مدل‌سازی اثرات ترکیبی جریان‌های آب، یون و حرارت روی پروفیل فشار منفذی در اطراف چاه حفاری شده در سازندهای شیلی

سعید رفیعی‌پور*، سیروس قطبی و محمودرضا پیشوایی
دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی و نفت
saeed_rafeepur@alum.sharif.edu

پژوهش نفت
سال بیست و دوم
شماره ۷۰
صفحه ۶۷-۵۶، ۱۳۹۱
تاریخ دریافت مقاله: ۹۰/۸/۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۱/۳/۲

چکیده

بهینه‌سازی غلظت نمک موجود در سیال حفاری، وزن گل، دما و سایر عوامل به منظور آنالیز صحیح و کامل پایداری دیواره چاه، به ویژه در هنگام حفاری در محیط‌های با دما و فشار بالا و هم چنین حفاری چاه‌های انحرافی ضروری می‌باشد. انتخاب صحیح این پارامترها مستلزم درک صحیح فعل و انفعالات انجام شده بین سیال حفاری و سازند شیلی در هنگام حفاری از درون این سازندها می‌باشد. بررسی‌های میدانی نشان داده که اثرات ترکیبی گرادیان‌های پتانسیل شیمیایی و حرارتی روی جریان سیال، می‌تواند به میزان قابل ملاحظه‌ای فشار منفذی و در نتیجه توزیع تنش نزدیک به دیواره چاه را تحت تأثیر خود قرار دهد در این تحقیق مدلی کامل برای جریان حل شونده، حلال (آب) و حرارت ارائه می‌شود. مدل ارائه شده در این تحقیق، هر دو محلول الکترولیتی یعنی سیال حفاری و سیال موجود در درون سازند را برخلاف متون قبلی که محلول‌ها را ایده‌آل فرض می‌کردند، غیر ایده‌آل فرض کرده است. این فرض به منظور ارائه مدلی صحیح و واقعی از جریان سیال و یون‌ها به درون غشاهای شیلی الزامی می‌باشد. به دلیل وجود اختلاف پتانسیل شیمیایی بین محلول‌های الکترولیتی، آب یا همان حلال می‌تواند از سمت غلظت حل شونده پایین یا از سمتی که پتانسیل شیمیایی آب بالا است، به سمت غلظت حل شونده بالا یا پتانسیل شیمیایی کم، جریان پیدا کند. اثرات گرادیان دمایی روی پایداری دیواره چاه‌های نفتی می‌تواند به ویژه در حفاری‌های انحرافی و ازمیان سازندهای با حرارت و فشار خیلی زیاد، مانند سازندهای واقع شده در مناطق عمیق دریایی و هم چنین چاه‌های عمیق که تغییر اندکی در دمای دیواره چاه باعث مشکلات ناپایداری زیادی می‌شود، بسیار مهم و ضروری باشد. پروفیل فشار منفذی در اطراف چاه از حل معادلات انتقال که در ادامه ذکر می‌شوند، به دست می‌آید.

واژه‌های کلیدی: اثرات شیمیایی و حرارتی، پایداری دیواره چاه، شیل، حرارت و فشار بالا، فشار اسمزی

Archive of SID
www.SID.ir

مقدمه

پایداری دیواره چاه در حین حفاری چاه‌های نفتی و گازی به منظور تولید نفت و گاز، امری بسیار ضروری و مهم است. در این میان، سازندهای شیلی که جزء سنگ‌های رسوبی دانه ریز و حاوی مقادیر زیادی از کانی‌های رسی‌اند، از اهمیت خاص برخوردارند. براساس مطالعات انجام شده حدود ۷۵٪ سازندهای حفاری شده شیلی بوده و بیش از ۹۰٪ مشکلات ایجاد شده در حین حفاری ناشی از وجود شیل‌ها می‌باشد [۱]. خصوصیات متمایز رس‌ها از قبیل حساسیت بالای آنها به آب و تمایل زیاد به متورم شدن، باعث شده تا این سازندها در طول عملیات حفاری جزء سازندهای مشکل‌ساز تلقی شوند. تعدادی از مشکلات معمول ناشی از حضور شیل‌ها عبارتند از: تنگ شدن چاه ناشی از تورم شیل‌ها، گشاد شدن مقطع چاه به دلیل ریزش شیل به درون چاه، گیر افتادن لوله‌های حفاری و در نتیجه ایجاد گشتاور خیلی زیاد و ایجاد شکاف. گل‌های پایه نفتی و گل‌های ترکیبی مثل سیلیکات سدیم باعث می‌شود تورم شیل‌ها کمتر شده و در نتیجه مشکلات مربوط به ناپایداری آنها کاهش یابد. فشار موبینگی بالای ایجاد شده بین گل‌های پایه نفتی و سیال موجود در سازند عامل اصلی محدود کننده جریان فیلتره گل حفاری به درون سازندهای شیلی می‌باشد [۲]. اگر چه استفاده از گل‌های پایه نفتی باعث ایجاد فشار مویین بالا می‌شود، اما به دلیل هزینه بالا و هم چنین خطرات زیست محیطی، استفاده از این سیالات محدود بوده و استفاده از سیالات حفاری با پایه آبی به دلیل هزینه کم و متناسب با محیط زیست بودنشان رو به افزایش می‌باشد [۳]. همانند سیالات پایه نفتی که از عبور فاز آبی به درون شیل جلوگیری می‌کنند، فاز جامد موجود در سیالات حفاری با پایه آبی مانع از جریان آب به درون شیل و متورم شدن آنها می‌شود. به طور کامل به اثبات رسیده که در هنگام حفاری از درون سازندهای شیلی با استفاده از سیالات پایه آبی، علاوه بر اثرات مکانیکی، اثرات شیمیایی و حرارتی نیز پایداری شیل را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. تعدادی از محققین برپایه نتایج آزمایشگاهی به این نتیجه رسیده‌اند که علاوه بر اثرات هیدرولیکی، اثرات شیمیایی و حرارتی نیز باعث جریان سیال به درون یا خارج از سازند می‌شود [۴-۶]. اسمز شیمیایی به اختلاف فعالیت آب بین سیال حفاری و سیال موجود در فضای خالی و نوع حل شونده بستگی دارد. همچنین گرادیان دمایی بین سیال حفاری و سازند به طور مستقیم باعث انتقال حرارت و به طور غیر مستقیم سبب انتقال سیال شده و بدین ترتیب موجب تغییر پروفایل فشار منفذی نزدیک به دیواره چاه می‌شود. سازندهای شیلی اصولاً سازندهای متخلخل اشباع از آبی هستند که دارای تراوایی بسیار کمی می‌باشند (در مقادیر نانودارسی). به دلیل تراوایی بسیار کم این سازندها، انتقال فشار در مقابل انتشار حرارت بسیار کم است [۷]. در حقیقت انتقال هیدرولیکی به مراتب از انتقال شیمیایی و حرارتی کوچک‌تر می‌باشد. ازآنجایی که انتقال حرارت بسیار سریع‌تر از انتقال سیال صورت می‌گیرد، لذا در لحظات ابتدایی شروع واکنش، تغییرات فشار منفذی بیشتر ناشی از گرادیان دمایی می‌باشد [۸]. شواهد آزمایشگاهی زیادی وجود دارد که نشان می‌دهد انتشار حرارت نقش قابل توجهی در تغییر فشار منفذی به ویژه در محیط‌های با دمای بالا نظیر چاه‌های بسیار عمیق بازی می‌کند. اثرات گرادیان پتانسیل شیمیایی روی رفتار شیل‌ها توسط محققین زیادی بررسی شده است [۹ و ۱۰]. Lomba وهمکاران نشان دادند که علاوه براثرات جریان سیال روی پایداری شیل‌ها، جریان یون‌ها نیز پایداری شیل را تحت تأثیر قرار می‌دهد. Lomba و همکارانش مدل بار فضایی[1] را برای جریان یون‌ها به درون شیل ارائه کردند [۱۱]. آنها در مدلشان محلول‌های الکترولیتی را ایده آل فرض کردند (محلول ایده آل به محلولی گفته می‌شود که در آن غلظت حل شونده ناچیز است). مطالعه حاضر به طور کامل اثرات ترکیبی شیمیایی و حرارتی را در نظر گرفته و محلول‌ها را غیر ایده‌آل فرض می‌کند. حل معادلات حاکم بر مسأله به منظور محاسبه فشار منفذی در اطراف دیواره چاه حفاری شده در سازندهای شیلی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این عمل می‌تواند در طراحی بهینه سیال حفاری مؤثر واقع شود.

