تحلیل نرخ همگرایی دیواره چاه های نفت در اثر پدیده خزش در سازندهای نمکی

احسان زارعیان جهرمی[1] ; سعید کریمی نسب[2] ; حسین جلالی فر[3]

••• کارشناسی ارشد مهندسی حفاری و بهره برداری نفت، ناظر عملیات تکمیل چاه شرکت مهندسی پارس پترو زاگرس: ehsan.zareyan@gmail.com

••• عضو هیات علمی گروه مهندسی معدن و پژوهشکده انرژی و محیط زیست، دانشگاه شهید باهنر کرمان: kariminasab@mail.uk.ac.ir

••• عضو هیات علمی گروه مهندسی نفت و گاز و پژوهشکده انرژی و محیط زیست، دانشگاه شهید باهنر کرمان: Jalalifar@mail.uk.ac.ir

چکیده

گنبدهای نمکی، به عنوان یکی از مهمترین تله‌های نفتی مطرح هستند. علاوه بر آن، نمک در پوش سنگ دیگر انواع تله‌های نفتی، می‌تواند حضور داشته باشد. حفاری در مقاطع نمکی، با مشکلات زیادی همراه است. از مشکلات چالش برانگیزی که در عملیات حفاری این سازندها روی می‌دهد، می‌توان به گیرافتادن رشته حفاری، کاهش قطر چاه و در نتیجه سیمان کاری نامناسب، گیرافتادن و گسیختگی لوله جداری، اشاره کرد. این مشکلات در اثر پدیده خزش، تغییر شکل وابسته به زمان تحت تنش ثابت، در نمک ایجاد می شود. هدف از این مقاله، معرفی خواص مکانیکی سنگ نمک است، که براساس آن می توان سیال حفاری مناسب، زمان جداره گذاری و مقدار فشار مچالگی را، که به لوله وارد می شود، تعیین کرد. با بهره‌گیری از نرم افزار FLAC، به بررسی تاثیر وزن سیال حفاری در کاهش نرخ همگرایی دیواره چاه پرداخته شد. با توجه به اینکه برای حفاری و نگهداری چاه‌های نفت و گاز، هزینه های زیادی صرف می شود، بهینه سازی وزن سیال حفاری در افزایش عمر چاه، از اهمیت زیادی برخوردار است. سیال حفاری سنگین‌تر، نرخ همگرایی چاه را کمتر می کند و فرصت زمان بیشتری برای عملیات جداره گذاری چاه تامین می‌نماید.

واژه های کلیدی

سازندهای نمکی، خزش، گسیختگی لوله جداری، سیال حفاری، همگرایی دیواره چاه، FLAC.

••• مقدمه

ساختارهای نمکی به علت تخلخل و نفوذپذیری بسیار کم، شرایط را برای انباشتن هیدروکربن ها مهیا می سازند. بنابراین مشاهده ساختارهای نمکی در مراحل پی جویی و اکتشاف، امکان دستیابی به هیدروکربن را افزایش می دهد. اما با وجود این در حفاری نمک، مشکل اصلی همگرایی دیواره چاه است. از آنجایی که حوزه های نفتی زیادی در زیر ساختارهای نمکی قرار گرفته اند، اطمینان داشتن از یکپارچگی و سلامت چاه های حفر شده در ساختارهای نمکی در طول عمر مخزن، یک چالش مهم در مهندسی حفاری است؛ زیرا شکست چاه منجر به صرف میلیاردها ریال هزینه تعمیرات و از بین رفتن تولید خواهد شد [۱].

