه شود. در مطالعات سه بعدی صورت گرفته نیز، تمام طول چاه در لایه نمک فرض شده است که در اینصورت امکان بررسی آسیب لوله‌های جداری در فصل مشترک لایه نمک و سایر لایه‌های سنگی و

^۸ Lao

^۹ Wang

در این روابط σ و ε به ترتیب تنش تفاضلی و کرنش کلی سنگ است؛ σ_M ، ε_M و $\dot{\varepsilon}_{M2}$ به ترتیب تنش تفاضلی، کرنش و نرخ کرنش بخش ماکسول هستند؛ σ_K ، ε_K و $\dot{\varepsilon}_{K2}$ به ترتیب تنش تفاضلی، کرنش و نرخ کرنش بخش کلویین هستند. E_M و η_M مدول الاستیک و ضریب ویسکوزیته بخش ماکسول؛ و E_K و η_K مدول الاستیک و ضریب ویسکوزیته بخش کلویین است. با حل این معادلات، میزان کرنش ε ناشی از تنش σ به صورت رابطه (۲) حاصل میشود؛

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_M} + \left(\frac{\sigma}{\eta_M}\right)t + \frac{\sigma}{E_K} \left(1 - e^{-\frac{E_K t}{\eta_K}}\right) \quad (2)$$

این مدل رفتاری برای مدل‌سازی موادی که تحت تنش‌های نرمال و برشی در طول زمان دچار تغییر شکل می‌شوند مناسب است.

۳. مدل‌سازی عددی

۱.۳ هندسه سازند و تعیین خواص مواد

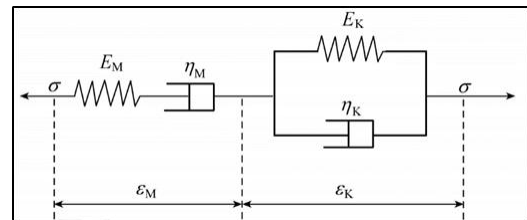
مدل سه بعدی با خصوصیات مواد و شرایطی مشابه پژوهش (Mirali and Hosseini, 2016) به عنوان مدل مرجع برای اعتبارسنجی نتایج مدل‌سازی در نظر گرفته شده است. به دلیل تقارن حاکم بر حل مسئله نیمی از مدل ساخته شده است. این کار باعث افزایش سرعت حل مسئله و در نتیجه کاهش تعداد المان‌ها می‌شود. به منظور کاهش اثرات مرزی، فاصله مرکز چاه تا نزدیک‌ترین مرز ۱۰ برابر قطر چاه و ابعاد نهایی مدل $50 \times 3 \times 6$ متر مطابق شکل ۲ در نظر گرفته شده است. همچنین مرزهای جابجایی و تنشی در نظر گرفته شده در مدل در شکل ۲-الف ارائه شده است.

با هدف بررسی برش لوله جداری در فصل مشترک لایه نمک با سازندهای مجاور، یک میان لایه‌ی نمکی با ضخامت ۲۰ متر بین دو لایه با خواص الاستیک با ضخامت ۱۵ متری تعیین شده است. نسبت ابعاد زون‌ها در راستای X و Y به اندازه مدل 0.6 و در راستای Z نیز 0.5 در نظر گرفته شده است. به این ترتیب تعداد زون‌های مدل 5000 عدد می‌باشد. خصوصیات بخش الاستیک سازند پیرامون چاه مدل‌سازی شده در این پژوهش مطابق خصوصیات مکانیکی لایه شیلی است که در مطالعه (Wang and Samuel, 2016) بیان شده و در بخش دوم جدول ۱ ارائه شده است.

همچنین اثر ضخامت و یا توالی لایه‌ها وجود ندارد. در این پژوهش با رویکردی جدید به مسئله خزش و بررسی تأثیر این رفتار وابسته به زمان بر روی تغییر شکل‌های لوله جداری چاه نفت با مدل‌سازی سه بعدی سازند دربرگیرنده چاه مورد نظر پرداخته شده است. با توجه به اهمیت میدان نفتی کوپال به دلیل حضور سازند پرفشار گچسازان در کشورمان و ضرورت ارزیابی میزان آسیب ناشی از رفتارهای وابسته به زمان سازندهای شکل‌پذیر به لوله‌های جداری و همچنین محدودیت دسترسی به داده‌های مورد نیاز مانند خصوصیات ژئومکانیکی سازند، شرایط تنش برجا و چینه شناسی سازند پیرامون چاه، از مطالعه میرالی و حسینی برای دستیابی به یک مدل مرجع استفاده شده است.

۲. انتخاب مدل رفتاری برای سازند نمکی

در این پژوهش از مدل رفتاری خزشی برگرز برای مدل‌سازی رفتار سازند نمکی استفاده شده است. این مدل رفتاری ویسکوالاستیک ترکیبی از مدل ماکسول و کلویین است. اجزای این مدل رفتاری در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. مدل رفتاری برگرز (Itasca Consulting group, 2014)

معادلات حاکم بر مدل رفتاری برگرز مطابق روابط (۱-۱) تا (۵-۱) است (Itasca Consulting group, 2014)

$$\sigma_M = E_M \cdot \varepsilon_{M1} = \eta_M \cdot \dot{\varepsilon}_{M2} \quad (1-1)$$