1. Space- Charge Model

Archive of SID

www.SID.ir

تئوری

برای در نظر گرفتن گرادیان‌های پتانسیل شیمیایی و حرارتی در نفوذ سیال به درون سازندهای شیلی، لازم است پتانسیل شیمیایی را برای محلول‌های غیر ایده‌آل تعریف کنیم. برای سیستم گل حفاری- شیل عبارت مربوط به پتانسیل شیمیایی برای غشاهای شیلی ایده آل به صورت زیر می باشد:

$$\mu^w = \mu^0 + \frac{R\bar{T} ln \bar{a}_w}{\bar{V}_w} \quad (۱)$$

فرض ایده‌آل بودن غشای شیلی تنها در صورتی صحیح است که سیال حفاری پایه نفتی بوده یا سیال حفاری پایه آبی حاوی افزودنی‌های شیمیایی مثل سیلیکات سدیم باشد. به دلیل وجود افزودنی‌های شیمیایی موجود در سیال حفاری قسمتی از ماده حل شونده به دام می‌افتد، ولی در عمل این افزودنی‌ها قادر نیستند مانع نفوذ کامل ماده حل شونده به درون شیل شوند، در نتیجه مقدار کمی از ماده حل شونده به درون شیل نفوذ کرده و باعث انحراف غشای شیلی از حالت ایده‌آل می‌شود. بنابراین در حالتی که مقدار مواد افزودنی در سیال حفاری کم است، مولکول‌های حل شونده می‌توانند به درون شیل نفوذ کنند. در چنین شرایطی این اثر که باعث انحراف از حالت ایده‌آل می‌شود را با ضرب مؤلفه فعالیت پتانسیل شیمیایی در یک فاکتور به نام ضریب انعکاس در نظر می‌گیرند. با اعمال این ضریب رابطه مربوط به پتانسیل شیمیایی به صورت زیر در می‌آید:

$$\mu^w = \mu^0 + \frac{I_m R\bar{T} ln \bar{a}_w}{\bar{V}_w} \quad (۲)$$

در رابطه فوق I_m ضریب انعکاس نامیده می‌شود. این ضریب معیاری از ایده‌آل بودن غشای شیلی می‌باشد. برای غشاهای ایده‌آل مقدار این ضریب برابر یک است. برای سایر غشاها، ضریب انعکاس بین یک و صفر تغییر می‌کند که در این حالت غشا را نیمه تراوا می‌گویند.در نتیجه فشار اسمزی در سیستم شیل- سیال حفاری به صورت زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$\pi = -\frac{I_m RT}{V_{m,w}} \ln\left(\frac{a_2^w}{a_1^w}\right) \quad (۳)$$

پدیده‌های انتقال

رابطه خطی میان نیروهای رانشی X_j وشارهای J_j به صورت زیر قابل تعریف است:

$$J_i = \sum_{i=1}^{n} L_{ij} X_j \quad (٤)$$

رابطه فوق را معادله پدیده‌ای یا عارضه‌ای می‌نامند. در این رابطه L_{ij}ها ضرایب جفت کننده نامیده می‌شوند که شار نوع i را به گرادیان نوع j مرتبط می‌کنند. در جریان سیال درون محیط متخلخل، نیروهای رانشی معمولاً گرادیان‌های فشار، دما، پتانسیل الکتریکی و غلظت نمک می‌باشند.

در ترمودینامیک نزدیک به حالت تعادل که نیروهای رانشی یا همان گرادیان‌ها کوچک هستند، معادله پدیده‌ای یا عارضه‌ای به صورت زیر در می‌آید [۱]:

$$\begin{bmatrix} J_v \\ J_D \\ I \\ q_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & 0 \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nabla P \\ \nabla \pi \\ \nabla \emptyset \\ \nabla T \end{bmatrix} \quad (۵)$$

که در این رابطه J_D جریان نسبی حل شونده نسبت به حلال می‌باشد و برابر است با:

$$J_D = \frac{J_s}{C_s} - J_v \quad (٦)$$

رابطه بین L_{ij} و K_{ij} به قرار زیر است:

$$K_{11} = L_{11} \; K_{12} = \frac{L_{12}}{C_s} - L_{11} \quad K_{13} = L_{13} \quad K_{21} = \frac{L_{21}}{C_s} - L_{11}$$

$$K_{22} = \frac{L_{22}}{C_s^2} - \frac{L_{21}}{C_s} - \frac{L_{12}}{C_s} + L_{11}$$

در شرایط نزدیک به حالت تعادل، براساس روابط تقارن یا برگشتی Onsager، ضرایب ضربی باید با برابر باشند، یعنی: $L_{ij}=L_{ji}$. تعدادی از نتایج آزمایشگاهی، انحرافاتی را از قانون تقارن Onsager نشان داده است که در آن از اثرات گرادیان‌های فشار، پتانسیل الکتریکی و پتانسیل شیمیایی روی انتقال حرارت صرف نظر می‌شود. هم چنین فرض می‌شود که جریان الکتریکی با گرادیان دما تغییری پیدا نمی‌کند. در نتیجه شار حرارت را می‌توان از قانون رسانایی حرارتی فوریه به دست آورد:

$$q_h = -k^T \nabla T \quad (۷)$$

در رابطه فوق k^T را ضریب رسانندگی حرارتی می‌نامند. شایان ذکر است که به دلیل تراوایی پایین سازندهای شیلی، انتقال حرارت از طریق فرآیند همرفتی یا جابه‌جایی، قابل صرف نظر کردن می‌باشد.

ضرایب عارضه‌ای یا پدیده‌ای برای ژئومتری‌های مشخص مثل لوله‌های کوچک مویین، از طریق حل عددی معادلات زیر قابل محاسبه می‌باشد: ناویر-استوکس (NSE)،

Archive of SID
www.SID.ir

نرست- پلانک (NPE) و پواسون- بولتزمن (PBE).

Cross و Osterle (۱۹۹۸) مدل بار فضایی را برای محیط متخلخل باردار ارائه کرده و معادلاتی را برای ۹ مؤلفه تانسور ضرایب پدیده ای استخراج نمودند [۱۲].

