

مدل سازی عددی رفتار چاه نفت در سازند نمکی (مطالعه موردی: یکی از چاه‌های نفت میدان کوپال)

مازیار میرالی و مهدی حسینی*

گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

تاریخ دریافت: ۹۴/۹/۲ تاریخ پذیرش: ۹۵/۵/۳۱

چکیده

سازندهای نمکی به عنوان یکی از مهم‌ترین تله‌های نفتی شناخته شده‌اند. به همین دلیل حفاری چاه نفت در لایه‌های نمکی و نگهداری آن در زمان بهره‌برداری، از مهم‌ترین مسائل در مهندسی حفاری و از جمله عوامل تاثیرگذار بر طول عمر یک میدان نفتی به شمار می‌رود. از دست رفتن این چاه‌ها علاوه بر هدر رفتن وقت و هزینه، بهره‌برداری از حجم عظیمی از ذخایر را با مشکل روبرو می‌کند. از مشکلاتی که در عملیات حفاری و پس از آن در این سازندها روی می‌دهد، می‌توان به گیرافتادن رشته حفاری، کاهش قطر چاه و مچالگی یا برش لوله‌های جداری اشاره کرد. همگرایی دیواره چاه در نمک‌ها در اثر پدیده خزش به وجود می‌آید. خزش یک پدیده وابسته به زمان است و تحت تنش ثابت رخ می‌دهد. در این پژوهش، ابتدا با نمونه‌گیری و انجام آزمون‌های آزمایشگاهی، مشخصات ژئومکانیکی یکی از چاه‌های میدان نفتی کوپال به دست آمده و در نهایت با استفاده از نتایج آزمون خزش انجام گرفته بر روی نمونه، به کمک نرم‌افزار FLAC^{2D}، رفتار خزشی لایه‌های نمک پیرامون این چاه تحت مدل‌سازی عددی قرار گرفته است. مدل‌سازی‌های انجام شده در دو حالت هنگام حفاری و پس از حفاری (در تماس با لوله‌های جداری) و با استفاده از مدل ویسکوپلاستیک برگر انجام گرفته است. مدل‌سازی‌ها در حین حفاری نشان می‌دهد استفاده از سیال حفاری با وزن ۱۸ PPG به خوبی همگرایی را کنترل می‌کند. همچنین در حالتی که سیمان کاری پشت لوله جداری مناسب باشد، گسیختگی لوله جداری رخ نخواهد داد.

کلمات کلیدی: سازند نمکی، چاه نفت، مدل‌سازی عددی، خزش، نرم‌افزار FLAC^{2D}.

مقدمه

با مشکلات زیادی همراه است. از مشکلات چالش برانگیزی که در عملیات حفاری این سازندها روی می‌دهد، می‌توان به گیر افتادن رشته حفاری، کاهش قطر چاه و در نتیجه سیمان کاری نامناسب، گیر افتادن و گسیختگی لوله جداری اشاره کرد. این مشکلات، در اثر پدیده خزش، یعنی تغییر شکل وابسته به زمان تحت تنش ثابت در نمک به وجود می‌آید.

سنگ نمک متعلق به خانواده سنگ‌های رسوبی تبخیری شیمیایی است. یکی از اعضای این گروه، سنگی است که بخش عمده آن از هالیت تشکیل شده است و در تحقیق حاضر، این سنگ به اختصار سنگ نمک نام می‌گیرد. حفاری در مقاطع نمکی

یک مدل المان محدود ارائه کردند که این مدل، برای محاسبه بار وارد به سیستم نگهداری در زمان طولانی، تحت شرایط سیمان کاری متفاوت به کار گرفته شد و در نهایت به این نتیجه رسیدند که در کنار افزایش مقاومت شکست لوله جداری، افزایش کیفیت حفاری و سیمان کاری، فاکتور مهم‌تری است [۴].

وانگ و ساموئل برای پیش‌بینی اثر رفتار خزشی نمک روی تنش وارده به سیستم نگهداری چاه نفت، یک مدل ژئومکانیکی سه بعدی ساختند. این مدل با استفاده از داده‌هایی چون فشار و دمای چاه، تنش و دمای سازند، خواص سنگ، سیمان و سیستم نگهداری، برای پیش‌بینی اثر رفتار خزشی نمک روی تنش در دیواره چاه توسعه داده شد. به شکل خلاصه، اثرات خزش سریع نمک، می‌تواند با برنامه ریزی عملیات حفاری و سیمان‌زنی مناسب و اثرات خزش پایدار و طولانی مدت نمک می‌تواند با استفاده از طرح تکمیلی بهینه رفع شوند [۵].

ونگر و همکاران به بررسی تاثیر دما بر روی چاه نفت قائم در حال حفاری در سازندهای نمکی پرداختند. محققان در این مطالعه دریافتند که نرخ بسته شدن چاه زمانی در کمترین حد خود است که دما در پایین‌ترین حد خود باشد [۶].

زارعیان جهرمی و همکارانش به مطالعه روی همگرایی دیواره چاه نفت در لایه‌های نمکی در شرایط تنش هیدرواستاتیک پرداختند. مدل‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهد که همگرایی دیواره چاه را می‌توان به نحو مناسبی کنترل کرد. مدل‌سازی برای حالتی که سیالاتی به وزن ۶، ۹ و ۱۴/۱۳ PPG در چاه وجود دارد انجام گرفته و مشاهده شد که سیال با وزن ۹ PPG، به راحتی همگرایی دیواره را کنترل کرده و سیال با وزن ۱۴/۱۳ PPG، چاه را به راحتی در قطر مورد نظر حفظ می‌کند [۷].