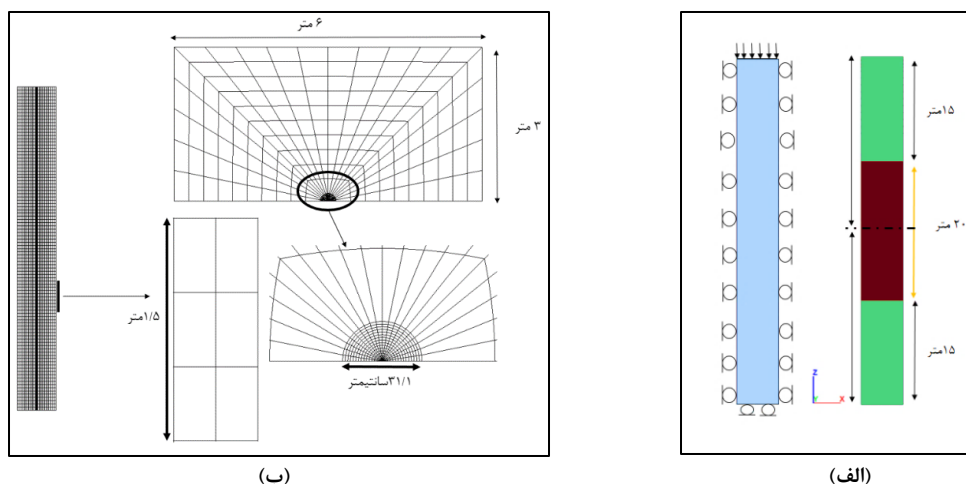
$$\sigma_K = E_K \cdot \varepsilon_{K1} = \eta_K \cdot \dot{\varepsilon}_{K2} \quad (2-1)$$

$$\sigma = \sigma_M = \sigma_K \quad (3-1)$$

$$\varepsilon_M = \varepsilon_{M1} = \varepsilon_{M2} \quad (4-1)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_M = \varepsilon_K \quad (5-1)$$

مدل سازی عددی تأثیر پارامترهای ژئومکانیکی بر گسیختگی لوله جداری چاه‌های نفتی مجاور سازندهای نمکی



شکل ۲. مدل سه بعدی (الف) لایه بندی و مرزهای مدل (ب) شبکه مش بندی

جدول ۱. پارامترهای مدل رفتاری لایه‌های مختلف

(Mirali and Hosseini, 2016)

اندازه	واحد	پارامتر	جنس لایه
۱۰٫۴۶	MPa	مدول بالک	نمک
۱۲۴٫۷۱	MPa	مدول برشی ماکسول	(با رفتار خزشی برگرز)
۵۱۶	MPa	مدول برشی کلوین	
$۱٫۱ \times ۱۰^{۱۵}$	Pa.sec	ویسکوزیته ماکسول	
$۱٫۱۲ \times ۱۰^{۱۴}$	Pa.sec	ویسکوزیته کلوین	
۲۵۵۰	Kg/m ³	وزن مخصوص	
۶٫۲۵	MPa	مدول بالک*	شیل
۱٫۳۴	MPa	مدول برشی*	(با رفتار الاستیک)
۲۵۵۰	Kg/m ³	وزن مخصوص	

(Wang and Samuel, 2016)*

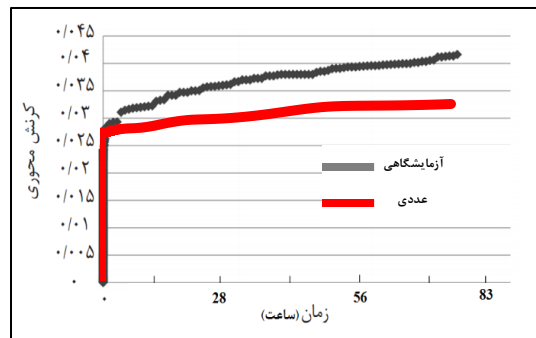
۳.۳ مدل سازی حفاری چاه

پس از برقراری شرایط و تعادل اولیه در مدل، مدل سازی عملیات حفاری انجام شده است. با توجه به لزوم مدل سازی در شرایطی نزدیک به واقعیت، رعایت برنامه زمانی شامل مدت زمان حفر ۵۰ متر چاه در عمق ۳۱۹۲ متری که به نرخ حفاری وابسته است و همچنین مدت زمان نگهداری چاه با گل حفاری از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مدل سازی نرخ حفاری برای حفر چاهی با قطر ۳۱٫۱ سانتی متر در عمق مورد نظر ۴ متر در ساعت در نظر گرفته شده است.

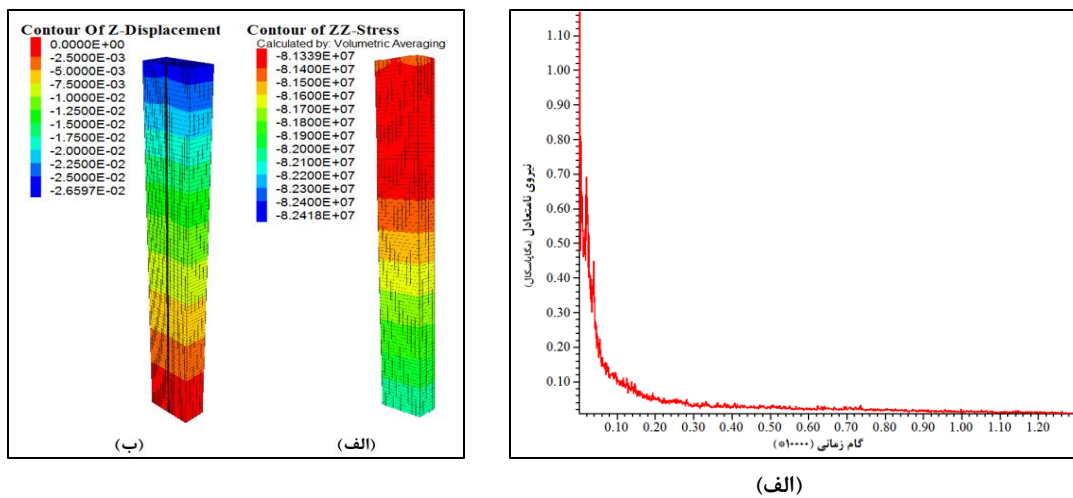
همچنین در این مدل برای مدل سازی رفتار وابسته به زمان لایه نمک از رفتار خزشی برگرز نرم افزار *FLAC3D* استفاده شده است. مقادیر پارامترهای لایه نمکی با مدل خزشی برگرز به کار رفته در این پژوهش بر اساس آزمایش‌های انجام شده بر روی مغزه‌های برداشت شده از میدان نفتی کوپال و سازند گچساران در جدول ۱ ارائه شده است. مدل سازی آزمون خزش تک محوره با هدف مقایسه نتایج مدل عددی و مدل آزمایشگاهی انجام شده است (شکل ۳). آزمون آزمایشگاهی خزش تک محوره در شرایط دمایی ۹۰ درجه سانتی گراد و بر روی نمونه استوانه‌ای با ارتفاع ۸۰ میلی متر و قطر ۷۳ میلی متر تحت بار محوری ۱۰ مگاپاسکال و به مدت حدود ۳/۵ روز انجام شده است. نکته قابل ذکر، سطح پایین تر نمودار حاصل از آزمون عددی است. علت این اختلاف در نظر نگرفتن دما به دلیل عدم دسترسی به پارامترهای حرارتی و نیز افزایش زمان حل مسئله در مدل سازی عددی است.

