

# تحلیل عددی واکنش‌های شیمیایی بین سازندهای شیلی و محلول حفاری پایه آبی در یکی از سازندهای جنوب غرب ایران

مجتبی محمدزاده ثانی<sup>۱</sup>، حسین جلالی فر<sup>۱</sup>، علیرضا نصیری<sup>۲\*</sup> و سعید جعفری<sup>۲</sup>

۱- دانشکده مهندسی نفت و گاز دانشگاه باهنر کرمان، کرمان، ایران

۲- پژوهشکده مهندسی نفت، پردیس پژوهش و توسعه صنایع بالادستی، پژوهشگاه صنعت نفت تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۲/۸/۱۱ تاریخ پذیرش: ۹۳/۴/۱۵

## چکیده

ناپایداری در لایه‌های شیلی یکی از مشکلات بارز در صنعت حفاری مخصوصاً در حیطه صنایع نفت و گاز به شمار می‌رود که هر ساله هزینه زیادی صرف جلوگیری از این مشکل می‌گردد. تماس بین محلول حفاری پایه آبی و سازند شیلی باعث ایجاد تورم و افزایش فشار منفذی در دیواره چاه شده و ادامه این فرآیند طی زمان باعث ناپایداری دیواره چاه می‌باشد. اختلاف پتانسیل ایجاد شده بین محلول حفاری و سازند شیلی باعث تغییرات در فشار منفذی، فشار تورم، درصد جذب آب توسط شیل و ضریب غشاء می‌گردد. در این مقاله با استفاده از روش‌های تحلیلی و مدل‌سازی عددی، تفاضل محدود، واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی ایجاد شده بین محلول حفاری پایه آبی و سازند شیلی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی نشان داد که سیالات مورد استفاده در میدان مورد مطالعه، جهت جلوگیری از ناپایداری چاه ناشی از تورم شیل‌ها، از کارائی لازم برخوردار می‌باشند و همچنین مشخص شد که محلول کلرید پتاسیم از عملکرد بهتری برخوردار می‌باشد، بطوریکه کمترین فشار تورم و فشار منفذی در حالت استفاده از آن بوجود خواهد آمد.

**کلمات کلیدی:** پتانسیل شیمیایی، فشار تورم، فشار منفذی، ضریب غشاء، لایه شیلی

## مقدمه

پتانسیل کلی فاز آبی (فشار و پتانسیل شیمیایی) محلول حفره سازند افزایش می‌یابد، آب جذب شیل‌های دارای بار منفی شده و سبب حرکت صفحات کوچک شیلی بر روی همدیگر می‌شود [۱]. محاسبه پتانسیل شیمیایی به صورت مستقیم کار بسیار دشواری است، هر چند که می‌توان پتانسیل شیمیایی آب را با دقت بالایی از طریق تعیین اکتیویته آب به دست آورد [۲]. بول و همکارانش در سال ۱۹۹۴ رفتار سازندهای شیلی را به صورت الاستوپلاستیک بیان کردند، این محققین افزودن نمک و مواد ارگانیکی را بهترین راه برای کاهش تورم سازند شیلی می‌دانند [۳].

زمانی که اکتیویته آب محلول حفاری افزایش پیدا می‌کند، در حقیقت فشار منفذی افزایش می‌یابد که این بدین معنی است که دیواره چاه در معرض ناپایداری قرار گرفته و امکان تورم و یا ریزش دیواره وجود دارد (لوو و آندرسون ۱۹۵۹). دلیل اصلی تبادل آب و نمک بین گل و سازند، نیروهای هیدرولیکی و گرادیان پتانسیل شیمیایی است. هنگامی که

بر روی لایه شیلی مخزن آسماری انجام گردیده و در این حیطه مدلی برای ارزیابی میزان ناپایداری شیمیایی (فشار تورم شیلها) ارائه شده است.