مچالگی لوله‌های جداری یکی از بزرگترین مشکلات موجود در صنایع بالادستی نفت به شمار می‌آید. سالانه میلیاردها دلار به دلیل مچالگی یا برش لوله‌های جداری در چاه‌های هیدروکربوری در مناطق مختلف دنیا صرف تعمیرات و بازسازی یا حفاری مجدد چاه می‌شود. مچالگی لوله‌های جداری می‌تواند در اثر عواملی نظیر حرکت خزشی سنگ‌های نرم همچون نمک و شیل و ایجاد بار نقطه‌ای بر روی لوله جداری به دلیل عدم سیمان کاری خوب در پشت لوله جداری، حرکت لغزشی لایه‌های نرم که میان دو لایه سخت‌تر از لحاظ مکانیکی قرار گرفته باشد [۱]. بنابراین پایداری دیواره چاه به عنوان یکی از نکات حساس و بحرانی در عملیات حفاری به شمار می‌رود. عواملی که باعث ناپایداری در چاه می‌شوند عبارتند از [۲]:

۱- عوامل مکانیکی

۲- عوامل شیمیایی

۳- تاثیر هردوی این عوامل

عوامل مکانیکی وابسته به دو نکته هستند: ۱- وزن نامناسب گل (کم یا خیلی زیاد). ۲- روش حفاری نامناسب (میزان نرخ حفاری^۱، گشتاور لوله‌ها، لرزش لوله‌ها، بالا و پایین بردن لوله‌ها). عوامل شیمیایی تحت تاثیر شدید گل حفاری هستند. البته در اکثر موارد، ناپایداری چاه ناشی از تاثیر هر دو عامل مکانیکی و شیمیایی است [۳].

در سال‌های اخیر، سنگ نمک به عنوان ماده‌ای ایده‌آل برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی، نفت و پسماندها به ویژه از نوع هسته‌ای مورد توجه است. از همین رو محققان بسیاری رفتار حفاریات در سازند نمکی را بررسی کرده‌اند. ژائو و همکارانش به مدل‌سازی رفتار چاه نفت و اثر بارهای وارد بر لوله‌های جداری در اثر تنش‌های القایی ناشی از خزش سنگ نمک پرداختند. در این مطالعه، نمک به عنوان یک ماده رئولوژیک در نظر گرفته شد و یک معادله ساختاری به دست آمد. آنها با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و اعمال مدل مکانیک شکست،

1. Rop (Rate of Penetration)

2. PPG (Pound Per Gallon)

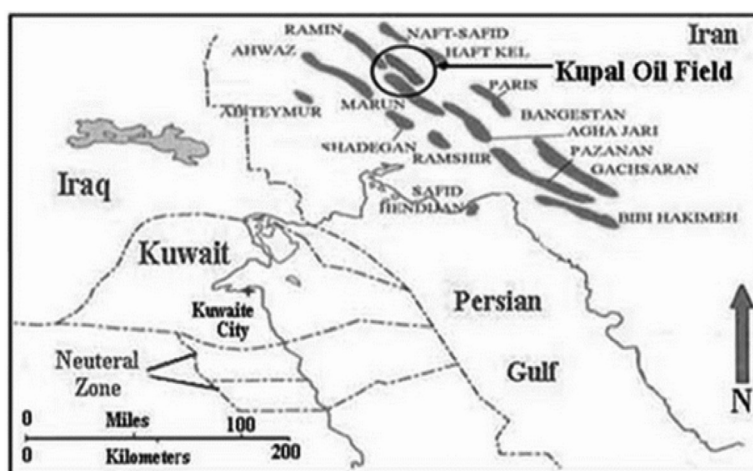
می‌شود. سپس تاثیر لوله‌های جداری و سیمان‌کاری در همگرایی دیواره چاه و مچالگی لوله‌های جداری در اثر خزش بررسی می‌شود.

کلیاتی در مورد میدان مورد مطالعه

این تحقیق بر روی یکی از چاه‌های میدان نفتی کوپال انجام گرفته و نمونه‌های مورد بررسی از این چاه تهیه شده‌اند. میدان کوپال در ۲۵ km جنوب غرب هفتگل و در جهت ادامه چین خوردگی آغاچاری واقع شده است. این میدان از جنوب غرب به میدان مارون، از شمال غرب به میدان رامین و از جنوب شرق با میدان آغاچاری همسایه است (شکل ۱). این میدان به صورت تاقدیسی کشیده^۱ و تقریباً متقارن است که دو برجستگی^۲ در آن شناسایی شده است. برجستگی اصلی که ۵۷ حلقه از مجموع ۵۸ حلقه چاه حفاری شده بر روی آن واقع شده‌اند، در ناحیه شمال غربی میدان قرار دارد که از آن با نام کوپال غربی یاد می‌شود. برجستگی کوچکتر در منطقه جنوب شرقی میدان واقع شده است و با نام ساختمان کوپال شرقی از آن یاد می‌شود. این میدان از لحاظ تکتونیکی در بخش مرکزی فروافتادگی دزفول شمالی بوده و از روند زاگرس تبعیت می‌کند.

توکلی و همکارانش به مدل‌سازی عددی لوله‌های جداری چاه‌های نفت در میدان نفتی مارون با استفاده از نرم‌افزار FLAC پرداختند و پس از انجام مدل‌سازی به این نتیجه رسیدند که گیر کردن لوله‌های حفاری در میدان مارون، به تنهایی در نتیجه خواص خزش ذاتی یک نمک خاص نیست. همچنین دو جداره کردن چاه در برابر لایه‌های نمکی، مقاومت چاه را در برابر تنشهای شدید افزایش و در نتیجه طول عمر چاه را به مقدار قابل ملاحظه ای افزایش داده و پیشگیری از قرار گرفتن در برابر بارهای غیریکنواخت مانند مناطق تکتونیکی، بسیار آسان تر و کم هزینه‌تر از مقابله با این بارها است. بنابراین قبل از حفاری در لایه‌های نمکی، انجام مطالعات دقیق زمین‌شناسی در منطقه ضروری به نظر می‌رسد [۸].

این تحقیق بر روی یکی از چاه‌های میدان نفتی کوپال انجام شده است. با آماده‌سازی نمونه‌های گرفته شده از این چاه، آزمایش خزش بر روی نمونه‌ها اجرا می‌شود و سپس با به‌دست آوردن اطلاعات مورد نیاز، با استفاده از مدل ویسکوپلاستیک برگر به کمک نرم‌افزار FLAC، میزان جابه‌جایی دیواره چاه نفت در اثر پدیده خزش به‌دست می‌آید و وزن مناسب گل حفاری برای کاهش جابه‌جایی‌ها حاصل



شکل ۱ موقعیت میدان نفتی کوپال [۹].

1. Elongated
2. Culmination

نمونه مورد استفاده (مغزه‌های گرفته شده از چاه) برای این آزمایش دارای طول حدود ۸ cm و قطر ۷۳ mm بوده که از عمق ۳۱۹۲ m به دست آمده است (شکل ۳). این آزمایش در دمای $22/8^{\circ}\text{C}$ انجام گرفت. با انجام آزمایش تراکم تک محوری، مقاومت سنگ نمک در این عمق برابر با $32/53\text{ MPa}$ (شکل ۴) به دست آمد.