۲.۳ برقراری شرایط و تعادل اولیه

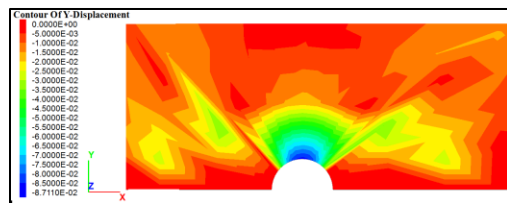
برقراری شرایط اولیه شامل اعمال تنش‌های برجا محیط مورد مطالعه در مدل است. در این پژوهش از شرایط تنش برجا میدان نفتی کوپال در عمق ۳۱۹۲ متری به مقدار ۸۱/۳۹۶ مگاپاسکال و توزیع تنش همسانگرد استفاده شده است. در شکل ۴ نمودار نیروی نامتعادل و میزان تنش قائم برقرار شده در مدل ارائه شده است.



شکل ۳. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی خزش تک محوره



شکل ۴. برقراری شرایط و تعادل اولیه الف) نمودار نیروی نامتعادل ب) کنتور تنش و جابه‌جایی قائم مدل



شکل ۵. همگرایی دیواره چاه در مرکز مدل پس از حفاری و عدم اعمال فشار سیال حفاری

همچنین ۱۵ روز فاصله بین عملیات حفاری و شروع عملیات تکمیل چاه فرض شده است. با هدف بررسی ضرورت اعمال فشار گل در این مدت و همچنین معرفی لایه نمکی به عنوان یک عامل تهدید کننده در همگرایی چاه مدل‌سازی در دو حالت بدون حضور گل و با حضور گل پس از حفاری انجام شده است.

۳.۳.۱ حفاری چاه بدون حضور سیال حفاری

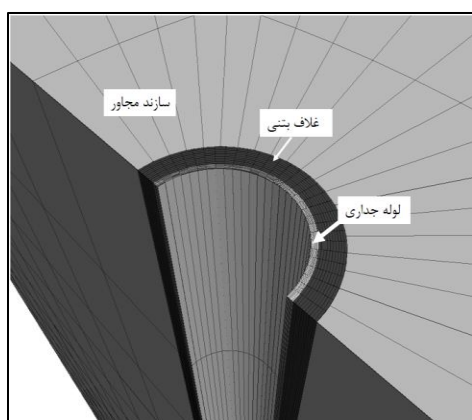
در گام نخست به منظور بیان ضرورت اعمال فشار گل به دیواره چاه، میزان همگرایی دیواره چاه بدون در نظر گرفتن فشار سیال حفاری در شکل ۵ نشان داده شده است. در این حالت جریان لایه نمک باعث از دست رفتن حدود ۵۵ درصد قطر چاه (در مرکز مدل) شده است در صورتی که دیواره چاه برای مدت ۱۵ روز پس از حفاری بدون نگهداری باقی بماند.

این میزان همگرایی مانع از لوله‌گذاری و ادامه عملیات تکمیل چاه خواهد شد. بنابراین، استفاده از سیال حفاری در این شرایط ضرورت دارد.

۳.۳.۲ حفاری چاه با در نظر گرفتن سیال حفاری

نگهداری دیواره چاه با فشار گل ۷۶/۵ مگاپاسکال ناشی از گل حفاری با وزن ۲۰ PPG طبق شرایط واقعی در نظر گرفته

حفاری به اندازه فشار گل موجود در محیط در نظر گرفته می شود. به این ترتیب سازند و لوله طی عملیات تزریق تا سفت شدن سیمان که زمانی بین ۴ تا ۵ ساعت طول می کشد، تحت فشار دوغاب به اندازه ۷۶/۵ مگاپاسکال قرار می گیرند. قطر بیرونی لوله جداری ۹/۶۲۵ اینچ و قطر داخلی لوله ۸/۹۲ اینچ است. خصوصیات و مدل رفتاری در نظر گرفته شده برای لوله جداری و سیمان اطراف آن در جدول ۳ ارائه شده است. هندسه مدل پس از نصب لوله جداری و غلاف بتنی اطراف آن نیز در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷. هندسه مدل چاه پس از نصب لوله جداری و غلاف بتنی

جدول ۲. خصوصیات مقاومتی سیمان و لوله جداری (Mirali and Hosseini, 2016)

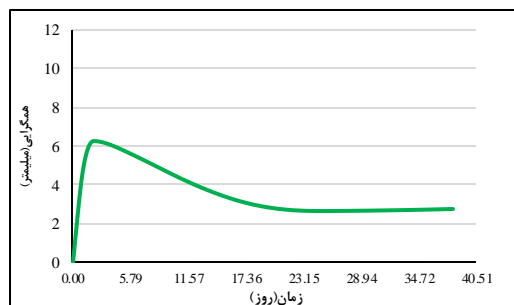
پارامتر	واحد	اندازه
مدول بالک	GPa	لوله جداری: ۱۵۵ سیمان کاری: ۱۲/۸
مدول برشی	MPa	۷۷/۸
زاویه اصطکاک	MPa	۳۰
چسبندگی	Pa.sec	۱۲/۴
مقاومت تسلیم	Pa.sec	۸۶۰
وزن مخصوص	Kg/m ³	۷۸۶۳

۴. مقایسه نتایج مدل دو بعدی و سه بعدی

پس از اتمام روند مدل سازی، حل نهایی به منظور بررسی پایداری چاه، تغییر شکل و تنش های ایجاد شده بر لوله جداری ناشی از رفتار وابسته به زمان نمک صورت گرفته است.