### روش کار

#### میدان مورد مطالعه (سازند آسماری)<sup>(۱)</sup>

بزرگترین انباشتگی نفت و گاز در کمربند چین خورده زاگرس به مخازن کربناته مربوط می‌شود. یکی از مهم‌ترین مخازن این ناحیه، سنگ آهک‌های اولیگوسن-میوسن آسماری بوده و براساس طبقه‌بندی مخازن، مخزن آسماری در میدان نفتی مورد نظر، مخزن چند لایه باخواص متفاوت می‌باشد. در این مخزن تولید نفت به‌طور عمده از لایه‌های ماسه سنگی و سنگ آهک شکاف‌دار حاصل می‌شود. [۷]

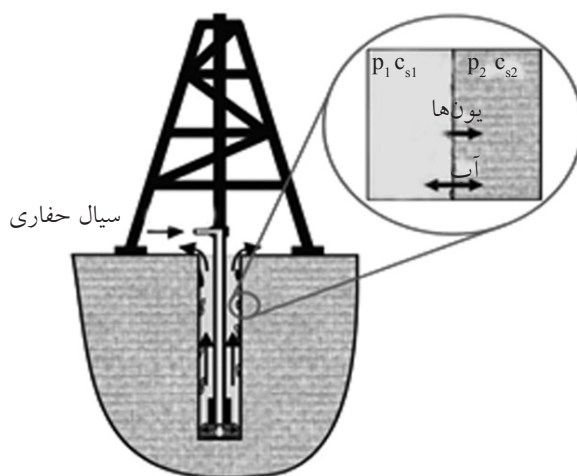
لایه شیلی مورد مطالعه در این میدان در عمق ۳۱۳۹/۵ متری از سطح زمین قرار دارد.

#### جمع‌آوری داده‌ها

همان‌گونه که قبلاً نیز اشاره شد، میدان مورد مطالعه لایه‌ای شیلی در عمق ۳۱۳۹/۵ متری سازند آسماری می‌باشد که اطلاعات مکانیک سنگی و مخزنی آن از مقالات استخراج شده و در جداول ۱ و ۲ به ترتیب ارائه شده است. اطلاعات مورد نیاز جهت حل عددی ناپایداری شیمیایی این سازند از اطلاعات آزمایشگاهی پژوهشگاه صنعت نفت تهیه گردید. که در جدول ۳ به آنها اشاره شده است.

ضریب غشاء کلید اصلی در بحث ناپایداری سازندهای شیلی است (تاره و همکارانش ۲۰۰۲)، ضریب غشاء را می‌توان با زمان کنترل نمود. به طوری که هر چه زمان تماس محلول حفاری با دیواره سازند شیلی افزایش یابد، ضریب غشاء بیشتر تحریک خواهد شد. علاوه بر افزایش نمک جهت کاهش ضریب غشاء، می‌توان با افزایش سرعت محلول حفاری این ضریب را کاهش داد [۴]. نرخ نفوذ آب از دست دادگی محلول حفاری به خصوصیات شیمیایی محلول حفاری ارتباط دارد، به طوری که هر چهقدر واکنش بین محلول حفاری و سازند شیلی به وسیله تبادل یونی بالاتر باشد، نشان‌دهنده نرخ بالاتر ورود آب از دست دادگی به داخل سازند می‌باشد و برعکس [۵]. هجوم یون‌های سدیم و کلسیم به داخل شیل می‌تواند ترکیب فشار منفذی داخل سازند را تحت تاثیر قرار داده و با توجه به میزان غلظت محلول، آن را تغییر دهد. علاوه بر تغییر فشار منفذی توسط یون‌های ذکر شده، خصوصیات مکانیکی شیل نیز به شدت تحت تاثیر قرار می‌گیرد (شکل ۱) [۶].

در این تحقیق با استفاده از روش‌های عددی معادلات ریاضیاتی مربوط به تغییرات فشار منفذی، غلظت نمک، فشار تورم، تبادل یون، درصد جذب رطوبت شیل و معادلات مربوط به واکنش‌های شیمیایی شیل و محلول حفاری به طور هم‌زمان حل شده است. تمام تحقیقات



شکل ۱- شمایکی از واکنش بین محلول حفاری و سازند [۸]

جدول ۱- خواص متوسط مخزنی لایه شیلی سازند آسماری [۱۲]

عمق نقطه تحتانی لایه (m)	تنش افقی (Mpa)	تنش عمودی (Mpa)	فشار محلول منفذی (Mpa)	تراوایی مطلق لایه (md)	تخلخل لایه (%)	لیتولوژی	لایه
۳۱۳۹	۵۶/۶۳	۳۶/۷۱	۳۵/۴۱	۵۰	۶	شیل	۱

جدول ۲- خواص مکانیک سنگی لایه شیلی سازند آسماری [۱۲]