برای محاسبه مدول الاستیسیته، شیب بخش خطی منحنی تنش-کرنش محوری محاسبه گردید که بر این اساس مدول الاستیسیته در حدود $9/42\text{ GPa}$ به دست آمد (شکل ۵). همچنین مقدار کرنش‌های جانبی نیز توسط یک کرنش سنج دیگر محاسبه گردید و منحنی تنش محوری-کرنش جانبی نیز رسم شد. از تقسیم مدول الاستیسیته بر شیب منحنی تنش محوری-کرنش جانبی، ضریب پواسن محاسبه می‌شود که برای این نمونه، نسبت پواسن برابر با $0/35$ محاسبه شد که حاکی از شکل‌پذیر بودن بالای این نمک‌هاست. با استفاده از روابط موجود، مقدار مدول برشی و حجمی برای نمک‌های این چاه، به ترتیب برابر با $3/49\text{ GPa}$ و $10/46\text{ GPa}$ تعیین شدند. لازم به ذکر است تنش در چاه هیدرواستاتیک نیست و فقط در نمک‌های ضخیم لایه به دلیلی که در ادامه بحث اشاره شده است به هیدرواستاتیک تبدیل می‌شود.

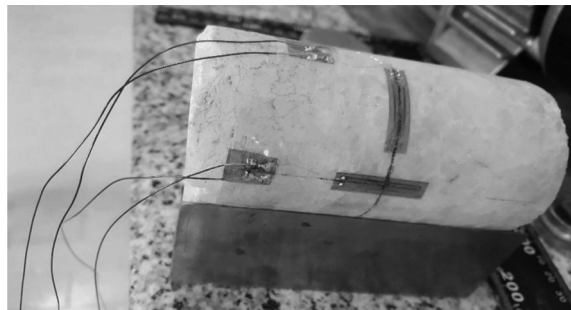
سنگ نمک یکی از سنگ‌های تبخیری است که خاصیت شکل‌پذیری بالایی با افزایش دما و تنش‌های اعمالی دارد. سنگ نمک دارای تخلخل و تراوایی بسیار کم می‌باشد. لذا با افزایش تنش، قابلیت تراکم‌پذیری کمی داشته و به صورت خمیری شروع به حرکت می‌کند. این پدیده به دلیل وجود نسبت پواسن بالا در نمک‌هاست. این بدان معنی است که با وارد شدن یک مقدار خاص تنش به نمک، به دلیل عدم توانایی در نگهداری و برقرار داشتن تنش‌های انحرافی درون خود، حالت تنش در آن کاملاً هیدرواستاتیک یا نزدیک به آن می‌شود.

آنچه به اهمیت سازند مورد بحث افزوده، وجود آب‌های شور و تحت فشار است. به طوری که سازند گچساران، به عنوان سازند پرفشار و مسئله‌ساز در بین کارشناسان نفتی شهرت یافته است [۱۰]. در چاه میدان نفتی کوپال که در این تحقیق به مطالعه آن پرداخته شده، از دهانه چاه تا انتهای چاه سازندهای متفاوتی وجود دارند. از جمله این سازندها می‌توان به آجاجاری، میشان، بخش‌های ۲، ۴، ۵، ۶ و ۷ سازند گچساران، پوش سنگ، آسماری، پابده، گورپی، ایلام، سروک و تیرگان اشاره کرد. نمونه‌های مورد مطالعه از عمق ۳۱۸۵ تا ۳۱۹۲ m گرفته شده و این عمق از چاه مربوط به بخش‌های ۲ و ۴ سازند گچساران می‌شود. سازند گچساران اولین سازند گروه فارس است که پوش سنگ سازند آسماری و سازندهای هم‌ارز در ایران و عراق به حساب می‌آید. این سازند شامل یک توالی از سنگ‌های تبخیری مانند نمک، انیدریت، مارن‌های قرمز و خاکستری است. در سازند گچساران منطقه خوزستان ۷ بخش شناسائی شده است. بخش ۷ در بالای سازند بوده و بخش ۱ که به نام پوش سنگ در قسمت‌های زیرین سازند قرار دارد، به عنوان سنگ پوشش مخزن نفتی آسماری مطرح می‌باشد. به طور عمده این سازند از رسوبات تبخیری انیدریت و نمک با تخلخل نزدیک به صفر که در اثر اعمال فشار شکل‌پذیر هستند، تشکیل شده که به خوبی قادر به نگهداری نفت و گاز فرار در مخازن می‌باشند.

برای به دست آوردن خصوصیات مکانیکی این مغزه‌ها، تنها آزمایش تراکم تک محوری انجام شد. آزمایش تعیین مقاومت تراکم تک محوری در آزمایشگاه، به کمک بارگذاری توسط جک‌های خودکنترل صورت می‌گیرد. انجام آزمایش با این ماشین‌ها، نتایج با دقت بالاتری را به همراه خواهد داشت. زیرا در هنگام بارگذاری با آنها می‌توان از طرفی نرخ بارگذاری را تعیین نمود و از سوی دیگر، کرنش‌ها را با دقت بالاتری اندازه‌گیری و ثبت نمود و رفتار بعد از شکست را نیز بررسی کرد (شکل ۲).



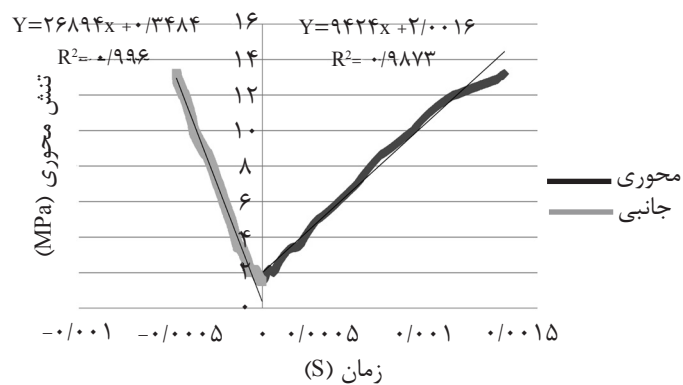
شکل ۲ دستگاه بارگذاری خودکنترل.