شده است (Mirali and Hosseini, 2016). در شکل ۶ میزان همگرایی دهانه چاه در بخش نمکی پس از دوره نگهداری با گل ارائه شده است. بر اساس نتایج حاصل از قطرسنجی این چاه پس از اعمال فشار گل در عمق ۳۱۹۲ متری کاهش قطر به اندازه ۵ میلی متر گزارش شده است که با همگرایی قطر چاه در مدل عددی کنونی که بین ۳/۶ تا ۶ میلی متر در سرتاسر حفاری به ازای فشار ۷۶/۵ مگاپاسکال است، مطابقت خوبی نشان می دهد.

با هدف واقعی سازی عملیات در مرحله حفاری، ابتدا فشار در دیواره ها به ۷۶ مگاپاسکال کاهش یافته و پس از ۱۲ و نیم ساعت فشار گل از ۷۶ مگاپاسکال به مقدار ۷۶/۵ مگاپاسکال افزایش پیدا کرده است. افزایش ۰/۵ مگاپاسکالی برای در نظر گرفتن ستون کامل گل باعث جابجایی معکوس (حدود ۱ میلی متر) در دیواره چاه شده است، شکل ۶. این مقدار فشار قادر است دیواره چاه را تا حدود ۴۰ روز نگهداری کند و پس از آن در بخش نمک همگرایی شدید موجب از دست رفتن چاه خواهد شد. بنابراین دوره زمینی ۱۵ روز برای شروع عملیات تکمیل چاه بسیار مناسب است.



شکل ۶. همگرایی دیواره چاه با حضور گل در مرکز مدل

۴.۳ مدل سازی عملیات تکمیل چاه

عملیات لوله گذاری پس از اطمینان حاصل کردن از مناسب بودن قطر چاه در سرتاسر حفاریه آغاز می شود. لوله جداری قرار داده شده در چاه تحت فشار گل و سپس تحت فشار تزریق سیمان قرار می گیرد. در این مدل سازی مرحله اعمال فشار دوغاب در فضای خالی بین لوله و سازند مدل سازی شده است. میزان فشار تزریق سیمان به منظور جایگزینی با گل

۵. بررسی اثر پارامترهای ژئومکانیکی بر تغییر

شکل‌های سطح لوله جداری

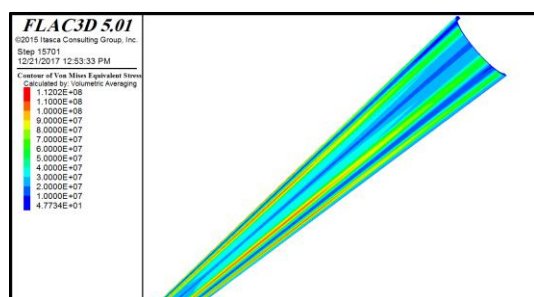
۱.۵ اثر ضخامت

با توجه به حضور سازندهای نمکی در شکل‌های مختلف لایه-ای و گنبد‌های نمکی در مناطق نفت‌خیز و نقش غیر قابل چشم‌پوشی این سازندها در ایجاد تله‌های نفتی، در نظر گرفتن ضخامت‌های مختلف با ویژگی‌های خزشی از اهمیت بالایی برخوردار است. در بخش اول این پژوهش، تنش و همگرایی سطح لوله جداری ناشی از خزش لایه افقی نمک با ضخامت ۲۰ متر مشخص و با مدل دوبعدی در شرایط مشابه، مقایسه شده است. یکی دیگر از محدودیت‌های بررسی این موضوع به صورت دوبعدی، عدم امکان در نظر گرفتن ضخامت لایه و نقش احتمالی آن در بروز آسیب به لوله جداری چاه نفت است. در این بخش از پژوهش تغییرات تنش و همگرایی لوله جداری در مجاورت ضخامت‌های مختلف میان لایه نمک مورد بررسی قرار گرفته است. میزان کرنش لوله جداری پس از ۴ سال در شکل ۱۰ ارائه شده است. همچنین تغییرات بیشینه تنش فون مایسز سطح لوله جداری به ازای ضخامت‌های مختلف لایه نمک طی ۴ سال در نمودار شکل ۱۱ نشان داده شده است. بر این اساس لایه‌های ضخیم‌تر سطح بالاتری از تنش را در مدت زمان کوتاهی به لوله جداری اعمال کرده‌اند. همچنین همگرایی بلند مدت مقادیر تنش به مقدار ۲۵ درصد مقاومت تسلیم آن نیز نشان دهنده مناسب بودن لوله موجود در چاه است.

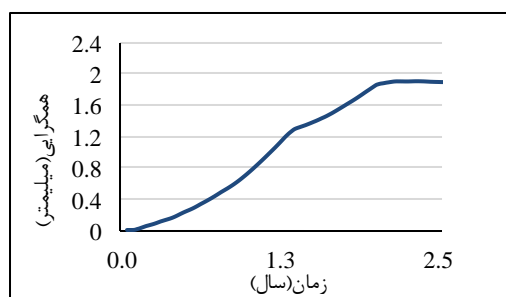
در این بخش با هدف بیان اهمیت تنش قائم مقایسه نتایج با مدل دوبعدی (Mirali and Hosseini, 2016) با شرایط یکسان انجام شده است. میزان کاهش قطر لوله جداری در مدل دوبعدی تحت تأثیر رفتار خزشی نمک با سیمان‌کاری فضای بین لوله و سازند پس از ۴۶۳ روز به اندازه ۰/۶ میلی-متر است.