همگرایی دیواره چاه در نمک ها، در اثر پدیده خزش به وجود می آید. خزش، یک پدیده وابسته به زمان است که تحت تنش ثابت رخ می دهد. یکی از اهداف اساسی در حفظ سلامت هر چاه، بهره گیری از سیال حفاری و لوله جداری مناسب است تا در برابر فشارها و تنش های موجود در زمین، همگرایی دیواره چاه را کنترل و از گسیختگی لوله جداری جلوگیری کند. برآورده کردن دو مورد اخیر، با مطالعه رفتار خزشی سنگ نمک و تنش های القایی در دیواره چاه امکان پذیر است [۲]. برای محاسبه تنش های القایی در دیواره چاه، از روش های تحلیلی می توان استفاده کرد. یکی از این روش ها، روش کرچ[1] است که تنش های القایی در دیواره چاه را تنها برای حالتی که سنگ یک ماده الاستیک است، محاسبه می کند [۳]. اما همانطور که گفته شد سنگ نمک یک ماده الاستیک نیست و تنش های القایی و نرخ همگرایی در دیواره یک چاه حفر شده در مقاطع نمکی، با فرمول های حالت الاستیک مطابقت ندارد و از این رو باید با شناسایی رفتار خزشی سنگ نمک، مقدار تنش های القایی و نرخ همگرایی دیواره چاه را به دست آورد. نمک، سنگی است که تحت تنش های ثابت، تغییر شکل های چشمگیری را نسبت به زمان متحمل می شود. شرایط بارگذاری و خصوصیات مکانیکی نمک نیز از جمله پارامترهایی است که نرخ همگرایی دیواره چاه را تحت تاثیر قرار می دهد. در این مقاله، با اعمال رفتار خزشی نمک در نرم افزار FLAC مقدار همگرایی دیواره چاه در شرایط مختلف بررسی شده است.

[1] Kirsch

نرخ خزش نمک به پارامترهایی از جمله: دما، تنش های تفاضلی و نوع سنگ نمک و ضخامت آن (ترکیبات مینرالوژیکی نمک، آب محتوا و حضور ناخالصی ها) وابسته است. چندین مدل رفتاری برای خزش سنگ نمک ارائه شده که همه ی این مدل ها سعی دارند با اعمال اثر پارامترهای ذکر شده، مقدار خزش را نسبت به زمان پیش بینی کنند. از جمله این مدل های رفتاری ارائه شده برای سنگ نمک می توان به مدل توانی[2] و مدل WIPP[3] اشاره کرد. مدل توانی، تنها به شبیه سازی خزش در حالت پایدار می پردازد. اما مدل WIPP علاوه بر شبیه سازی حالت پایدار خزش، مرحله اول خزش را، که از آن به خزش گذرا یاد می شود، لحاظ می کند و از این رو، دقت مدل سازی افزایش می یابد. نرخ کرنش، $\dot{\epsilon}$ در این قانون دارای دو بخش $\dot{\epsilon}_p$ و $\dot{\epsilon}_s$ که به ترتیب خزش اولیه (گذرا) و ثانویه (پایدار) است [۲]:

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_p + \dot{\epsilon}_s$$

نرخ خزش اولیه به مقدار نرخ خزش ثانویه بستگی دارد [۲]:

$$\dot{\epsilon}_p = \begin{cases} (A - B\epsilon_p)\dot{\epsilon}_s & \text{اگر } \dot{\epsilon}_s \geq \dot{\epsilon}^*_{ss} \\ \left\{A - B\left(\dot{\epsilon}^*_{ss}/\dot{\epsilon}_s\right)\right\}\dot{\epsilon}_s & \text{اگر } \dot{\epsilon}_s < \dot{\epsilon}^*_{ss} \end{cases} \qquad (1)$$

نرخ خزش ثانویه به صورت زیر است:

$$\dot{\epsilon}_s = D\bar{\sigma}^{\,n} e^{(-Q/RT)}$$

D و n و A و B و $\dot{\epsilon}^*_{ss}$ ثوابت ماده هستند. R ثابت جهانی گازها، Q انرژی فعال سازی، T دما برحسب درجه کلوین و $\bar{\sigma}$ تنش تفاضلی است [۲].