شکل ۳ آماده‌سازی نمونه برای آزمایش.



شکل ۴ ثبت نتایج و کرنش‌ها در دستگاه.



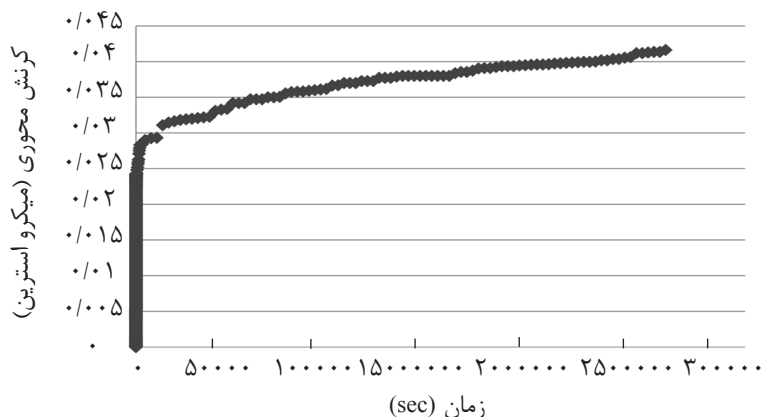
شکل ۵ نمودار تغییرات کرنش جانبی و محوری نسبت به تغییرات سطح تنش محوری.

ویسکوپلاستیک) که با یک لغزنده پلاستیک به صورت سری ترکیب شده است. برای تعیین ثابت‌های مدل برگر در این مطالعه از نتایج آزمایش خزش تک محوری در درجه حرارت 95°C بر روی نمونه‌های سنگ نمک که مربوط به عمق $3191/25\text{ m}$ است، استفاده شد (شکل ۶) [۱۲]. کرنش محوری با زمان $\varepsilon_0(t)$ در مدل برگر که تحت یک تنش محوری ثابت قرار می‌گیرد، عبارت است از [۱۳]:

$$\varepsilon_1(t) = \frac{2\sigma_1}{9K} + \frac{\sigma_1}{3G_2} + \frac{\sigma_1}{3G_1} - \frac{\sigma_1}{3G_1} e^{-\left(\frac{G_1 t}{\eta_1}\right)} + \frac{\sigma_1 t}{3\eta_2} \quad (3)$$

که $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$ مدول حجمی است. با توجه به مقادیر مدول الاستیسیته (E) و ضریب پواسن بدست آمده از آزمایش تک محوری مدول حجمی $10/46\text{ GPa}$ به دست می‌آید. مقدار و مستقل از زمان فرض می‌شود و η_1 و η_2 به ترتیب ویسکوزیته مدول ماکسول و مدول کلویین و G_1 و G_2 به ترتیب مدول برشی مدول ماکسول و مدول کلویین هستند. معادله ۳ نشان می‌دهد که کرنش کل تحت یک تنش، از سه قسمت ساخته شده است که عبارتند از [۱۴]. کرنش الاستیک آنی $\left(\frac{2\sigma_1}{9K} + \frac{\sigma_1}{3G_2}\right)$ ، خزش ثانویه $\left(\frac{\sigma_1 t}{3\eta_2}\right)$ ، و خزش اولیه $\left(\frac{\sigma_1}{3G_1} - \frac{\sigma_1}{3G_1} e^{-\left(\frac{G_1 t}{\eta_1}\right)}\right)$.

شکل ۷ یک نمودار از ε_0 بر حسب t طبق معادله ۳ است. از روی منحنی آزمایش خزش (شکل ۶) شیب خط خزش ثانویه مقدار 3×10^{-9} محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه تنش محوری 10^7 Pa است مقدار η_2 نیز با داشتن شیب خط برابر $15 + 10 \times 10^{11}\text{ Pa.s}$ حاصل می‌شود.



شکل ۶ منحنی کرنش-زمان نمونه سنگ نمک تحت آزمون خزش تک محوری.

تنش در نمک‌ها حالت رهایی و آزادی پیدا می‌کند و در نهایت به هیدرواستاتیک تبدیل می‌شود [۱ و ۱۱]. مولفه تنش در عمق مورد نظر از رابطه ۱ قابل محاسبه می‌باشد:

$$S_V = \int_0^z \rho(z) g dz \cong \bar{\rho} g z \quad (1)$$

که در آن g شتاب ثقل و $\rho(z)$ چگالی در عمق z و $\bar{\rho}$ چگالی میانگین روباره می‌باشد.

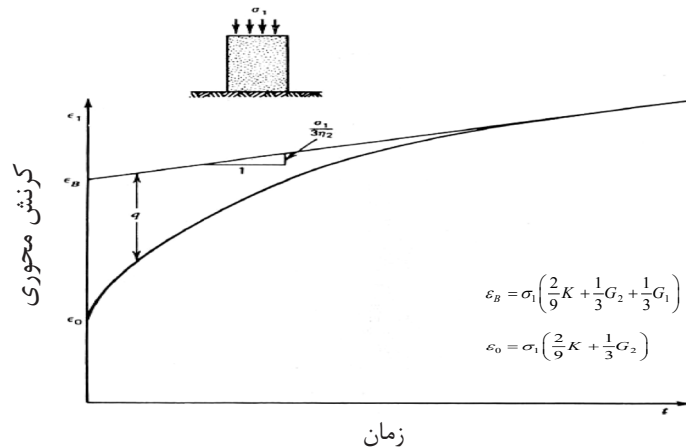
براساس گزارش‌های موجود، چگالی میانگین سنگ‌های روباره برابر با $2/55\text{ g/cm}^3$ در نظر گرفته شد. لذا مقدار گرادیان تنش قائم در سازند گچساران برابر $0/255\text{ MPa/m}$ می‌باشد. بر این اساس با استفاده از رابطه ۱، مقدار تنش قائم در عمق 3192 m که همان عمق نمونه‌گیری است، برابر با $81/396\text{ MPa}$ محاسبه شد. همان‌طور که اشاره شد، در سازندهای نمکی به طور معمول، شرایط تنش هیدرواستاتیک یا نزدیک به آن است. یعنی مقدار تنش افقی با تنش قائم برابر است. طبق رابطه ۲:

$$\sigma_h = K \sigma_v \quad (2)$$

که در شرایط تنش هیدرواستاتیک $k=1$ در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب تنش‌های افقی نیز برابر با تنش قائم و برابر $81/396\text{ MPa}$ در نظر گرفته شد.