در حالی که میزان کاهش قطر لوله جداری در مدل سه بعدی در مدت مشابه ۱/۱ میلی‌متر بوده است. نمودار همگرایی لوله در مدل سه بعدی، روند صعودی داشته و مطابق شکل ۸ پس از ۲ سال به ۱/۸ میلی‌متر همگرا شده است. از دیگر مقادیر قابل اهمیت در بررسی لوله جداری، مقدار تنش-های فون مایسز^{۱۰} است. بیشینه مقدار این تنش در مدل دوبعدی ۶۱ مگاپاسکال پس از ۴۶۳ روز برآورد شده است که حدود ۰/۶۱ بیشینه مقدار این تنش در مدل سه بعدی به اندازه ۱۰۰ مگاپاسکال است.

همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، مقدار تنش‌های فون مایسز در نزدیکی فصل مشترک لایه نمک و لایه الاستیک بالا و پایین آن به اندازه ۱۱۲ مگاپاسکال در مدت مشابه رسیده است که این اختلاف در سطح تنش وارد بر لوله به خوبی ضرورت مدل‌سازی با در نظر گرفتن رفتار لایه‌های مجاور لایه نمکی را نشان می‌دهد. مقدار بیشینه تنش فون مایسز بر روی لوله جداری در مدل سه بعدی تا زمان همگرایی ۱۷۲ مگاپاسکال بوده است.



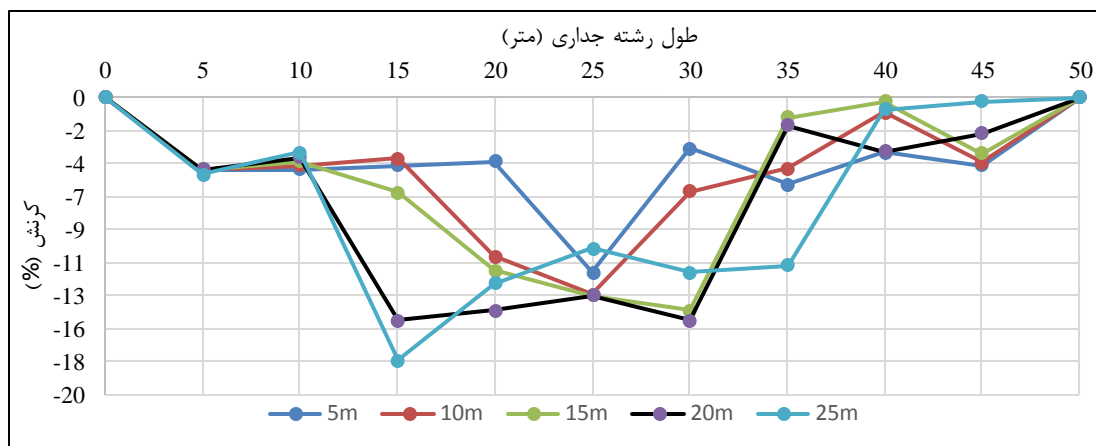
شکل ۹. کنترل بیشینه تنش فون مایسز روی لوله نزدیک فصل مشترک لایه نمک با لایه الاستیک بالایی



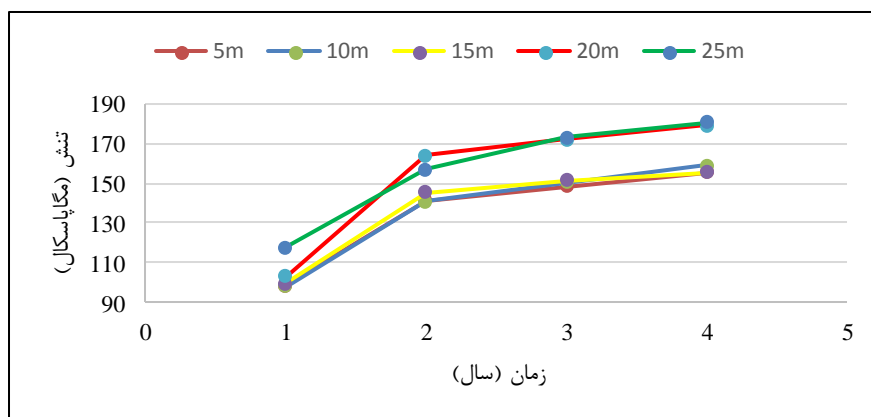
شکل ۸. نحوه همگرایی لوله جداری در مدل سه بعدی

^{۱۰} von Mises

مدل سازی عددی تأثیر پارامترهای ژئومکانیکی بر گسیختگی لوله جداری چاه‌های نفتی مجاور سازندهای نمکی



شکل ۱۰. کرنش سطح لوله جداری مجاور ضخامت‌های مختلف لایه نمک پس از ۴ سال



شکل ۱۱. تغییرات بیشینه تنش فون مایسز سطح لوله جداری به ازای ضخامت‌های مختلف لایه نمک طی ۴ سال

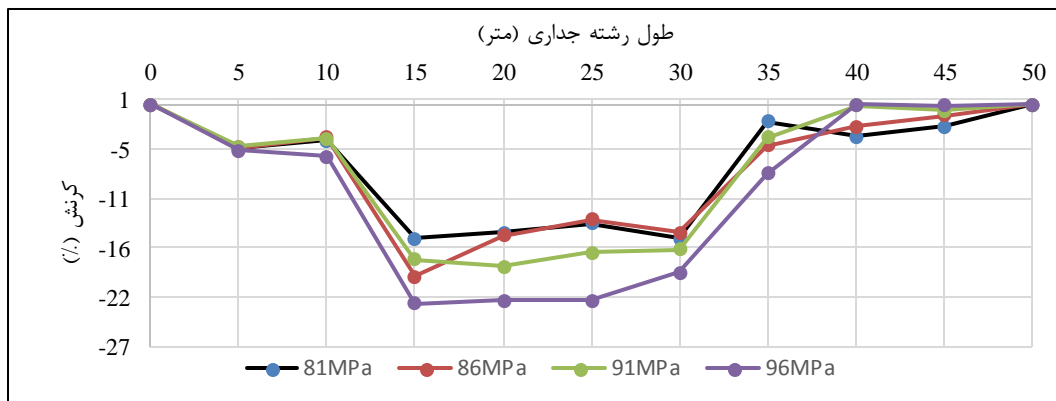
برجا در مدل سازند اعمال شده است. در نمودار شکل ۱۲ مقایسه کرنش سطح لوله تحت شرایط تنش مختلف با شرایط تنش مدل مرجع ارائه شده است. با افزایش سطح تنش مقادیر همگرایی لوله نیز افزایش یافته است. الگوی تغییر شکل‌ها در این شرایط توزیع تنش در تمام جهات مشابه بوده و شکل مجالگی لوله پدیده غالب‌تر نسبت به برش در محل فصل مشترک لایه‌ها است.