مقاومت کششی (Mpa)	چسبندگی (C) (Mpa)	زاویه اصطکاک (f)	u	مدول بالک (GPa)	نوع لایه
۳	۹	۳۵	۰/۳	۶/۶۶	شیل

جدول ۳- اطلاعات خواص شیمیایی سازند (پژوهشگاه صنعت نفت)

شوری سازند	٪۳۲
اکتیویته	۰/۹۵
قطر منافذ ( $\mu\text{m}$ )	۰/۰۴۳۳
ضریب غشاء	۰/۱
ظرفیت تبادل کاتیون آسماری	۱/۵
ظرفیت تبادل کاتیون فلهلیان	۴
ظرفیت تبادل کاتیون سروک	۳
ویسکوزیته محلول (cp)	۱
نفوذپذیری موثر کلرید پتاسیم ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	$۸/۷۹۸ \times ۱۰^{-۶}$
نفوذپذیری موثر کلرید کلسیم ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	$۷/۲۵۰ \times ۱۰^{-۶}$
نفوذپذیری موثر کلرید سدیم ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	$۷/۷۵۵ \times ۱۰^{-۶}$
دما ( $^{\circ}\text{F}$ )	۷۵
قطر چاه in	۸/۵

### فرضیات و مدل ریاضی

در این تحقیق سعی شده با حل معادله انتقال فشار منفذی، معادله غلظت نمک، معادله جذب رطوبت آب توسط شیل و معادله تنش های شیل (تورم شیل)، نتایج تحلیلی مناسبی در خصوص علل ناپایداری شیل از نظر شیمیایی و عوامل موثر در کنترل آن به دست آید. در این راستا دما به صورت ثابت فرض شده و پارامتر اصلی مورد بحث، تاثیر پارامتر شوری محلول حفاری بر روی ضریب غشاء در نظر گرفته شده است. سه محلول مورد استفاده کلرید پتاسیم، کلرید سدیم و کلرید کلسیم می باشند که هر کدام از لحاظ شیمیایی و ظرفیت تبادل کاتیونی دارای خواص مختص به خود هستند.

در این مسأله تمام تحلیل ها در یک سیستم استوانه ای (چاه نفت) با شعاع محدود و شرایط مرزی نامحدود فرض گردیده، تا فشار منفذی و تبادل یون بین محلول و سازند به حالت ثابت درآید. تماس محلول حفاری و شیل بر روی دیواره چاه باعث به وجود آمدن یک غشاء نیمه تراوا خواهد شد که بسته به میزان ایجاد این غشاء، ناپایداری دیواره تخمین زده می شود.

### فرضیات مدل

۱- سیالات حفاری پایه آبی مورد استفاده در این مدل با یک نمونه نمک کلرید پتاسیم، کلرید سدیم و یا کلرید کلسیم با درصد شوری های متفاوت تست می شوند.

در این تحقیق تغییرات فشار منغذی با تغییر غلظت نمک در یکی از سیالات استفاده شده مورد ارزیابی قرار گرفته است. با حل معادله فشار منغذی و استفاده از معادله دارسی که در معادله غلظت نمک به کار رفته، می‌توان تاثیر شوری محلول و تغییرات فشار منغذی را مشاهده کرد.

معادله ۳ به بررسی میزان درصد جذب آب توسط شیل از محلول حفاری می‌پردازد. میزان جذب آب به عواملی همچون دانسیته، تخلخل و غلظت نمک محلول بستگی دارد [۸].

$$W(\%) = \frac{(1-C_s)\rho_{mix}}{(1-\phi)\rho_{grain} + C_s\phi\rho_{mix}} \quad (3)$$

معادله ۴ جهت تحلیل حجم تورم شیل به کار می‌رود که با غلظت نمک رابطه دارد. تمام تغییرات که بر روی شیل انجام می‌شود تابع زمان می‌باشد. معادله ۵ فشار تورم ایجاد شده را مورد بررسی قرار می‌دهد، پس از محاسبه میزان فشار تورم و قرار دادن آن در معادله ۶، میزان کل تورم در زمان‌های متفاوت به دست می‌آید [۹].

$$\frac{\partial \ln v}{\partial t} = -\frac{1}{C_s} \frac{\partial C_s}{\partial t} \quad (4)$$

$$P_s = \frac{8\pi CEC^2}{\epsilon S^2} \exp(-2k_n h) * 10^{-10} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \ln P_s}{\partial t} \Big|_v = -\frac{k_n h}{C_s} \frac{\partial C_s}{\partial t} \quad (6)$$