تعیین ثابت‌های مدل برگر

در این مطالعه از مدل ویسکوپلاستیک برگر که در برنامه FLAC با نام مدل CVISC شناخته می‌شود، استفاده شده است. این مدل با سطح تسلیم موهر-کولمب، شامل یک المان برگر بوده (رفتار



شکل ۷ خزش در فشار تک محوره سنگی که تحت مدل برگر رفتار می کند [۱۲].

۵ تبدیل می شود.

$$\log q = -2.1899 - 2 \times 10^{-6} t \quad (5)$$

از مقایسه رابطه ۴ و ۵ می توان نتیجه گرفت:

$$\frac{\sigma_1}{3G_1} = -2.1899 \quad (6)$$

$$\frac{G_1}{2.3\eta_1} = 2 \times 10^{-6} \quad (7)$$

با جایگزین کردن مقدار تنش محوری 10^7 Pa در رابطه ۶ مقدار $G_1 = 516 \times 10^6$ پاسکال و با قرار دادن G_1 در رابطه ۷ مقدار $\eta_1 = 1.12 \times 10^{14}$ پاسکال در ثانیه به دست می آید.

و G_2 می تواند از رابطه ۸ تعیین شود:

$$\frac{\sigma_1}{3G_2} = \varepsilon_B - \sigma_1 \left(\frac{1}{3G_1} + \frac{2}{9K} \right) \quad (8)$$

از روی نمودار شکل ۶ مقدار $\varepsilon_B = 0.0334$ حاصل می شود با داشتن تمام پارامترهای رابطه ۸ مقدار $G_2 = 124.71 \times 10^6$ پاسکال به دست می آید.

در نهایت با استفاده از نتایج آزمون خزش صورت گرفته پارامترهای خزشی مدل برگر محاسبه می شود (جدول ۱).

در زمان $t=0$ در $\varepsilon_0 = \sigma_1 \left(\frac{2}{9}K + \frac{1}{3}G_2 \right)$ با محور ε برخورد دارد و هنگامی که کرنش در زمان زیاد در طول یک خط قرار می گیرد، امتداد آن محور ε را در $\varepsilon_B = \sigma_1 \left(\frac{2}{9}K + \frac{1}{3}G_2 + \frac{1}{3}G_1 \right)$ قطع می کند و شیب این خط $\frac{\sigma_1}{3\eta_1}$ است.

بار نمی تواند به صورت آنی وارد شود و بهتر است در عمل، نقطه تقاطعی ε_0 را به وسیله رگرسیون پیدا کنیم [۱۴]. در اینجا q مساوی با فاصله مثبت بین نمودار خزش و خط مجانب خزش ثانویه (شکل ۷) می باشد. بنابراین:

بار نمی تواند به صورت آنی وارد شود و بهتر است در عمل، نقطه تقاطعی ε_0 را به وسیله رگرسیون پیدا کنیم [۱۴]. در اینجا q مساوی با فاصله مثبت بین نمودار خزش و خط مجانب خزش ثانویه (شکل ۷) می باشد. بنابراین:

$$\log q = \log \left(\frac{\sigma_1}{3G_1} \right) - \frac{G_1}{2.3\eta_1} t \quad (4)$$

نمودار نیمه لگاریتمی $\log_{10} q$ بر حسب t یک نقطه تقاطع در $\frac{\sigma_1}{3G_1}$ و شیب $\frac{G_1}{2.3\eta_1}$ دارد که G_1 و η_1 حاصل می شود. بر اساس نتایج آزمایش خزش، معادله ۴ به معادله

جدول ۱ پارامترهای خزشی مدل برگر.

η_2 (Pa.sec)	η_1 (Pa.sec)	G_2 (Pa)	G_1 (Pa)
$1/11 \times 10^{15}$	$1/12 \times 10^{14}$	$124/71 \times 10^6$	516×10^6

می‌شود. در مرحله بعد شرایط مرزی اعمال شد. مرزهای چپ و راست در راستای X و مرزهای بالا و پایین در راستای Y ثابت شدند. سپس تنش‌های هیدرواستاتیک موجود در زمین که در بخش قبل محاسبه شدند، وارد نرم‌افزار می‌شود. در نهایت با تنش‌های موجود، مدل اجرا شده و پس از به تعادل رسیدن، حفاری روی آن انجام شد (شکل ۸). پس از حفاری، مدل اجرا شد و مشاهده شد که به دلیل جریان یافتن لایه‌های نمکی در اثر خزش در چاه بعد از گذشت بیش از ۲۳۱ روز حدود ۱۶ cm همگرایی در دیواره چاه مشاهده می‌شود (شکل ۹). به همین دلیل تزریق گل در حین حفاری ضروری خواهد بود.

مدل‌سازی با تزریق گل حفاری

مدل‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهد که با تزریق گل حفاری با وزن مناسب، می‌توان به خوبی جابجایی‌ها و همگرایی‌های به وجود آمده در حین حفاری را کنترل کرد. مدل‌سازی برای گل‌های حفاری با وزن‌های ۹ تا ۲۰ PPG انجام گرفت. نتایج حاصله نشان می‌دهد که سیال حفاری با وزن PPG ۲۰ (حدود ۱۵۰ Pcf) که تنش حدود ۷۶/۵ MPa به دیواره چاه اعمال می‌کند، کاملاً همگرایی را کنترل کرده و چاه را در قطر مورد نظر حفظ می‌کند.