مدلی برای انتشار حل شونده

در این قسمت مدلی برای انتشار ماده حل شونده در محیط متخلخل اشباع ارائه می‌شود. شکل ۱ دستگاه مختصات استوانه‌ای (الف) و حجم کنترل حاکم بر مسأله (ب) را نشان می‌دهد. معادله جریان حل شونده از درون شیل با در نظر گرفتن اثرات شیمیایی و هیدرولیکی عبارتست از:

$$J_s = -L_I(\nabla P - \nabla\pi) + L_{II}\left(-\frac{\nabla\pi}{C_s}\right) \quad (۸)$$

در رابطه بالا، L_I و L_{II} از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$L_I = L_{21} - \frac{L_{23}L_{31}}{L_{33}} \qquad L_{II} = L_{22} - \frac{L_{23}L_{32}}{L_{33}} \quad (۹)$$

معادله انتشار حل شونده در محیط متخلخل به صورت زیر است:

$$\acute{C}_0\left(\frac{1}{r}\frac{\partial C_s}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_s}{\partial r^2}\right) = \frac{\partial C_s}{\partial t} \quad (۱۰)$$

که در معادله بالا ç' صورت $\acute{c}_{.} = \frac{D_{eff}}{\varphi}$ تعریف می‌شود. همچنین D_{eff} در رابطه فوق، ضریب انتشار مؤثر [۱۳] می‌باشد که تابعی از غلظت حل شونده درون شیل می‌باشد و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$D_{eff} = -\frac{I_m RT}{V_{m,w}}\frac{\acute{f}(C_s)}{f(C_s)}\left(\frac{L_{II}}{C_s} - L_I\right) \quad (۱۱)$$

مدلی برای انتشار فشار منفذی

مسائل ناپایداری دیواره چاه‌های نفتی زمانی ایجاد می‌شود که به دلیل فعل و انفعال بین سازند و سیال حفاری، فشارمنفذی سیال درون سازند متحمل تغییراتی شود. این تغییرات به دلیل گرادیان‌های فشار هیدرواستاتیک، فشار اسمزی و دمایی ایجاد می‌گردد. در این بخش، پروفیل فشار منفذی براساس مدلی که در ادامه می‌آید، محاسبه می‌شود.

معادله جریان آب درون شیل با در نظر گرفتن اثرات شیمیایی و حرارتی به صورت زیر است:

$$J_v = K_I(-\nabla P) + K_{II}(-\nabla\pi) + K^T(-\nabla T) \quad (۱۲)$$

در رابطه بالا K^T ضریب اسمز حرارتی نامیده می‌شود. با جایگزین کردن عبارت مربوط به گرادیان فشار اسمزی در رابطه فوق و قرار دادن آن در معادله پیوستگی سیال، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$K_I\left(\frac{1}{r}\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial^2 P}{\partial r^2}\right) + \frac{K_{II}I_m RT}{V_{m,w}}\frac{\acute{f}(C_s)}{f(C_s)}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial C_s}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_s}{\partial r^2}\right) + K^T\left(\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2}\right) = c_t\varphi\frac{\partial P}{\partial t} \quad (۱۳)$$

که در این معادله K_I و K_{II} از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$K_I = K_{11} - \frac{L_{13}L_{31}}{L_{33}} \qquad K_{II} = K_{12} - \frac{L_{13}L_{32}}{L_{33}} \quad (۱۴)$$

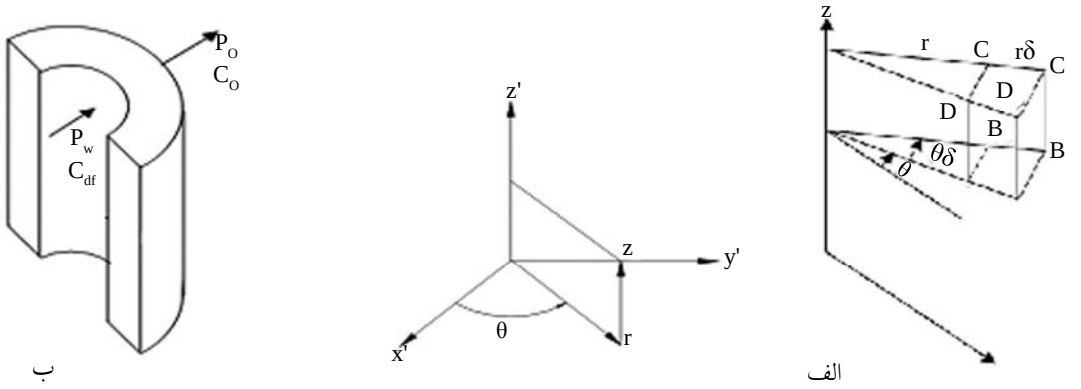
K_I و K_{II} به ترتیب ضریب هیدرولیکی و ضریب بازدهی غشایی نامیده می‌شوند.

مدل انتشار حرارت

معادله انتشار حرارت [۱۴] در مختصات استوانه‌ای به صورت زیر است:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = C^h\left(\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2}\right) \quad (۱۵)$$

که در رابطه فوق C^h را ضریب نفوذپذیری حرارتی می‌نامند و عبارتست از: $C^h = \frac{k^T}{\rho c_p}$.



شکل ۱- (الف) دستگاه مختصات استوانه‌ای و (ب) حجم کنترل حاکم بر مسأله

Archive of SID

www.SID.ir

شرایط اولیه و مرزی حاکم بر مسأله

سه شرط اولیه و شش شرط مرزی جهت محاسبه پروفیل‌های غلظت حل شونده، فشار و دما در یک محیط متخلخل موردنیاز می‌باشد. این شرایط در زیر ارائه شده است:

$$P(r,t)=P_0 \quad Cs(r,t)=C_0 \quad T(r,t)=T_0 \quad \text{at } t=0$$

$$P(r,t)=P_w \; Cs(r,t)=C_{df} \; T(r,t)=T_w \; \text{at } r=0 \text{ or } t>0 \qquad (16)$$

$$P(r,t)=P_0 \; Cs(r,t)=C_0 \; T(r,t)=T_0 \; \text{at } r=L \text{ for } t>0$$

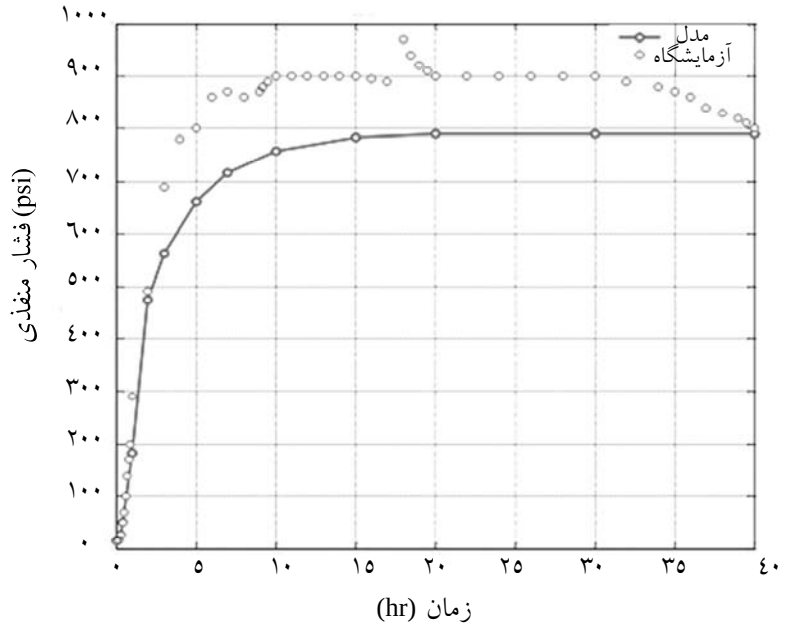
در این جا شرایط مرزی از نوع فشار ثابت فرض شده که جزء شرایط مرزی نوع دیریکله[1] می‌باشد.