#### شرایط مرزی

طی واکنش‌های انجام شده بین محلول و سازند، یک غشاء نیمه تراوا در دیواره ایجاد خواهد شد که تغییرات آن به میزان گرادیان فشار اسمزی (فشار نفوذی) دو سمت غشاء، بستگی دارد. به همین دلیل باید یک سری شرایط رفتاری ویژه‌ای برای این مدل لحاظ گردد. در تمام مدل‌های ساخته شده این شرایط لحاظ شده است. معادلات زیر به ترتیب بیان‌گر شرایط اولیه، داخلی و خارجی مدل می‌باشد.

$$\begin{aligned} t=0 & \quad r \geq r_w, & P=P_f, & \quad C_s = C_{sf} \\ t>0 & \quad r = r_w, & P = P_w + \sigma\pi, & \\ C_s = C_{sw} & & & \end{aligned} \quad (7)$$

$$t>0 \quad r = \infty, \quad P=P_f, \quad C_s = C_{sf}$$

#### معادله فشار اسمزی

این معادله در سال ۱۹۵۹ توسط لوو و آندرسون بیان شد که کاربرد آن در صنعت حفاری و پایداری شیل‌ها بسیار حائز اهمیت است.

۲- سیستم دارای یک جریان شعاعی آرام با سرعت ناچیز می‌باشد. در این مدل از قانون دارسی جهت تخمین سرعت محلول در معادلات غلظت نمک استفاده شده است.

۳- تغییرات فشار منغذی در سازندهای شیلی در این مدل تابعی از زمان می‌باشد.

۴- در ابتدا هیچ غشایی بر روی دیواره وجود ندارد و پس از تماس محلول و سازند این غشاء به وجود می‌آید که بسته به میزان شوری و نوع محلول و همچنین تعادل به وجود آمده بین فشار اسمزی (نفوذ یون) و محلول اسمزی (نفوذ یون) متفاوت خواهد بود.

۵- به دلیل آب دوست بودن شیل، تورم به وسیله فشار هیدروژنی و تبادل کاتیون اتفاق می‌افتد.

۶- سازند به صورت همگن و هم دما می‌باشد.

#### مدل ریاضی واکنش شیمیایی شیل‌ها

در زیر معادلاتی آورده شده‌اند که مربوط به تحلیل و شبیه‌سازی واکنش‌های بین محلول حفاری پایه آبی و سازند شیلی می‌باشد. این معادلات به صورت کوپل به کار رفته و نتایج آنها گویای رفتار سازند شیلی در مقابل سیالات مختلف، در شرایط مرزی تعریف شده می‌باشد. معادلات قابل ذکر در این تحقیق متغیرهای فشار منغذی، غلظت نمک، درصد رطوبت جذب شده، حجم و فشار تورم شیل می‌باشد که برای حل این معادلات از روش‌های عددی تفاضل محدود استفاده شده است.

معادله ۱ معادله فشار منغذی (P) است که تابعی از زمان (t) و مکان (r) است، که برای حل معادله غلظت نمک (C<sub>s</sub>)، ابتدا باید معادله فشار منغذی توسط روش عددی تفاضل محدود حل شود، سپس مقدار بدست آمده فشار منغذی را از حل عددی فوق در فرمول دارسی گذاشته تا سرعت محلول حفاری محاسبه شود، سپس معادله غلظت نمک نیز از روش عددی تفاضل محدود در دو بعد زمان و مکان محاسبه می‌گردد.

معادله انتقال فشار منغذی و غلظت نمک [۸].