مدل‌سازی عددی رفتار چاه نفت با نرم‌افزار FLAC^{2D}

نرم‌افزار FLAC^{2D} یا Fast Lagrangian Analysis of Continua به معنای تحلیل سریع لاگرانژی محیط پیوسته می‌باشد. FLAC^{2D} توانایی مدل کردن رفتار خاک، سنگ یا دیگر مصالح که ممکن است وقتی به حد تسلیم برسند جریان پلاستیک یابند را داراست. مراحل مدل‌سازی در این نرم‌افزار عبارتند از:

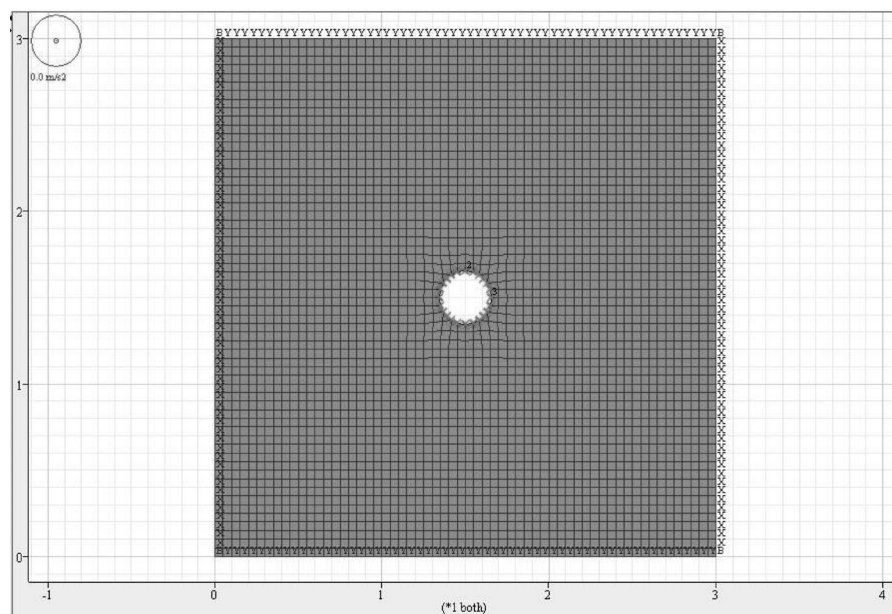
۱- ایجاد مدل اولیه شامل مش بندی، تعریف مدل رفتاری و شرایط مرزی

۲- به تعادل رساندن مدل در شرایط تنش‌های اولیه

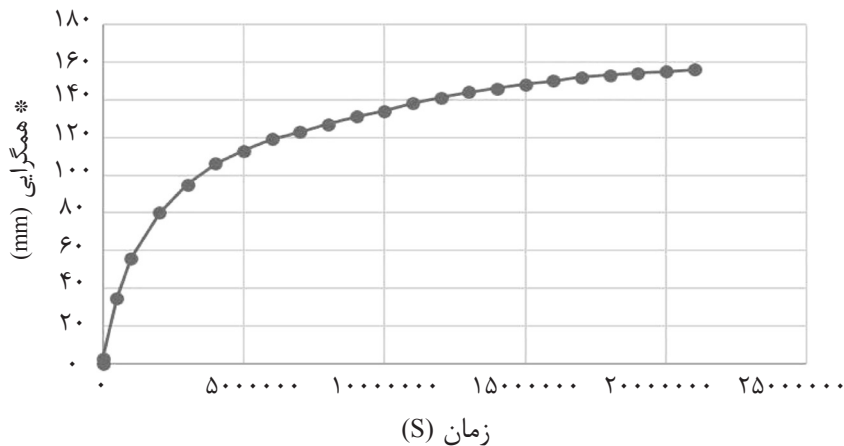
۳- ایجاد تغییرات در مدل اولیه شامل حفاری، نصب نگهداری و ...

۴- گرفتن خروجی و تحلیل نتایج

برای ایجاد هندسه مدل، از یک شبکه مش بندی به ابعاد ۱×۱ m با تعداد ۶۰ ناحیه در راستای x و ۶۰ ناحیه در راستای y استفاده گردید. سپس در مرکز این شبکه، چاهی به قطر ۳۱/۱ cm (۱۲/۲۵ in) ایجاد گردید. پس از این مرحله و رسم هندسه مدل، به معرفی مدل رفتاری و پارامترهای مورد نیاز آن به نرم‌افزار پرداخته شد. مدل رفتاری مورد استفاده در این تحقیق، مدل ویسکوپلاستیک برگر می‌باشد که با نام cvisc در نرم‌افزار FLAC^{2D} شناخته



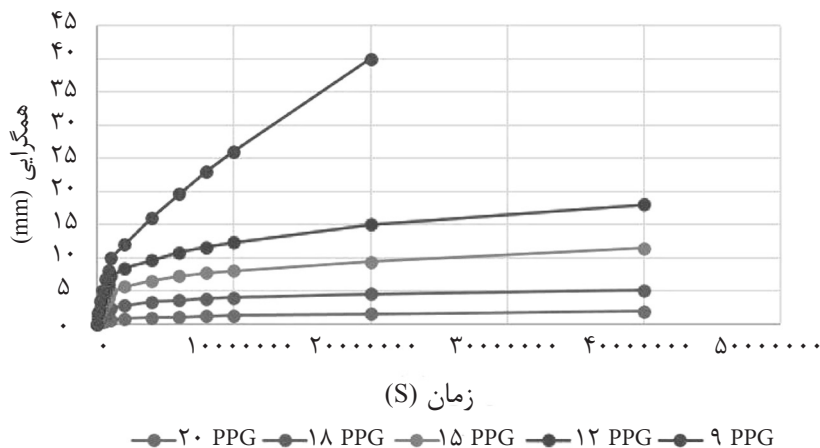
شکل ۸ مدل پس از حفاری.



شکل ۹- همگرایی دیواره چاه بعد از تغییر شکل تقسیم بر ۲
* اختلاف قطر اولیه چاه و قطر چاه بعد از تغییر شکل تقسیم بر ۲

چاه ۱۲/۱ اینچ قطر داشته است در این عمق بر اساس اطلاعات موجود از گل حفاری با وزن Pcf ۱۵۰ (معادل ۲۰ PPG) استفاده شده است و نشان می‌دهد که قطر گمانه در حدود ۵ mm (۰/۲ in) کم می‌شود که با مدلسازی عددی انجام گرفته (در همین وزن گل حفاری ۲۰ PPG) که میزان تغییر قطر حدود ۴/۲ mm (همگرایی ۲/۱ mm) به دست آمد مطابقت می‌کند. لازم به ذکر است این وزن گل مربوط به این عمق است واضح است در لایه هایی که در عمق کمتر و در زون غیر نمکی قرار گرفته‌اند از فشار گل کمتری استفاده می‌شود تا در اثر این فشار شکست در لایه‌ها اتفاق نیفتد.