۲.۵ اثر شرایط تنش برجا

شرایط تنش برجا میدان نفتی در عمقی که سازند نمکی وجود دارد از جمله عواملی است که رفتار بلند مدت سنگ نمک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به منظور بررسی تأثیر این پارامتر مدل‌هایی با شرایط تنشی مختلف همسانگرد و ناهمسانگرد ساخته شده است.

۱.۲.۵ تنش‌های همسانگرد

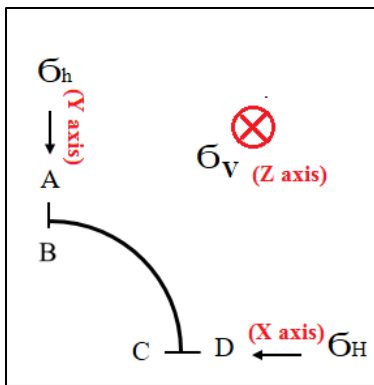
در این شرایط، سه سطح تنش ۸۵، ۹۱ و ۹۶ مگاپاسکال در سه راستای اصلی X ، Y و Z متناظر با جهت تنش‌های اصلی



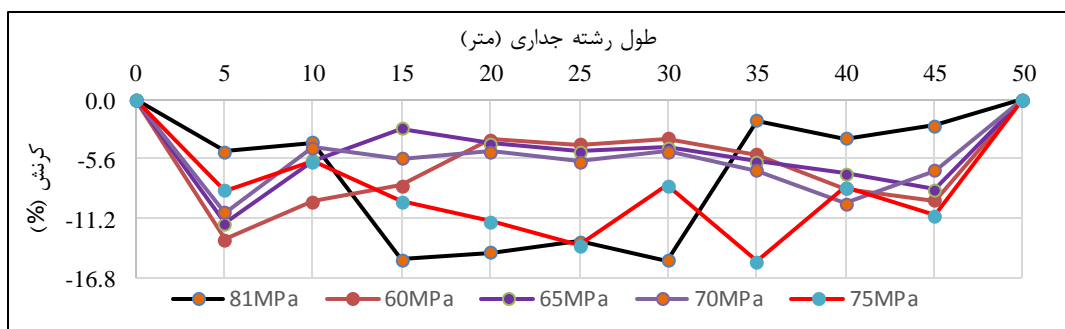
شکل ۱۲. کرنش لوله جداري در شرايط مختلف تنش‌هاي همسانگرد برجا پس از ۴ سال

۲.۲.۵ تنش‌هاي ناهمسانگرد

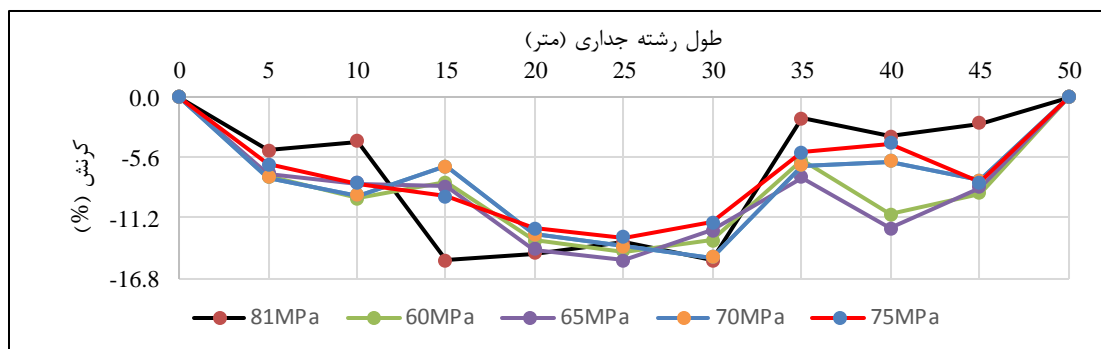
در اين بخش به منظور مدل‌سازي شرايط تنش ناهمسانگرد، مقدار تنش‌هاي قائم و افقي ماكزيمم كه به ترتيب در راستاي X و Z قرار دارند ۸۱ مگاپاسكال فرض شده و مقادير تنش افقي حداقل در راستاي Y برابر ۶۰، ۶۵، ۷۰ و ۷۵ مگاپاسكال در نظر گرفته شده است (شکل ۱۳). مقادير همگرایی لوله جداري در تمام حالت‌هاي تنش آنيزوتروپ در شکل ۱۴ و شکل ۱۵ ارائه شده است. تفاوت الگوي تغييرشکل‌هاي لوله متناسب با اختلاف تنش‌هاي حداقل و حداکثر قابل مشاهده است. در حالت وجود اختلاف زياد بين تنش‌هاي افقي، اختلاف کرنش در جهت تنش افقي حداکثر بيشتراز کرنش در جهت تنش افقي حداقل است.