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{k}{\eta\phi\beta} \left( \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} \right) - \frac{1}{\beta\phi} \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{\phi} \frac{\partial C_s}{\partial t} + V \frac{\partial C_s}{\partial t} + \frac{C_s}{r} \left( V + r \frac{\partial V}{\partial r} \right) \\ = D_{eff} \left( \frac{\partial^2 C_s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_s}{\partial r} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

فشار تورم مشاهده می‌شود. اختلاف پتانسیل ایجاد شده بین محلول حفاری و محلول سازند شیلی وابسته به میزان شوری این دو محلول می‌باشد. استفاده از محلول حفاری با شوری ۱۰٪ فشار منفذی ۵۸۵۰ psi و فشار تورم ۰/۰۱۷ psi را ایجاد می‌کند. با افزایش درصد شوری محلول حفاری، میزان فشار منفذی و فشار تورم کاهش می‌یابد، زیرا درصد شوری محلول حفاری به شوری سازند نزدیک می‌شود و اختلاف پتانسیل کاهش می‌یابد. با افزایش درصد شوری محلول حفاری به ۴۲٪ میزان فشار منفذی به ۵۴۸۰ psi و فشار تورم شیل به ۰/۰۰۹ psi کاهش می‌یابد. در شکل ۴ تغییرات فشار منفذی با سیالات مختلف در درصد شوری ۱۰٪ رسم شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، کلرید پتاسیم کمترین تاثیر را بر فشار منفذی دارد که به دلیل کم بودن اکتیویته و واکنش پذیری کلرید پتاسیم، نسبت به کلرید سدیم و کلرید کلسیم می‌باشد. شکل ۵ نشان می‌دهد که درصد جذب آب با تغییر درصد شوری محلول حفاری قابل تغییر است. زمانی که میزان شوری محلول حفاری ۱۰٪ است، میزان جذب رطوبت در حدود ۰/۳۳٪ می‌باشد که با فاصله گرفتن از دیواره چاه این میزان تا ۰/۲۶٪ کاهش یافته و عمق نفوذی رطوبت تا ۹/۵ اینچ می‌رسد. با افزایش میزان شوری محلول حفاری شرایط بهتر شده و میزان درصد جذب آب توسط شیل کاهش می‌یابد. همان‌گونه که از شکل پیداست در درصد شوری ۴۲٪ این میزان به ۰/۲۱٪ کاهش یافته است.

#### اثرات پتانسیل هیدرولیکی

اثرات فشار دیواره چاه بر فشار منفذی و تورم شیلی قابل بررسی است. بدین‌گونه که با تغییرات فشار بر روی فشار منفذی نیز تغییراتی ایجاد می‌شود. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، با افزایش فشار دیواره چاه، میزان فشار منفذی نیز افزایش می‌یابد. ولی این تغییرات بر روی تورم شیل‌ها بسیار ناچیز است.

سیالات مختلفی که در چاه مورد استفاده قرار می‌گیرند، بسته به فرمولاسیون نمک‌های موجود در آنها، میزان تورم مشخصی را بر روی دیواره ایجاد می‌نمایند. همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، بسته به میزان اکتیویته محلول، این میزان افزایش و یا کاهش خواهد یافت.

از پارامترهای مهم و اساسی در این معادله می‌توان به میزان اکتیویته محلول حفاری و سازند اشاره کرد که با تغییرات اکتیویته می‌توان در ناپایداری سازندهای شیلی تغییراتی ایجاد نمود. هر سازند یک اکتیویته دارد که قابل تغییر نیست، ولی اکتیویته محلول حفاری قابل تغییر است و محققین می‌توانند برای کاهش این فشار میزان آن را تغییر دهند. [۱۰]

$$\pi = \frac{RT}{V} \ln \frac{a_w}{a_s} \quad (۸)$$

روابط زیر بیان کننده میزان اکتیویته سیالات به کار رفته در این تحقیق بر حسب میزان غلظت نمک می‌باشد. معادلات به ترتیب مربوط به اکتیویته کلرید کلسیم، کلرید سدیم و کلرید را بیان می‌باشد.

$$a_{w(s)} = 1.0 - 6.5 * 10^{-4} C_s - 4.38 * 10^{-4} C_s^2 + 2.81 * 10^{-6} C_s^3 - 2.65 * 10^{-8} C_s^4 \quad (۹)$$

$$a_{w(s)} = 1.0 - 4.51 * 10^{-3} C_s + -1.99 * 10^{-4} C_s^2 \quad (۱۰)$$

$$a_{w(s)} = 0.9999 - 3.443 * 10^{-3} C_s - 9.691 * 10^{-5} C_s^2 \quad (۱۱)$$

فرمول ضریب غشاء در زیر بیان شده که وابسته به پارامترهای جریان نفوذ محلول و جریان ویسکوز می‌باشد. ضریب غشاء جریان نفوذی محلول و جریان ویسکوز، واکنش‌های الکترواستاتیک بین یون‌ها و سازند شیلی را مورد بررسی قرار می‌دهد. با افزایش تبادل یون در دیواره چاه در حقیقت میزان کیک غشاء افزایش می‌یابد که به ضرر سازند شیلی می‌باشد و به مرور زمان منجر به ایجاد تورم و ناپایداری در سازند می‌گردد [۱۱].