سیالی با وزن ۱۸ PPG همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌کنید نیز می‌تواند همگرایی دیواره چاه را به خوبی کنترل نماید زیرا در این حالت منحنی حالت افقی گرفته و با افزایش زمان همگرایی تغییر نمی‌کند. در نتیجه استفاده از وزن گل بالاتر اقتصادی به نظر نمی‌رسد. یکی از راه‌های اعتبار سنجی نتایج مدل‌سازی عددی در چاه‌های نفت استفاده از نتایج قطرسنجی است با توجه به موجود بودن نتایج قطر سنجی در این چاه از این اطلاعات استفاده شد بر اساس گزارش‌های قطرسنجی دریافتی از شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب، اندازه مته حفاری در چاه مورد بررسی در عمق ۳۱۹۲ m ۱۲/۳ in بوده و در هنگام قطر سنجی،



شکل ۱۰ تاثیر استفاده از سیالات با وزن‌های مختلف در کنترل همگرایی دیواره چاه (بالاترین نمودار مربوط به سیال حفاری با وزن ۹ پوند بر گالن و به ترتیب دومین نمودار مربوط به وزن گل ۱۲، سومین نمودار ۱۵، چهارمین نمودار ۱۸ و آخرین نمودار مربوط به وزن گل ۲۰ پوند بر گالن است).

انجام شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این شرایط میزان همگرایی لوله جداري در حدی نیست که مچالگی روی دهد (شکل ۱۲). همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، در حالت وجود سیمان کاری مناسب، حداکثر جابجایی در حد 0.3 mm می‌باشد. به همین دلیل سیمان کاری مناسب در پشت لوله جداري ضروری به نظر می‌رسد. به این دلیل که مقاومت لوله‌های جداري در مقابل بار نقطه‌ای به شدت کاهش می‌یابد و سیمان کاری مناسب از وقوع این بار نقطه‌ای جلوگیری می‌کند. لازم به ذکر است حداکثر تنش ون میسز در لوله جداري بر اساس کنتره‌های تنش اصلی حداکثر، حداقل و میانه حاصل از نرم افزار و بر اساس رابطه ۹ مقدار 61 MPa به دست آمده که بسیار کمتر از تنش تسلیم لوله می‌باشد. در نتیجه بعد از سیمان کاری و لوله‌گذاری، همگرایی که در دیواره چاه به وجود می‌آید مشکلی در لوله ایجاد نمی‌کند زیرا تنش تسلیم در لوله مورد اشاره بر اساس جدول ۲ 860 MPa است.

بررسی مقاومت لوله جداري در برابر خزش نمک

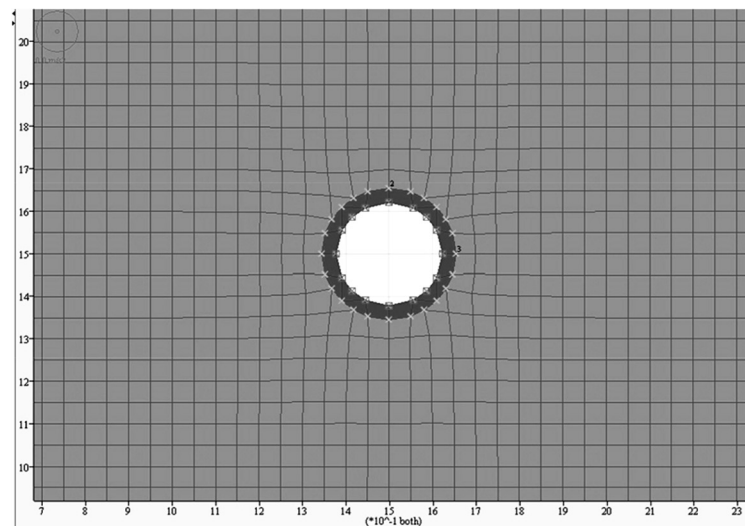
بهترین معیار برای بررسی وضعیت لوله از نظر گسیختگی، معیار Von mises-Henky (یا همان اعوجاج بر اساس انرژی حد) می‌باشد. این معیار با توجه به تنش‌های اصلی $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ و مقاومت تسلیم σ_{Yield} به صورت رابطه ۹ بیان می‌شود [۱۵]:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 2\sigma_{Yield}^2 \quad (9)$$

مقدار رابطه ۹ به تنش‌های Von-Mises معروف است.

به منظور بررسی تاثیر لوله‌های جداري در همگرایی چاه مورد مطالعه، لوله جداري با قطر $9/625 \text{ in}$ مدل‌سازی شد (شکل ۱۱). در ابتدا مدل برای حالتی اجرا شد که پشت لوله جداري، سیمان کاری نشده باشد و در ادامه مدل‌سازی دیگری در حالتی که پشت لوله جداري سیمان کاری شده باشد انجام گرفت. مشخصات مکانیکی لوله جداري و سیمان مورد استفاده در جدول ۲ آورده شده است.

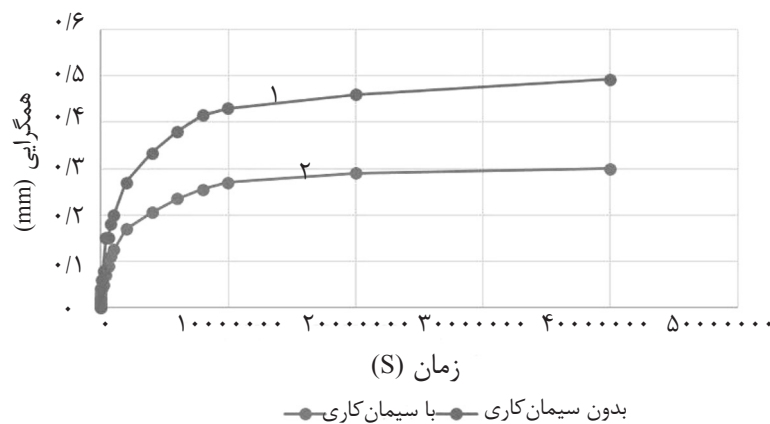
مدل‌سازی در شرایط تنش هیدرواستاتیک $81/39 \text{ MPa}$



شکل ۱۱ مدل‌سازی لوله جداري در حالت وجود سیمان

جدول ۲ پارامترهای مکانیکی سیمان و لوله جداري (فارسی‌مدان، ۱۳۹۰).