شکل ۱۳. توزيع تنش‌هاي ناهمسانگرد اطراف چاه



شکل ۱۴. کرنش لوله جداري در جهت تنش برجا حداقل (A-B) پس از ۴ سال

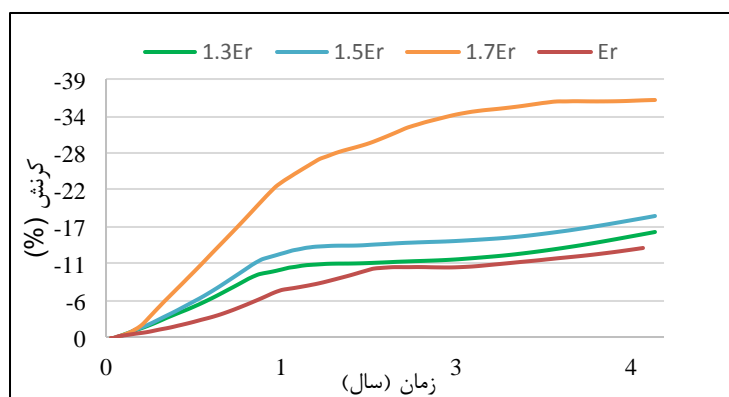


شکل ۱۵. همگرایی لوله جداری در جهت تنش برجا حداکثر (C-D) پس از ۴ سال

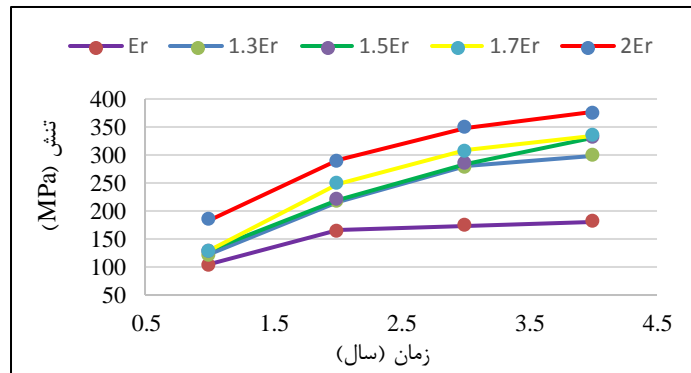
کرنش نشان دهنده وابستگی کرنش لوله جداری به نسبت مدول الاستیک نمک و مدول الاستیک سیمان (E_c) به کار رفته اطراف لوله جداری است. بنابراین هر چه سیمان صلبیت کمتری نسبت به نمک داشته باشد انتقال تنش از سازند به لوله بیشتر انجام شده و کرنش لوله بیشتر خواهد شد. در حالت اولیه نسبت (E_r/E_c) $0/8$ است. در ادامه با افزایش مدول الاستیک نمک این نسبت افزایش یافته و برای نسبت‌های $1/3$ ، $1/5$ و $1/7$ به ترتیب نسبت E_s/E_c برابر با $1/06$ ، $1/22$ و $1/3$ شده است. هر چه این نسبت (E_s/E_c) کمتر باشد میزان کرنش لوله جداری کمتر خواهد بود.

۳.۵ اثر خواص مکانیکی سنگ نمک

خصوصیات مقاومتی سنگ نمک نیز از عوامل تأثیرگذار بر رفتار وابسته به زمان آن است. در این مطالعه تغییر شکل و تنش‌های سطح لوله جداری با در نظر گرفتن مدول الاستیک-های مختلف بررسی شده است. با افزایش نسبت E_s/E_r که در آن مدول الاستیک هر مرحله و E_r مدول الاستیک معیار است، سنگ نمک در بلندمدت کرنش بیشتری در سطح لوله ایجاد کرده است (شکل ۱۶). همچنین سطح تنش اعمال شده بر لوله جداری در اثر رفتار خزشی سنگ نمک دارای مدول الاستیک بالاتر، بیشتر است (شکل ۱۷). این مقدار



شکل ۱۶. کرنش لوله جداری با نسبت‌های مختلف E_s/E_r نمک طی ۴ سال



شکل ۱۷. تنش‌های فون مایسز سطح لوله جداری با مدول الاستیک‌های مختلف نمک طی ۴ سال

برشی در لوله مشاهده نشده است. با افزایش ضخامت لایه نمک میزان تنش وارد بر لوله جداری و در نتیجه آن کرنش لوله افزایش یافته است. اختلاف کرنش لوله مجاور ضخامت‌های مختلف لایه نمک پس از چهار سال حدود ۲ درصد است که قابل توجه نمی‌باشد. مطالعه رفتار نمک با مدول الاستیک مختلف این پارامتر را به عنوان عاملی مهم در بروز گسیختگی لوله‌های جداری معرفی کرده است.

بر اساس نتایج با افزایش مدول الاستیک نرخ کرنش به شدت افزایش یافته است که به وضوح اهمیت خواص مقاومتی نمک موجود در سازند را در بروز رفتار خزشی و آسیب به لوله جداری نشان می‌دهد. بررسی بیشینه تنش‌های فون مایسز سطح لوله نیز این مقدار را در بحرانی‌ترین حالت‌ها مقدار ۳۸۰ مگاپاسکال که معادل ۴۴ درصد مقاومت گسیختگی لوله جداری به کار رفته در مدل‌سازی می‌باشد، نشان داده است. این مقدار تنش خارج از محدوده خطر برای گسیختگی لوله جداری است.

۶. نتیجه‌گیری

با توجه به لزوم اعتبار سنجی نتایج مدل‌سازی‌های عددی، نتایج این مدل‌سازی در مرحله حفاری چاه و نگهداری با گل با نتایج حاصل از قطرسنجی‌های برج‌چاه مقایسه شده است. سپس به منظور تعیین نقش پارامترهای ژئومکانیکی بر میزان آسیب وارد بر لوله جداری چاه‌های نفتی مجاور سازند نمکی پارامترهای شرایط تنش برج‌چاه، ضخامت لایه نمک و خصوصیات مقاومتی نمک مورد بررسی قرار گرفت. در میان پارامترهای ژئومکانیکی مطالعه شده، شرایط توزیع تنش برج‌چاه سهم عمده‌ای در شدت رفتار خزشی سازند نمکی داشته است. بیشینه کرنش سطح لوله به اندازه ۲۲ درصد ضخامت لوله جداری به ازای تنش همسانگرد ۹۶ مگاپاسکال رخ داده است که ۱/۵ برابر کرنش رخ داده به ازای تنش ۸۱ مگاپاسکال می‌باشد. این افزایش کرنش با افزایش سطح تنش بسیار قابل توجه است و می‌بایست در طراحی لوله‌های جداری در اعماق بالا که میزان فشار سازند بالاتری به لوله وارد می‌شود مدنظر قرار بگیرد. در شرایط تنش همسانگرد اغلب الگوی تغییر شکل‌های لوله جداری به صورت مچالگی رخ داده است و در مقاطع فصل مشترک هیچ‌گونه

۷. مراجع

- Amirshirzad, B. (2008). Numerical investigation of casing stability affected by creep behavior of salt formations in Maroon oilfield by using FLAC2D. Master's thesis, Shahid Bahonar University, Kerman.
- Bérest, P., Béraud, J. F., Gharbi, H., Brouard, B., & DeVries, K. (2015). A very slow creep test on an Avery Island salt sample. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48(6), 2591-2602.