برای این که بتوان به طور مناسبی نرخ همگرایی و نرخ بارگذاری بر لوله جداری را مشخص کرد، توصیف دقیقی از رفتار نمک، مورد نیاز است. مدل WIPP، در جهت توسعه تکنولوژی مورد نیاز برای پیش بینی رفتار مکان های ایجاد شده در سازندهای لایه ای نمکی، به منظور دفن زباله های هسته ای، ایجاد شده است. مزیت اصلی نمک این است که همگرایی ناشی از آن در مکان های دفن، در نهایت ضایعات را محبوس می سازد. برای عمل به قوانین سختگیرانه ای که برای دفن ضایعات هسته ای وضع شده اند، نیاز است تا زمان همگرایی و شرایط منطقه را، بعد از محبوس سازی، با قطعیت زیادتری نسبت به سایر پروژه های مهندسی پیش بینی کرد، در نتیجه، یکی از چالش های بسیار مهم تعیین نرخ همگرایی و زمان محبوس شدن است. مدل رفتاری WIPP، به همین منظور ایجاد شده و از این مدل در طراحی مخازن استراتژیک نفت،[4] که در اثر معدن کاری انحلالی در مقاطع نمک ایجاد می شود، نیز استفاده شده است. این مدل برای یک محیط پیوسته و بدون تخلخل ایجاد شده است. ورودی های مدل، مدول برشی و مدول بالک، گرادیان دمای محیط، انرژی فعال سازی، ثابت جهانی گازها و ثوابتی است که از آزمایش سنگ نمک به دست می آید. نمونه ای از ورودی های لازم برای مدل سازی نمک با استفاده از مدل WIPP در جدول (۱) آمده است [۴].

••• ضرورت انجام تحقیق

پروژه های زیادی در سراسر جهان وجود دارد که با مشکلات ناشی از خزش سنگ نمک در مراحل حفاری، سیمان کاری، جداره گذاری و تولید روبرو هستند. از این رو شناخت رفتار مکانیکی سنگ نمک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با بررسی همگرایی دیواره چاه با وجود سیالات مختلف، می توان همگرایی دیواره چاه را کنترل کرد و از گیرکردن رشته لوله ها در حین حفاری، و به هنگام راندن لوله جداری در چاه جلوگیری شود. همچنین کنترل همگرایی دیواره چاه، زمینه انجام عملیات سیمان کاری مناسب و کاهش گسیختگی لوله جداری را فراهم می کند.

••• طرح مسئله و روش انجام کار

در این مطالعه با استفاده از روش های عددی، همگرایی دیواره برای چاه حفر شده در سنگ نمک بررسی شد. سنگ نمک مورد مطالعه، هالیت حاوی رس است و پارامترهای رفتاری آن که از قانون خزشی WIPP تبعیت می کند، در جدول (۱) آمده است: [۴].

جدول ۱: پارامترهای رفتاری سنگ نمک حاوی رس [۴]

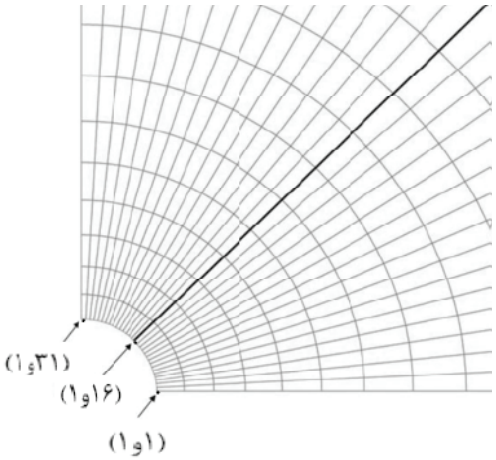
هالیت رس دار	
K , مدول بالک	۲۰/۷ GPa
G , مدول برشی	۱۲/۴ GPa
A , ثابت $WIPP$	۴/۵۶
B , ثابت $WIPP$	۱۲۷
D , ثابت $WIPP$	$۱/۷۴^{-۳۵}$ $Pa^{-n}s^{-۱}$
n , توان $WIPP$	۴/۹۰
Q , انرژی فعال سازی	۱۲۰۰۰ cal/mol
$\dot{\epsilon}^*_{ss}$, نرخ بحرانی خزش	$۵/۳۹ * ۱۰^{-۸}$ $s^{-۱}$

[2] Power law
[3] Waste Isolation Pilot Plant
[4] Strategic Petroleum Reserve

قطر چاه ۱۲/۲۵ اینچ و مرزهای مدل در ۳۰ برابر قطر چاه قرار داده شده است. مدل سازی در عمق ۱۱۲۵۰ فوت انجام شده و تنش های اولیه هیدرواستاتیک هستند:

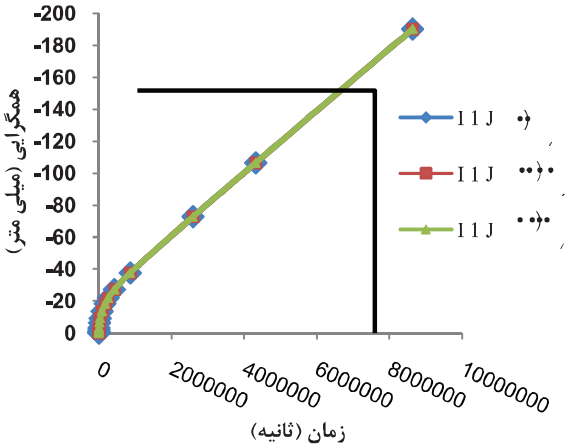
$$\sigma_v = \sigma_H = \sigma_h = ۵۳\text{MPa}$$

دما در عمق مورد مطالعه، ۴۸/۹ است. ابتدا مدل سازی برای حالتی انجام شده که سیال حفاری در چاه وجود ندارد (فرضیات این تحلیل ها از داده های مربوط به چاه های خلیج مکزیک استخراج شده است). مدل سازی انجام شده، پیش بینی می کند که پس از گذشت ۵۰ روز دهانه چاه در اثر خزش بسته می شود. این موضوع با خط تیره پررنگ در شکل (۲) نشان داده شده است. شکل (۱) شبکه هندسی مدل مورد مطالعه است.



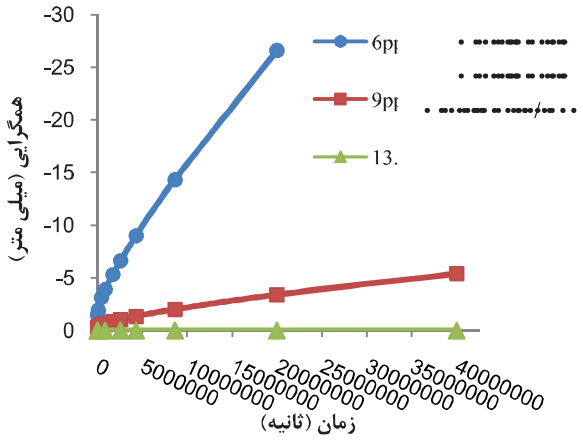
شکل ۱: شبکه هندسی مدل مورد مطالعه

در مدل سازی فعلی، شرایط تنش اولیه در محیط هیدرواستاتیک در نظر گرفته شده است. در این صورت مقدار همگرایی در تمام نقاط دیواره چاه یکسان است. شکل (۲) مقدار همگرایی دیواره چاه را در نقاطی با مختصات (۱و۱) ، (۱و۱۶) و (۱و۳۱) نشان می دهد. این نقاط در شکل (۱) نشان داده شده اند. همان طور که مشاهده می شود در هر سه مورد، همگرایی دیواره چاه بر هم منطبق است.



شکل ۲: همگرایی دیواره چاه برای حالتی که تنش های اولیه هیدرواستاتیک است.

مدل سازی قبل برای حالت هایی که سیالاتی به وزن ۶ ، ۹ و ۱۳/۱۴ پوند بر گالن در چاه وجود دارد، تکرار شد. شکل (۳) همگرایی دیواره چاه را در حضور سه سیال ذکر شده نشان می دهد. رابطه، $\sigma = ۰/۰۵۲\ \rho H$، وزن سیال مناسب را برای حفر چاه نشان می دهد که σ، فشار اعمالی از طرف سیال بر دیواره چاه در عمق مورد مطالعه، برحسب پوند بر اینچ مربع، ρ وزن سیال حفاری برحسب پوند بر گالن و H عمق برحسب فوت است [۵]. رابطه ذکر شده سیالی به وزن ۱۳/۱۴ پوند بر گالن را برای کنترل همگرایی دیواره چاه، در شرایط مدل سازی، پیشنهاد می کند. اما همان طور که مشاهده می شود در حالتی که تنش ها هیدرواستاتیک هستند، سیالی با وزن ۹ پوند بر گالن به راحتی می تواند همگرایی دیواره چاه را کنترل کند. سیالی با وزن ۱۳/۱۴ پوند بر گالن کاملاً همگرایی دیواره چاه را کنترل می کند و چاه را در قطر مورد نظر حفظ می کند.