نحوه حل معادلات و پارامترهای ورودی مدل

روش اجزای محدود به طور گسترده در مطالعات مکانیکی زمین مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش به عنوان یک روش مناسب در حل مسائل ژئومکانیکی و خصوصاً در حالتی که مرزهای نامنظم وجود دارد، کاربرد دارد. این روش بسیار زمان‌بر و به لحاظ محاسباتی بسیار پر هزینه می‌باشد. بنابراین در مطالعه حال حاضر از روش تفاضل محدود کاملاً ضمنی[2] برای حل معادلات ذکر شده در بخش‌های قبلی استفاده شده است. بدین منظور برنامه‌ای کامپیوتری در محیط نرم‌افزار MATLAB نوشته و اجرا گردیده است. در اینجا حل معادلات انتشار سیال، ماده حل شونده و حرارت به طور هم زمان و بر اساس یک روش تکراری[3] انجام شده است. صحت مدل نیز با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی موجود در پایان‌نامه دکترای یو [۳] در دانشگاه تگزاس-آستین ارزیابی و اعتبار سنجی شده است (شکل ۲). داده‌های موردنیاز برای اجرای مدل در جدول ۱ ارائه گردیده است.

نتایج و بحث

در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل ارائه می‌گردد. در این جا دو محلول یکی حاوی NaCl و دیگری حاوی $CaCl_2$ در شبیه‌سازی مدل استفاده شده است. نمودار فعالیت آب- غلظت حل شونده برای هرکدام از این محلول‌ها در شکل ۳ نشان داده شده که عموماً از منبع شماره [۳] استخراج شده‌اند. به دلیل گرادیان ژئوترمال، معمولاً دمای سیال حفاری که در ابتدا به ته چاه می‌رسد، از دمای سنگ سازند پایین‌تر است.



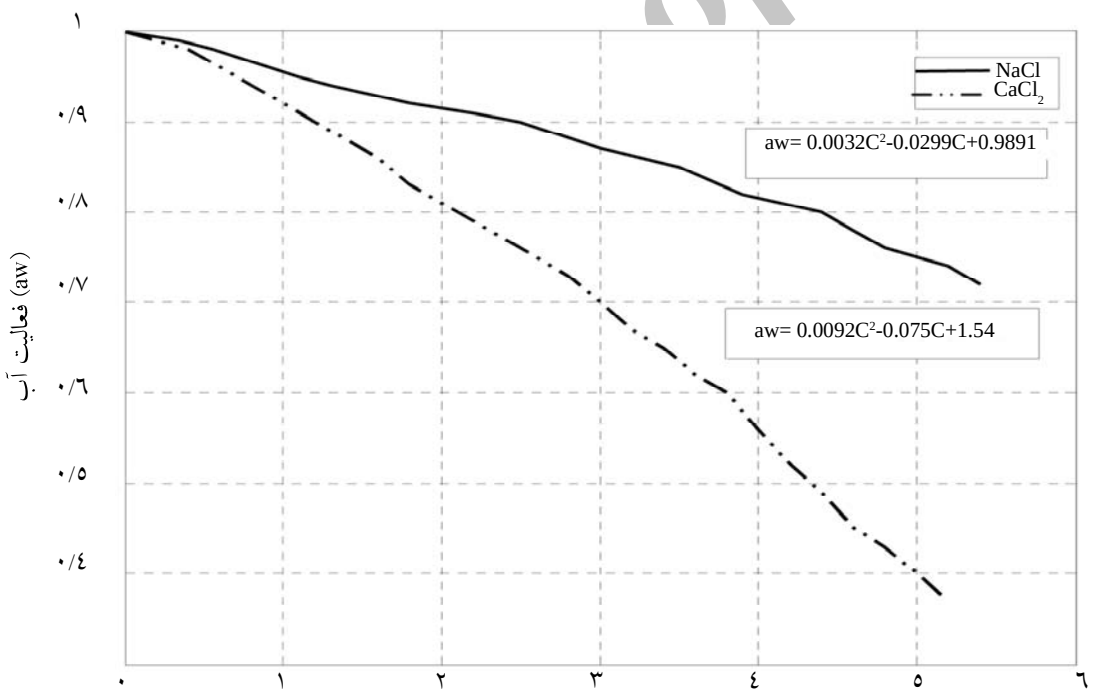
شکل ۲- اعتبار سنجی مدل ارائه شده در مطالعه حاضر با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی

1. Dirichlet
2. Fully Implicit Finite Difference Method
3. Iterative

Archive of SID
www.SID.ir

جدول۱– داده‌های ورودی مدل [۳ و ۷]

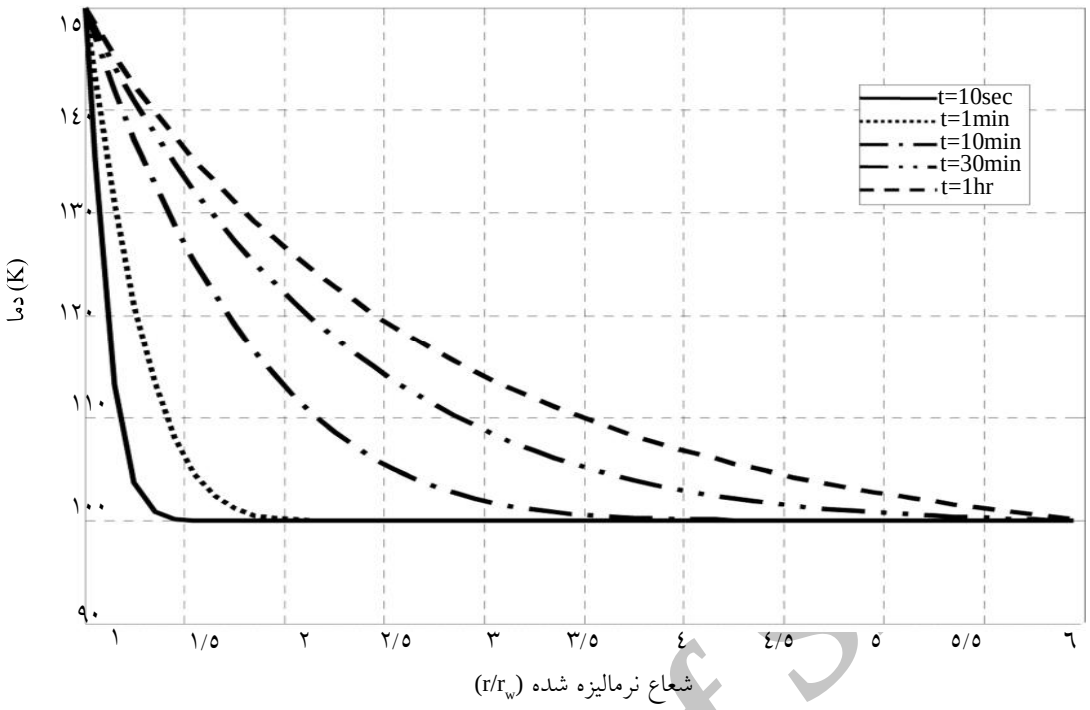
متغیر	مقدار	متغیر	مقدار
فشار سیال حفاری	11MPa	ضریب انعکاس	1, 0.11
فشار سازند	9.8MPa	ضریب نفوذپذیری حرارتی	$9.5\times10^{-6}m^2/sec$
دمای چاه	150^oC	تراوایی	$7.66e\text{-}20m^2$
دمای سازند	100^oC	ویسکوزیته	3e-4 Pa.sec
غلظت نمک در چاه	0.01M, 5M	تراکم‌پذیری سیال	$4e\text{-}10\ Pa^{-1}$
غلظت نمک در سازند	0.01M, 5M	تراکم‌پذیری سنگ	$2.61\ Pa^{-1}$
گرادیان زمین گرمایی	$0.03^oC/m$	ضریب تراوش حرارتی	$-6e\text{-}11, 6e\text{-}11m^2/sec^oC$
تخلخل	0.25	زمان	10sec,1min,10min,30min,1hr
عمق	10000ft	دانسیته سنگ	$2500kg/m^3$
دمای سطح	$75^oF=24^oC$	L_I	6.5573e-14 molsec/kg
حجم مولی آب	0.01802	L_{II}	$2.3389e\text{-}10\ mol^2sec/kgm^3$
ثابت جهانی گازها	$8.314J/mol^oK$	K_I	$k/\mu=M^3sec/kg$
شعاع چاه	0.1m	K_{II}	$I_m\ k/\mu=M^3sec/kg$