$$\sigma = \frac{(\bar{V}_w D_w - \bar{V}_s D_s k_s) \eta}{KRT} \quad (۱۲)$$

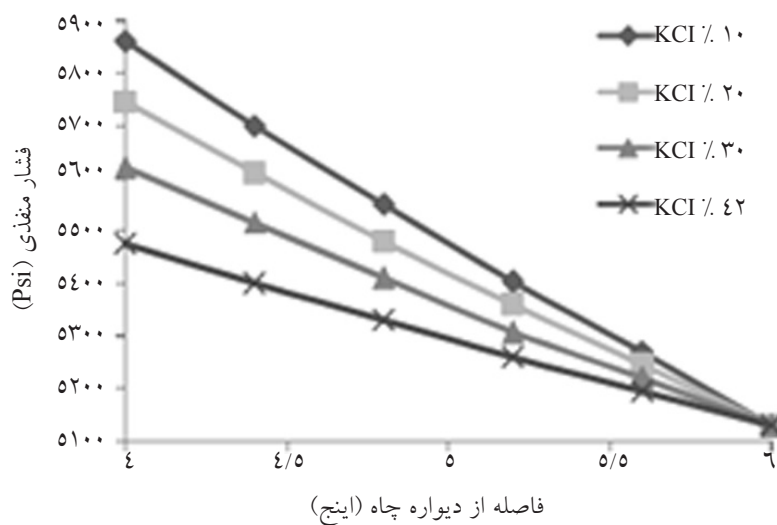
$$k_s = \frac{1}{2} \frac{x}{C_s \phi_w} \left( \sqrt{1 + \frac{4 C_s^2 \phi_w^2}{x^2}} - 1 \right) \quad (۱۳)$$