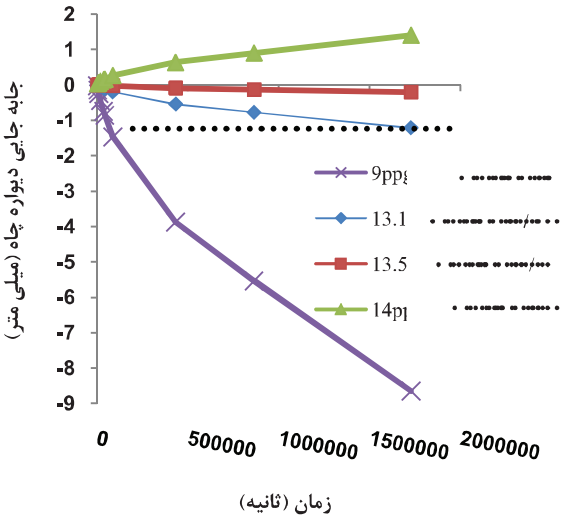
در ادامه، مدل برای حالتی که در منطقه شرایط تنش اولیه غیرهیدرواستاتیک است، مطالعه می شود:

$$\sigma_v = \sigma_H = ۵۳\ \text{MPa},\ \sigma_h = ۴۰\ \text{MPa}$$

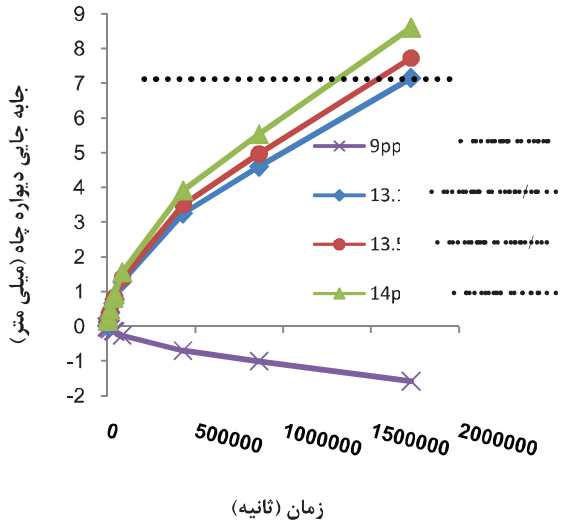
نقطه (۱و۱) در جهت تنش افقی بیشینه (σ_H) و نقطه (۳۱و۱) در جهت تنش افقی کمینه (σ_h) قرار دارد. شکل (۱). جابه جایی دیواره چاه در نقاط (۱و۱) و (۳۱و۱) و در حضور سیالات با وزن های ۹ ، ۱۳/۱۴ ، ۱۳/۵ ، ۱۴ پوند بر گالن بررسی شد. شکل های (۴) و (۵). مدل های ایجاد شده نشان می دهد که هیچ کدام از این سیالات، نمی توانند دیواره چاه را به صورت دایروی حفظ کنند و یا همگرایی دیواره چاه را به کلی از بین ببرند. بنابراین، در چنین شرایطی برقو زدن[5] دیواره چاه ضروری است، تا از گیرکردن رشته حفاری جلوگیری کند. در صورتی که مدت زمان زیادی از حفاری مقطع بگذرد، چاه، از حالت دایروی خارج می شود. این موضوع پس از جداره گذاری چاه باعث اعمال بارگذاری غیریکنواخت بر لوله جداری و در نهایت گسیختگی لوله جداری چاه می شود. برای مثال در مطالعه فعلی، در صورتی که از سیالی با وزن ۱۳/۱۴ پوند بر گالن استفاده شود، پس از گذشت ۲۰ روز دیواره چاه در نقطه (۱و۱) به مقدار ۱/۲ میلی متر به سمت داخل چاه حرکت می کند. شکل (۴). این در حالی است که جابه جایی دیواره چاه در نقطه (۳۱و۱) به مقدار ۷/۱۵ میلی متر به سمت بیرون است. شکل (۵). مقادیر ۱/۲ و ۷/۱۵ به صورت خط نقطه چین در شکل های (۴) و (۵) ، نشان داده شده است. لازم به ذکر است که جابه جایی دیواره چاه به سمت داخل چاه، با علامت منفی و به سمت خارج چاه، با علامت مثبت نشان داده شده است. در صورتی که جداره گذاری مقطع به تعویق بیافتد، بیضوی شدن مقطع ادامه خواهد یافت. بنابراین در حالتی که تنش ها هیدرواستاتیک نیستند، جلوگیری از همگرایی دیواره چاه امکان پذیر نیست و فقط می توان با طراحی یک سیال مناسب به طور موقت چاه را نزدیک به قطر واقعی نگه داشت.