شکل ۳– نمودار فعالیت آب بر حسب غلظت حل شونده برای NaCl و $CaCl_2$

به دلیل پایین بودن دمای گل، انتقال حرارت از سازند به درون چاه صورت می‌گردد و به تدریج دما در اطراف چاه کاهش می‌یابد که این عمل باعث می‌شود تنش درون سازند نزدیک به دیواره چاه کاهش یابد. وقتی چاه عمیق‌تر می‌شود، همان بخش به تدریج گرم‌تر شده و ممکن است از دمای سازند نیز فراتر رود. در این حالت انتقال حرارت از چاه به درون سازند انجام شده و به تدریج همان گونه که در شکل ٤ نشان داده شده دمای نزدیک به دیواره چاه افزایش می‌یابد.

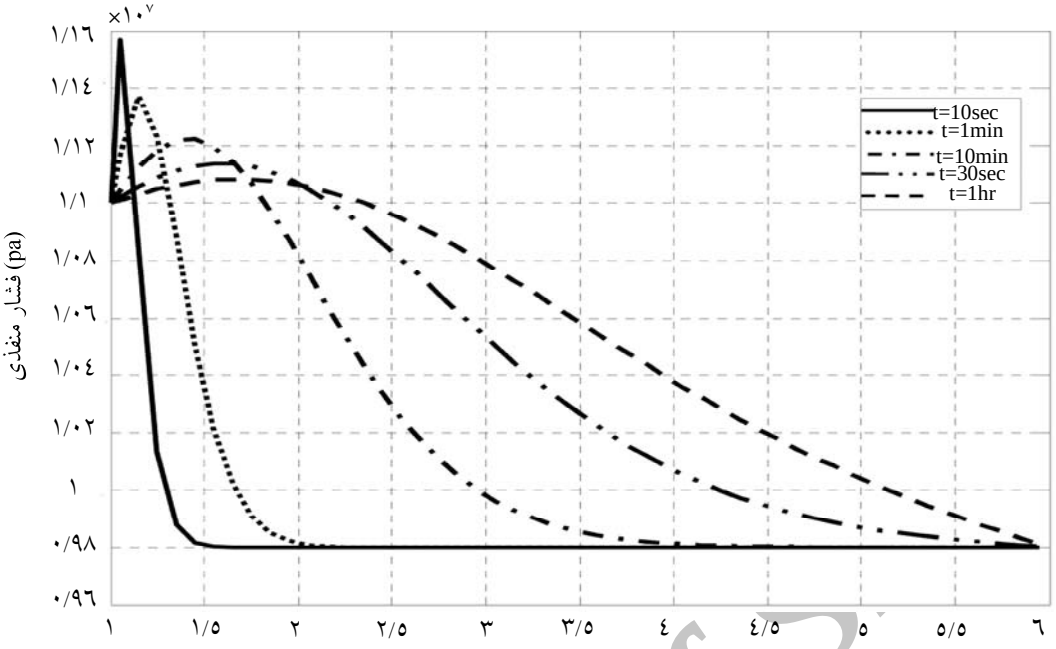
www.SID.ir



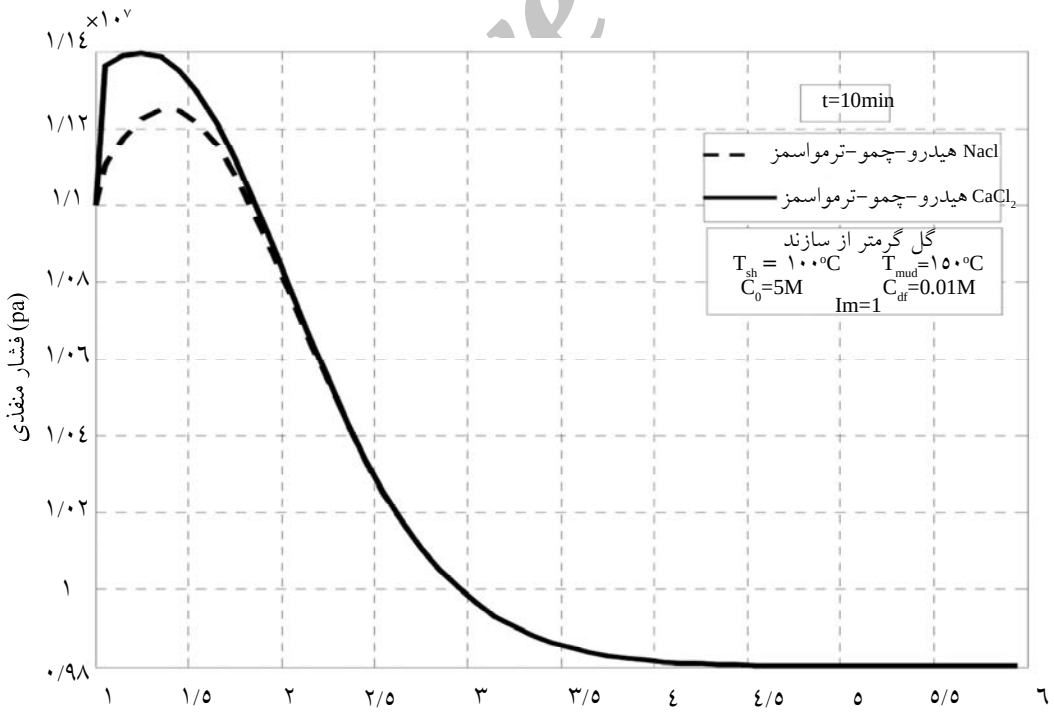
شکل ٤- نمودار تغییرات دما درون سازند با زمان