مقاومت تسلیم کششی (MPa)	زاویه اتساع (°)	زاویه اصطکاک داخلی (°)	چسبندگی (MPa)	مدول برشی (GPa)	مدول بالک (GPa)	نوع ماده
۴/۸۳	۱۵	۳۰	۱۲/۴	۹/۶	۱۲/۸	سیمان
۸۶۰	-	-	-	۷۷/۸	۱۵۵	لوله جداري



شکل ۱۲ تاثیر لوله جداری در همگرایی دیواره چاه (۱- بالاترین نمودار مربوط به حالت بدون سیمانکاری و ۲- نمودار پایین مربوط به حالت با سیمانکاری است).

نتیجه گیری

گمانه در حدود ۵ mm کم می شود که با نتایج مدل سازی عددی که حداکثر تغییر قطر ۴/۲ mm است، همخوانی دارد.

در مرحله بعد لوله جداری مدل سازی شد و گسیختگی آن مورد تحلیل قرار گرفت. در این حالت مدل سازی برای لوله جداری به قطر ۹/۶۲۵ in انجام شد. نتایج مدل سازی ها نشان داد که در صورت سیمان کاری مناسب پشت فضای حلقوی لوله جداری، خزش نمک ها به تنهایی نمی تواند سبب گسیختگی لوله جداری شود. چنانچه به دلیل عدم سیمان کاری مناسب، خزش نمک سبب بارگذاری نقطه ای بر لوله جداری شود، خزش در این حالت می تواند سبب گسیختگی لوله جداری شود.

تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی شرکت مناطق نفت خیز جنوب انجام شده و از مساعدت مسئولین محترم آن شرکت تشکر و قدردانی می گردد.

در حالتی که حین حفاری گل به داخل چاه تزریق نشود، چاه در اثر جریان یافتن لایه نمکی همگرایی زیادی از خود نشان داده و سبب گیر کردن رشته لوله حفاری می گردد. به همین دلیل باید در هنگام حفاری، گل حفاری با وزن مناسب به داخل چاه تزریق شود. مدل سازی های انجام گرفته نشان داد که در صورت استفاده از سیال حفاری با وزن ۱۸ PPG (۱۳۴ Pcf)، جابه جایی ها در حدی نیست که بتواند در مدت حفاری، مشکلاتی از قبیل گیر کردن لوله های حفاری را ایجاد کند. اما استفاده از گل با وزن کمتر ممکن است در مدت زمان طولانی سبب ایجاد مشکل شده و رشته لوله حفاری در چاه گیر کند. همچنین بر اساس گزارش های قطر سنجی دریافتی از شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب، برای حفاری چاه مورد بررسی در عمق ۳۱۹۲ m از گل حفاری با وزن ۱۵۰ Pcf استفاده شده است. در این حالت نتایج قطر سنجی نشان می دهد که قطر

مراجع

- [۱]. فارسی مدان م، "بررسی اثر خزش سنگ در ایجاد مچالگی لوله‌های جداری در میدان نفتی مارون"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، ایران، ۱۳۹۰.
- [۲]. شیرین‌آبادی ر، "تحلیل پایداری چاه نفت در سازند آسماری، مخزن مارون"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی معدن (استخراج)، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، ایران، ۱۳۸۵.
- [3] Mengjiao Y., Chevevert M. and M.Sharma M., "Chemical-mechanical wellbore instability model for shales: accounting for solute diffusion", Center for Petroleum and Geosystem Engineering, The university of Texas at Austin, CPE2. 502 Austin, 2003.
- [4] Zhao Y. and Zhang Y., "Creep numerical analysis of bedded rock salt gas storage", Instrumentation, Testing and Modeling of Soil and Rock Behavior, pp. 248-255, 2011.
- [5] Wang H. and Samuel R., "Geomechanical modeling of wellbore stability in salt formations", Paper Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Sept. 2 Oct., USA, SPE 166144, 2013.
- [6] Lira W., Gonçalves G., Araujo C., Ramos Junior A. and Frery A., "Thermomechanical effect of vertical well drilling in salt rocks in selected cases", Engineering Computations, Vol. 32, No. 5, pp.1307 – 1322, 2015.
- [۷]. زارعیان جهرمی الف، کریمی نسب س، جلالی فر ح، "تحلیل نرخ همگرایی دیواره چاه‌های نفت در اثر پدیده خزش در سازندهای نمکی"، سومین کنفرانس مهندسی معدن ایران، ۹-۷ بهمن، یزد، ایران، ۱۳۸۸.
- [۸]. توکلی ح، امیرشیرزاد، ب، دشت بزرگی ج، "تاثیر جریان لایه‌های نمک بر پایداری لوله‌های جداری چاه‌های نفتی میدان مارون"، اولین کنفرانس فناوری‌های معدنکاری ایران، ۱۷-۱۵ شهریور، یزد، ایران، ۱۳۹۱.
- [۹]. سلیمانی ب، محمدی ی، "مطالعه سنگ‌شناسی پوش سنگ مخزن آسماری با استفاده از روش‌های چاه‌پیمایی (GR) و پتروگرافی میدان نفتی کوپال"، فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی، سال ۵، شماره ۴، صفحات ۳۰۰-۳۱۰، ۱۳۸۸.
- [۱۰]. دشت بزرگی ج، محمدی ه، صالحی کسای، م. ح، علی محمدی ع، "بررسی دلائل آسیب دیدگی لوله‌های جداری میدان مارون و راه‌حل‌های پیشنهادی، مجله اکتشاف و تولید، شماره ۵۶، صفحات ۴۹-۵۲، ۱۳۸۸.
- [11]. Fredrich J. T. and Fossum A. F., "Large-scale three-dimensional geomechanical modeling of reservoirs: examples from California and the Deepwater Gulf of Mexico", Oil & Gas Science and Technology, Rev. IFP, Vol. 57, No. 5, pp. 423-441, 2002.
- [۱۲]. گزارش‌های منتشر نشده شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب.
- [13]. Itasca, "Manual of FLAC ver. 7.00", 2011.
- [۱۴]. فاروق حسینی م، محمودی دوم نیاسر ح، احمدی م، ساعتی و، "تعیین پارامترهای خزشی سنگ‌های پی سد گتوند به روش آزمایشگاهی و مقایسه آن با مدل‌سازی عددی"، نشریه دانشکده فنی، دوره ۴۲، شماره ۵، ص ۵۷۷-۵۸۶، ۱۳۸۷.
- [۱۵]. کلانتری ف، "مکانیک محیط‌های پیوسته"، انتشارات دانشگاه گیلان، ۱۳۸۰.