••• نتیجه گیری

در شرایطی که تنش های برجا در منطقه هیدرواستاتیک باشد، مدل سازی های انجام شده، نشان می دهد که همگرایی دیواره چاه را می توان به نحو مناسبی کنترل کرد. تنش های هیدرواستاتیک تنها در شرایطی که لایه نمکی ضخیم و یکنواخت و ایزوتروپ باشد، به وجود می آید. اما در صورتی که شرایط تنش برجا در محیط غیرهیدرواستاتیک باشد، کنترل همگرایی دیواره چاه تنها با استفاده از سیال حفاری ممکن نیست و باید چاه را برقو زد و مقطع نمکی را سریع تر حفر کرد، و عملیات جداره گذاری را به سرعت انجام داد.



شکل ۴: جابه جایی دیواره چاه در نقطه (۱و۱)، در حضور سیالات با وزن های مختلف با گذشت زمان



شکل ۵: جابه جایی دیواره چاه در نقطه (۳۱و۱)، در حضور سیالات با وزن های مختلف با گذشت زمان

[5] Reaming

••• مراجع

[1] Farmer P., Miller D., "*Exploring the subsalt*", pp.: 53-55, 1996.

[2] FLAC manual, "*creep material models*" , 2002.

[3] Fjaer E., Holt R.M., Horsrud P., Raaen A.M., Risnes R., "*Petroleum Related Rock Mechanics,2nd ED*", British Library Cataloguing in Publication Data, pp.: 46-53, 2008.

[4] Willson S.M., Fredrich A.F., Fredrich j.t., "*Assessment of Salt Loading on Well Casings*", SPE 74562, 2003.

[5] Bourgoyne A.T., Millheim K.K., Chenevert M.E., "*Applied Drilling Engineering*", Chapter 4, Drilling Hydraulics,pp.: 113-115, 1986.

Analysis of wall closure rate of oil wells due to the creep phenomenon in salt formations

E. Zareyan[1] & S. Kariminasab[2] & H. jalalifar[3]

1- **M.Sc. of oil well drilling and production engineering, Supervisor of oil and gas well completion in Pars Petro Zagros engineering Co., Iran, ehsan.zareyan@gmail.com**

2- **Assistance professor, Department of Mining engineering, Shahid bahonar University, Kerman, Iran, kariminasab@mail.uk.ac.ir**

3- **Assistance professor, Department of oil and gas engineering, Shahid bahonar University, Kerman, Iran, Jalalifar@mail.uk.ac.ir**

ABSTRACT

Salt domes are one of the most important oil traps. More over salt minerals can be present in other oil traps.

Drilling in salt formations can result in many problems such as stuck pipe of drilling strings and casings, closure of borehole's wall and therefore bad cementing and casing failure. These problems occur as the result of creep phenomenon which is the time dependent deformation of salt under constant stress.

The aim of this paper is to study the mechanical behavior of salt rock. Based on obtained results, appropriate drilling fluids, the time for running the casing in the borehole, and the collapse pressure on the casing can be determined. The effect of drilling fluid's weight on reducing the rate of borehole's wall closure is evaluated by FLAC codes. Considering that drilling of oil and gas wells is an expensive operation, optimization of the drilling fluid's weight can ensure oil well integrity. Heavier drilling fluids can reduce the rate of borehole's wall closure and therefore the running of casing can be postponed.

Keywords

Salt formations, Creep, Casing collapse, Drilling fluid, Borehole's wall closure, FLAC.