بـه منظور مطالعه اثرات فرآیندهای تراوش شـیمیایی و حرارتی، یک چاه قائم (با شـعاع rw= ۰/۱ m) حفاری شده از درون سـازند شـیلی با خصوصیات مکانیکی، شیمیایی و حرارتـی داده شـده در جـدول ۱ را در نظـر می‌گیریم. زمانـی که K^T کوچک‌تر از صفر اسـت [۱۵]، جهت جریان اسمزی ناشـی از گرادیان حرارتی (سـیال) از سمت دمای بیشتر به سمت دمای کمتر انجام می‌شود. اما هنگامی که K^T بزرگ‌تر از صفر اسـت، سیال از سمت دمای کمتر به سمت دمای بیشـتر می‌رود. سیستم شیل- سیال حفاری را در نظر می‌گیریم؛ اگر K^T و ∇T هر دو مثبت (∇T مثبت یعنی سـرد شـدن سـازند) و یا هر دو منفی (∇Tمنفی یعنی گرم شدن سـازند) باشند، جریان سـیال همواره به درون شیل بوده و در نتیجه فشار منفذی افزایش می‌یابد؛ اما اگر K^T و ∇T، هم علامت نباشند، سـیال همواره به سمت خارج شیل جریان داشـته و در نتیجه فشـار منفذی در اطراف چاه کاهش پیدا خواهد کرد. شـکل۵ اثر تراوش حرارتی روی فشار منفذی برای حالتی که سـیال حفاری از شیل سـازند گرم‌تر است (یعنی گرادیان دمایی منفی) و ضریب تراوش حرارتی منفی اسـت، را برای زمان‌های ۱۰ ثانیه، ۱ دقیقـه، ۱۰ دقیقه، ۳۰ دقیقه و ۱ سـاعت نشـان می‌دهد. مطابق این شـکل، فشار منفذی در نزدیک دیواره چاه با افزایش زمان افزایش یافته و در نتیجه تنش موثر در اطراف چاه کاهش می یابد. شـکل ٦ تغییرات فشار منفذی در نزدیک دیواره چاه، ناشی از ترکیب اثرات هیدرولیکی، شـیمیایی و حرارتی را برای محلول‌های NaCl و $CaCl_2$ نشان می‌دهد. در این جا غلظت حل شونده در سـازند بیشتر از سیال حفاری فرض شده است. شکل ۷ مقایسـه بین اثرات مختلف را نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود، تأثیر گرادیان دما روی پروفیل فشار منفذی به نسـبت گرادیان هیدرولیکی و گرادیان پتانسیل شیمیایی بسـیار بیشتر است، که دلیل آن نفوذپذیری پایین سازندهای شیلی می‌باشد. شکل ۸ پروفیل فشار منفذی برای حالتی که دمای سـازند از دمای چاه بیشـتر بوده و گرادیان دما مثبت می‌باشـد را در شرایطی که تمامی اثرات در نظر گرفته شده، نشـان می دهد. در شکل ۹ نیز حالتی که در آن غلظت حل شـونده در سیال حفاری بیشتر از سیال درون سازند است با حالتی که غلظت حل شونده درسیال حفاری کمتر از غلظت سیال درون سازند است، مقایسه شده است. هم چنین شکل ۱۰ تاثیر ضریب انعکاس غشای شیلی را روی فشار منفذی برای مقادیر Im =۰/۱۱ و Im =۱ نشـان می‌دهد. مطابق این شکل، ضریب انعکاس بالاتر باعث می‌شود تا عبور یون‌ها از غشـا کم‌تر شود و در نتیجه آب می‌تواند راحت تر و بیشتر از غشا عبور کرده و فشار منفذی در اطراف چاه را افزایش دهد.

Archive of SID
www.SID.ir

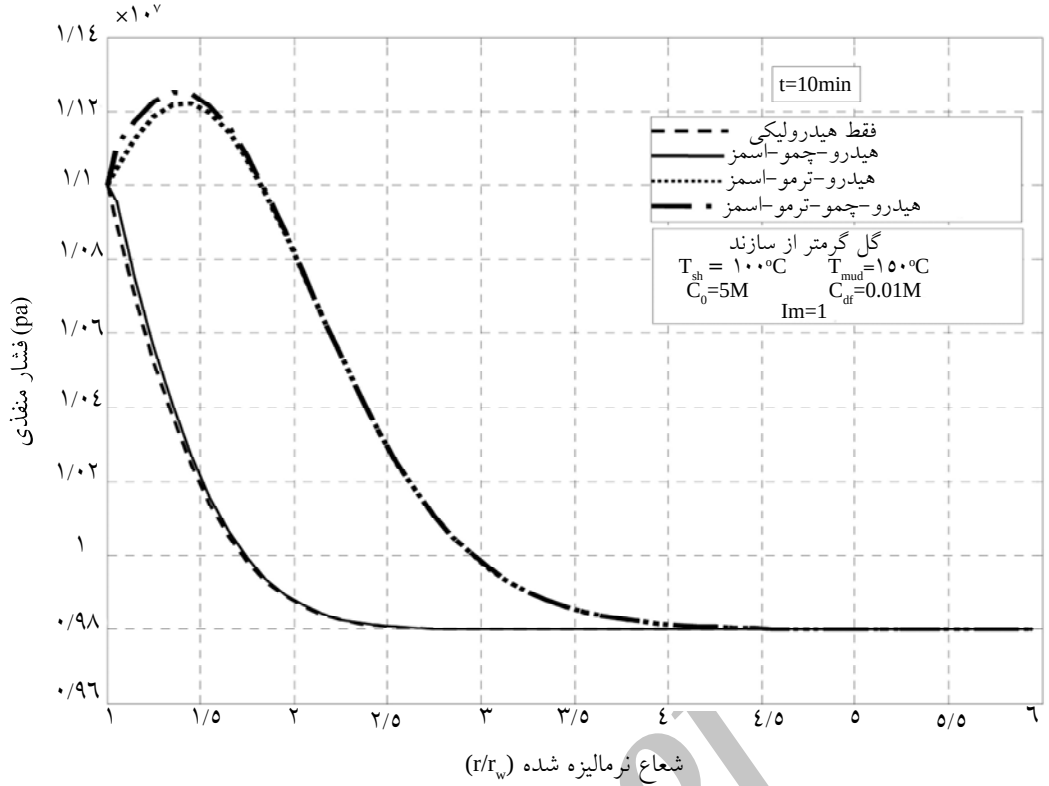


شکل۵- نمودار پروفیل‌های فشار منفذی در اطراف چاه حفاری شده در سازند شیلی در زمان های مختلف ($T_{sh}=100^oC$ و $T_m=150^oC$ گل گرم‌تر از سازند)

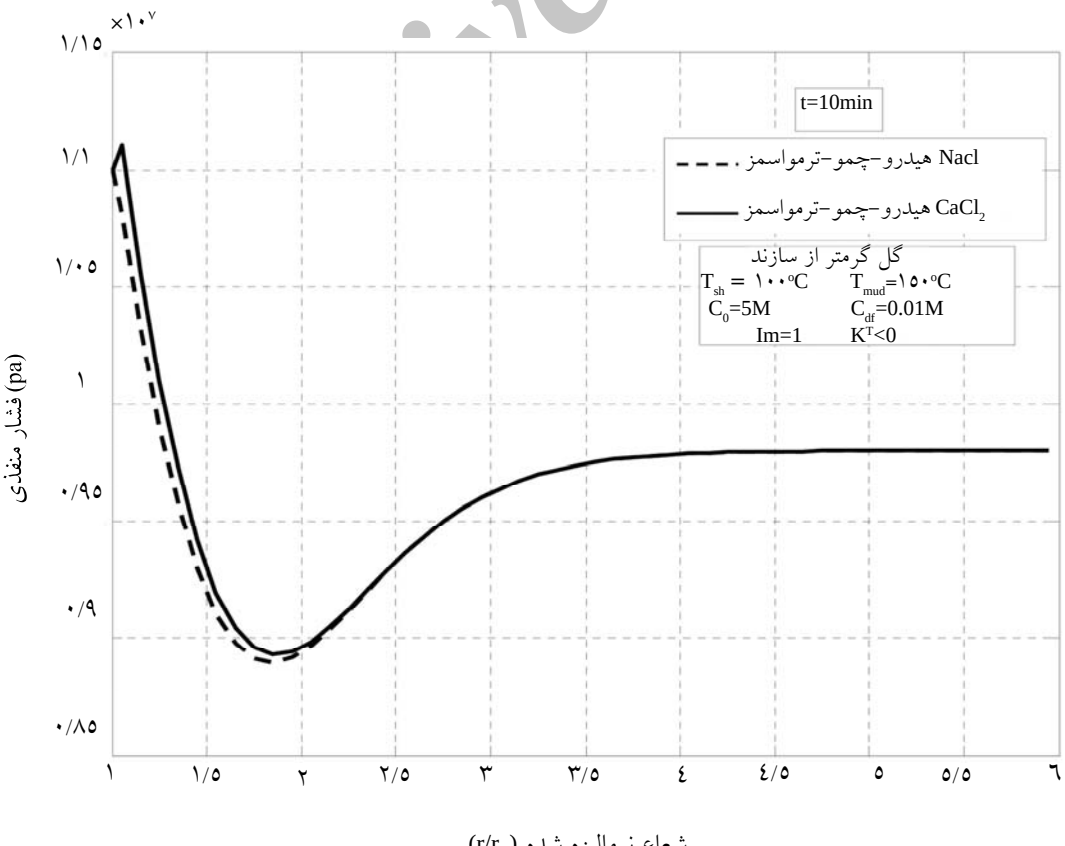


شکل٦- نمودار پروفیل‌های فشار منفذی (در حالتی که اثرات ترکیبی فشار هیدرولیکی، شیمیایی و حرارتی در نظر گرفته شده است) برای محلول‌های NaCl و $CaCl_2$