- Carter, N. L., Horseman, S. T., Russell, J. E., and Handin, J. (1993). Rheology of rock salt. *Journal of Structural Geology*, 15(9-10), 1257-1271. [doi:10.1016/0191-8141(93)90168-A].
- Ghodosiborujeni, F. (2015). Numerical investigation of casing convergence under external force. Master's thesis, Shahid Bahonar University, Kerman.
- Gunther, R. M., Salzer, K., Popp, T., Ludeling, C. (2015). Steady-State Creep of Rock Salt: Improved Approaches for Lab Determination and Modelling. *Rock Mech Rock Eng*. DOI :10.1007/s00603-015-0839-2
- Hampel, A., Günther, R. M., Salzer, K., Minkley, W., Pudewills, A., Yildirim, S., ... & Herchen, K. (2015, May). Joint Project III on the comparison of constitutive models for the thermo-mechanical behavior of rock salt I—Overview and results from model calculations of healing of rock salt. In *Proceedings Conference on Mechanical Behavior of Salt, Saltmech VIII, South Dakota School of Mines and Technology, USA*.
- Lao, K., Bruno, M. S., & Serajian, V. (2002, April). Analysis of salt creep and well casing damage in high pressure and high temperature environments. In *Offshore Technology Conference*. Offshore Technology Conference.
- Macini, P., Mesini, E., Salomoni, V. A., & Schrefler, B. A. (2006). Casing influence while measuring in situ reservoir compaction. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 50(1), 40-54.
- Mirali, M., Hosseini, M. (2015). Numerical modeling of oil well behavior in the Salt formation (Case Study: One of the Wells of Kupala Oilfield". *Petroleum research*, 1396-1:92.
- Mohebbi, R. (2012). Investigating the stability of salt wells and its modeling using numerical methods in one of the oil fields. Master's thesis, Shahid Bahonar University, Kerman.
- Rahimi, Sh., Hosseini, M. (2009). Experimental investigation of Triaxial creep behavior of hollow cylindrical salt rock", *Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, 1393-7, 2-1, p 71-82.
- Wang, H., & Samuel, R. (2016). 3D Geomechanical Modeling of Salt-Creep Behavior on Wellbore Casing for Presalt Reservoirs", *SPE Drilling & Completion*.
- Yang, C. H., Daemen, J. J. K., and Yin, J. H. (1999). Experimental investigation of creep behavior of salt rock. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 36(2), 233-242. [doi:10.1016/S0148-9062(98)00187-9].
- Zareianjahromi, A. (2006). Analysis of casing collapse due to creep behavior of salt rock in salt caverns", Master's thesis, Shahid Bahonar University, Kerman.
- Zhang, Y., Xu, W.-y., Shao, J.-f., Zhao, H.-b., Wang, W. (2015). Experimental investigation of creep behavior of clastic rock in Xiangjiaba Hydropower Project, *Water Science and Engineering*. doi: 10.1016/j.wse.2015.

Impact of Salt Formation's Geomechanical properties on the casing collapse event in oil wells using Numerical modeling

M. Bajoolvand¹; A. Ramezanzadeh²

1. MSc student; Faculty of Mining Eng., Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology
2. Assistant Professor; Faculty of Mining Eng., Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology

Received: 2017/10/31 ; Accepted: 2018/05/2018

DOI: 10.22107/JPG.2018.104127.1046

Keywords

Numerical modeling
Oil wells stability
Casing
Salt creep behavior
FAC3D software

Final English Extended Abstract

In recent years, need for long-term exploitation of oil wells has been increased because of decreasing oil prices, increasing drilling costs, and the request for maximum recovery from reservoirs. Therefore, controlling the factors that affect long-term stability of oil wells is very important. Casing collapse is one of the phenomena that can occur for various reasons. Among

the various causes of casing collapses, time-dependent behaviors of salt formations are subject to debate. The viscoplastic properties and salt creep behavior create a great challenge in design of wells which are drilled in salt formations. In several cases, high damages of the oil wells in depths of salt layers has been reported. These failures in some cases led to abandonment of wells in the early years of exploitation as well as significant economic losses. Therefore, development the models that help to more clearly understanding the effect of time-dependent behavior of salt formations on the performance of oil wells, especially in casing collapse problem, is very important.

Thus, in this paper, 3D numerical simulation using FLAC^{3D} software to evaluate the effect of Geomechanical parameters of salt formations (e.g. salt layer thickness, stress distribution and mechanical parameters of salt rock) on collapse of oil wells casing has been performed by considering one of oil wells in Kupal oilfield conditions. For this purpose, at the first, Uniaxial creep test have been simulated as like as real conditions. Then by comparing between Experimental and Numerical result, constitutive model has been validated. Burgers creep model has been chosen to constitutive model for salt formation based on this validation. For closely to real condition and also avoiding from simplifications as much as possible, Drilling rate, Drilling mud pressure, cement injection and casing installation have been considered in modeling. Then three dimensional model has been solved for several period of time. Based on the results, stress distribution conditions have a major role in the creep behavior of salt formation among geomechanical parameters. The effect of salt layer thickness on the amount of damage to the casing is negligible. Also, studying the behavior of salt with different elastic modulus of has been described this parameter as an important factor in occurrence of collapse of oil wells casing.