www.SID.ir

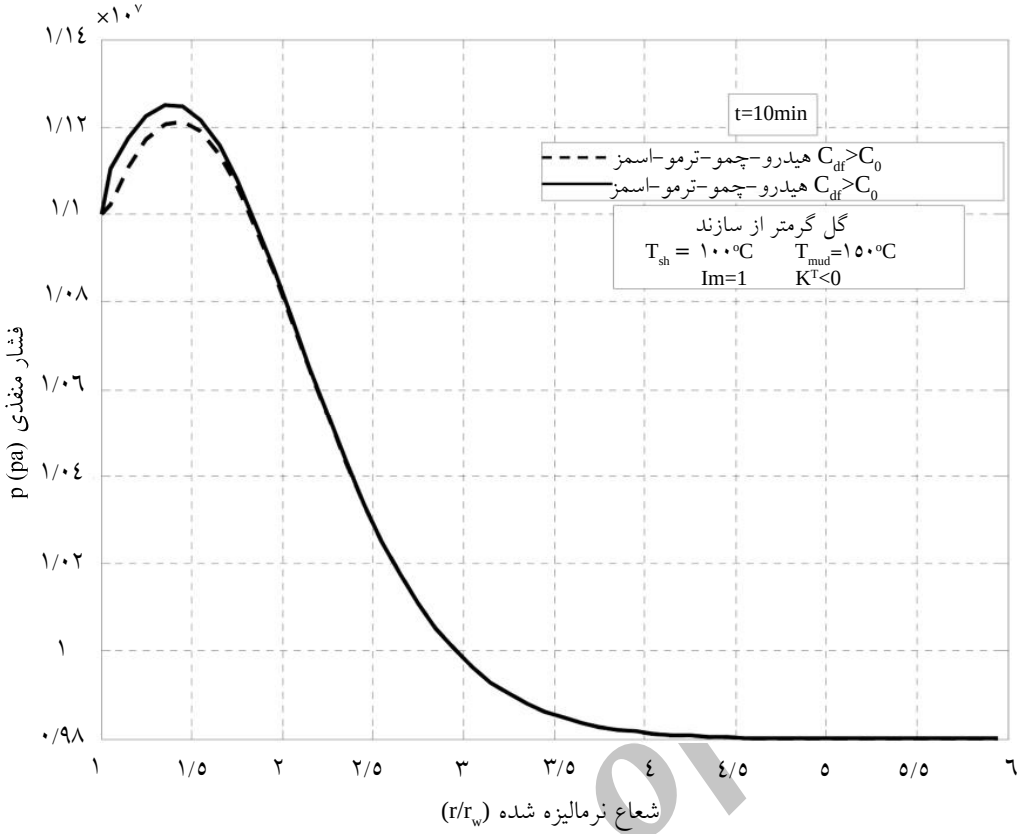


شکل۷- نمودار مقایسه بین اثرات مختلف روی پروفیل فشار منفذی در اطراف چاه حفاری شده در میان سازند شیلی

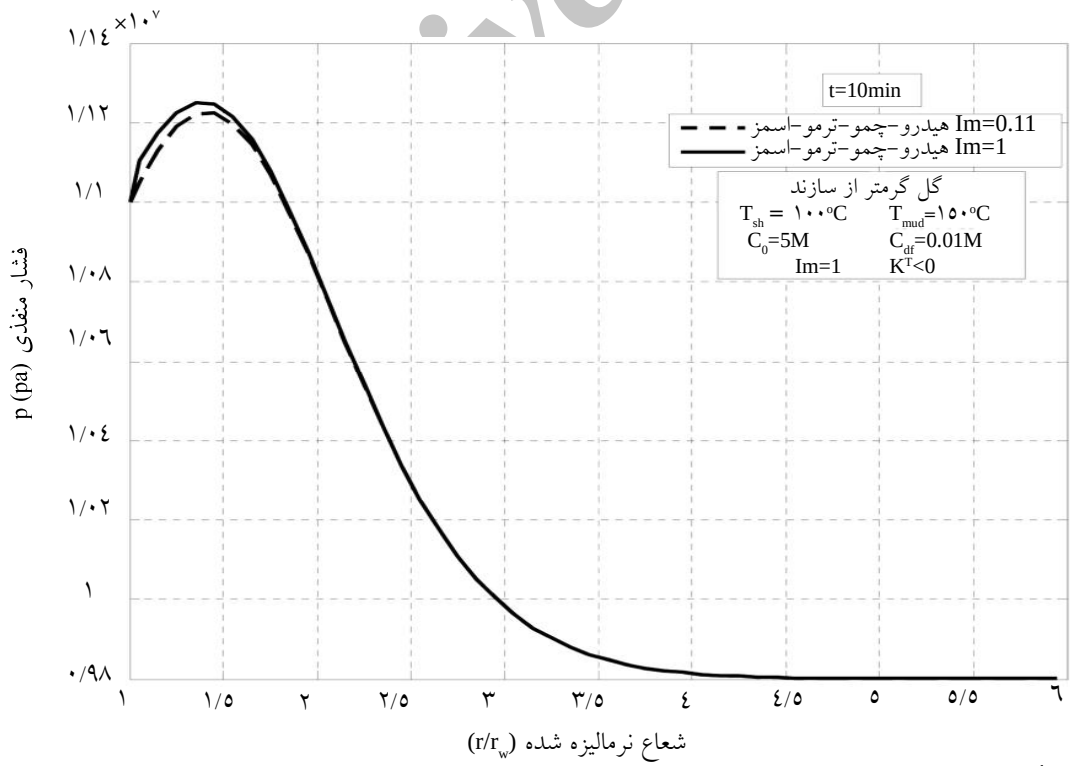


شکل۸- پروفیل فشار منفذی (برای حالتی که دمای سازند از دمای چاه بیشتر بوده و در نتیجه گرادیان دما مثبت می‌باشد و در شرایطی که تمامی اثرات در نظر گرفته شده است)

www.SID.ir



شکل۹- اثر تفاوت غلظت حل شونده در سیال حفاری و سیال سازند (با در نظر گرفتن اثرات ترکیبی هیدرولیکی، شیمیایی و حرارتی)



شکل۱۰- تأثیر ضریب انعکاس غشای شیلی روی فشار منفذی برای مقادیر Im=۰/۱۱ و Im=۱ (با در نظر گرفتن اثرات ترکیبی هیدرولیکی، شیمیایی و حرارتی)

www.SID.ir

نتیجه‌گیری

در انجام مطالعه حاضر نتایج زیر حاصل شد:

۱- به دلیل وجودگرادیان ژئوترمال، سیال حفاری در ابتدا که به ته چاه می‌رسد، دارای دمایی پایین‌تر از سازند است. بنابراین، در ابتدا انتقال حرارت از سازند به چاه صورت می‌گیرد . هرچه چاه عمیق‌تر می‌شود، به تدریج همان بخش از چاه گرم‌تر می‌گردد که این امر سبب می‌شود تا گرادیان دمایی منفی شود. این عمل منجر به جریان سیال از چاه به سمت سازند می‌شود که این خود فشار منفذی را در ناحیه‌ای نزدیک به دیواره چاه افزایش داده و تنش مؤثر در این ناحیه کاهش می‌یابد.

۲- نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در لحظات اولیه شروع حفاری در سازندهای شیلی، تأثیر اثرات حرارتی روی فشار منفذی بسیار بیشتر از اثرات هیدرولیکی و شیمیایی می‌باشد. به این دلیل که در این سازندها به دلیل تراوایی پایین، انتقال حرارت عموماً سریع‌تر از انتقال فشار و انتقال ماده حل شونده انجام می‌شود.

۳-نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تغییر فشار منفذی در اطراف دیواره چاه‌های حفر شده در سازندهای شیلی نه تنها تابعی از مقدار و علامت گرادیان دمایی است، بلکه تابعی از مقدار و علامت ضریب تراوش حرارتی نیز می‌باشد.

٤- همچنین در بررسی اثر غلظت حل شونده در سیال حفاری در مقایسه با سیال موجود در درون سازند نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که اگر غلظت حل شونده در سیال حفاری بیشتر از سازند باشد، آب از سازند به سمت خارج حرکت کرده و در نتیجه فشار منفذی درون سازند کاهش می‌یابد.

۵- اثر ضریب انعکاس روی پروفیل فشار منفذی در اطراف چاه نیز در شبیه‌سازی مدل مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که با افزایش ضریب انعکاس غشای شیلی، حرکت یون‌ها به درون سازند کمتر شده و آب راحت‌تر می‌تواند از میان شیل عبور کند. در نتیجه فشار منفذی افزایش می‌یابد و به تبع آن حداقل وزن گل لازم برای جلوگیری از ریزش دیواره چاه بیشتر می‌شود.

٦- نتایج همچنین نشان می‌دهد که فشار منفذی در اطراف چاه در حالتی که ماده حل شونده در سیال حفاری و سازند، NaCl باشد، نسبت به حالتی که ماده حل شونده $CaCl_2$ است، در شرایط مساوی افزایش کمتری را نشان می‌دهد، که این خود بدین معنی است که استفاده از کلرید کلسیم به جای کلرید سدیم به منظور مقابله با مشکلات ناپایداری چاه در سازندهای شیلی ارجحیت دارد.

علائم ونشانه‌ها

t= زمان (s)

T= درجه حرارت (^oC)

T_o= دمای اولیه سازند (^oC)

T_w= دمای چاه (^oC)

ϕ= تخلخل (fraction or ٪)

C^h= ضریب نفوذپذیری حرارتی (m^2/s)

K^T= ضریب تراوش حرارتی ($(m^2/s(mol/lit)$)

Im= ضریب انعکاس

ρ= چگالی (kg/m^3)

GG= گرادیان زمین گرمایی ($^oC/m$)

a_w= فعالیت آب

$V_{m,w}$= حجم مولی آب (m^3/mol)

C_f= تراکم‌پذیری سیال (Pa^{-1})

C_r= تراکم‌پذیری سنگ (Pa^{-1})

C_t= تراکم‌پذیری کلی سازند (Pa^{-1})

C_o= غلظت اولیه ماده حل شونده در سازند (mol/lit)

C_{df}= غلظت ماده حل شونده در چاه (mol/lit)

C= غلظت ماده حل شونده در سازند (mol/lit)

D_{eff}= ضریب نفوذ مؤثر یون‌ها (m^2/s)

K_I= ضریب تراوایی (m^3s/kg)

K_{II}= ضریب بازدهی غشایی (m^3s/kg)

K= تراوایی (m^2)

μ= ویسکوزیته (Pa.S)

P= فشار منفذی (Pa)

P_o= فشار اولیه (Pa)

P_w= فشارچاه (Pa)

r= فاصله شعاعی از مرکز چاه (m)

r_w= شعاع چاه (m)

R= ثابت جهانی گازها 8.314 (J/moloK)

Archive of SID
www.SID.ir

مراجع

[1] Abbas H., Shebatalhamd A., khan M., Al-Shobaili Y., Ansari A. , Ali S., and mehta (Saudu Aramco) S., "*Wellbore instability of shale formation"*, Uuluf field, Saudi Arabia,SPE 106345, 2006.

[2] Osuji, Collins Emenike. "*Effect of porosity and permeability on the membrane efficiency of shales*", The university of Texas at Austin, pp. 1-2, 2008.

[3] Yu Mengjiao, *Chemical and Thermal Effects on Wellbore Stability of Shale Formations*, The University of Texas at Austin, August, 2002.

[4] Hanshaw B. B., Zen E. "*Osmotic equilibrium and overthrust faulting*", Geol. Soc. Am. Bull. 76, pp. 1379– 1387, 1965.

[5] Chenevert M. E ,"*Shale control with balanced-activity oil-continuous muds*", J. Pet. Technol., pp. 1309– 1316, October 1970.

[6] Carminati S., Brignoli M., Marco A.Di., Santarelli F.J., "*The activity concept applied to shales: consequences for oil, tunneling and civil engineering operations*", Int. J. Rock Mech. Min., pp. 3– 4, Paper No. 038. 1997.

[7] Ghassemi A. and Diek A.,"*Porothermoelasticity for swelling shale*", J.of Pet.Sci. and Eng.,34, pp. 123-124 December 2002.

[8] Zhai Z., Zaki K., Marinello S. and Abou-Sayed A. ,"*Coupled Thermo- poromechanicsl Effects on Borehole Stability*", Society of Petroleum Engineers, SPE 123427, October,2009.

[9] Mody F.K. and Hale, A.H., "*A borehole stability model to couple the mechanical and chemistry of drilling fluid shale interaction*", Amsterdam : Presented at the SPE/IADC Drilling Conference, SPE paper 25728, pp. 23– 25, February 1993.

[10] Onaisi A., Audibert A., Bieber M.T., Bailey L., Denis J. and Hammond P.S., "*X-ray tomography visualization and mechanical modeling of swelling shale around the wellbore*", J. Pet. Sci.Eng.9, pp. 313– 3291993.

[11] Lomba R. F. T., Chenevert M.E. and Sharma M. M., "*The role of osmotic effects in fluid flow through shales*", Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 25, pp. 25-35, 2000.

[12] Gross R. G. and Osterle J. F., "*Membrane transport characteristics of ultrafine capillaries*", J. Chem.Phys.49, No 1, pp. 228-234, July 1968.

[13] Levine Ira N. "*Physical Chemistry*", 5th, Vol. 1., McGraw-Hill Higher Education, August 2001.

[14] Treybal Robert E., "*Mass Transfer Operation*", The University of Rhode Island : McGraw-Hill Book Company,. pp. 88-93, 1981.

[15] Incropera, and DeWitt., "*Fundamentals of Heat and Mass Transfer*", 5th Edition, John Wiley & sons, Inc., 2002.

[16] H.Gray and Donald. "*Coupled flow phenomena in clay- water systems*" ,The University of Mishigan, November, 1966.

Archive of SID

www.SID.ir