$$X = CEC. 10^{-5} \cdot \rho_{grain} (1 - \phi_w) \quad (۱۴)$$

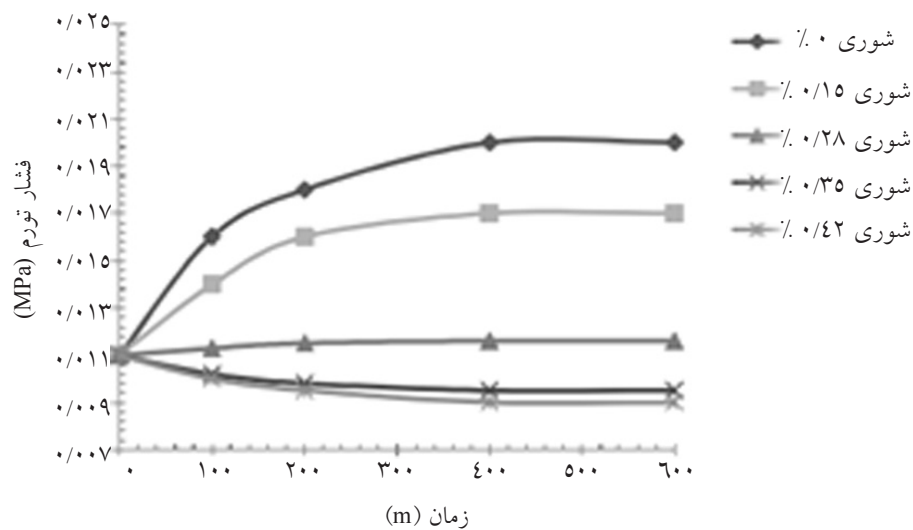
#### نتایج و بحث

##### اثرات پتانسیل شیمیایی

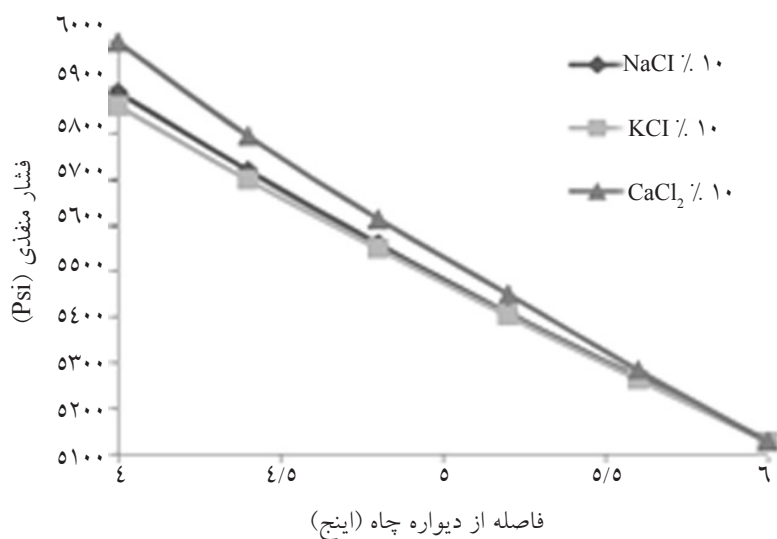
پتانسیل شیمیایی منبع انرژی بحرانی برای واکنش بین محلول حفاری و سازند شیلی است. همچنین اثرات اسمزی بر روی فشار منفذی می‌تواند بر روی تورم شیل‌ها تاثیر گذار باشد. در شکل‌های ۲ و ۳ تاثیر تغییرات پتانسیل شیمیایی محلول حفاری بر روی فشار منفذی و میزان



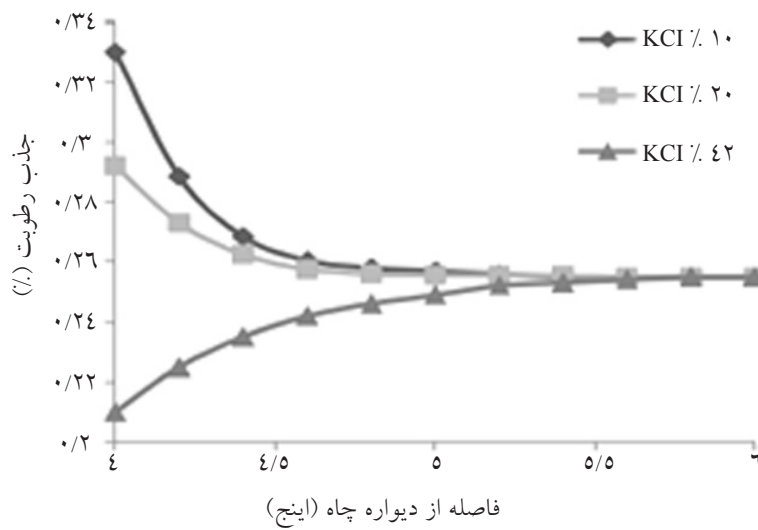
شکل ۲- تغییرات فشار منفذی با شوری محلول حفاری



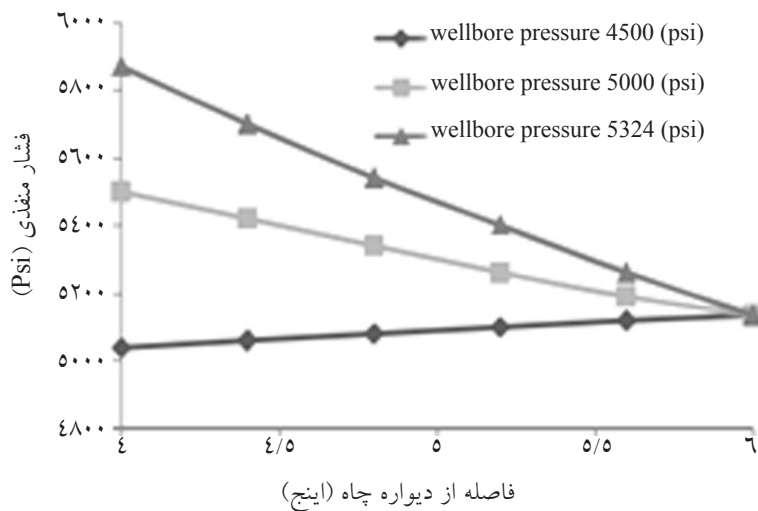
شکل ۳- تاثیر میزان شوری محلول حفاری بر فشار تورم



شکل ۴- مقایسه تغییرات فشار منفذی برای سیالات مختلف



شکل ۵- تغییرات درصد جذب رطوبت شیل با شوری محلول حفاری



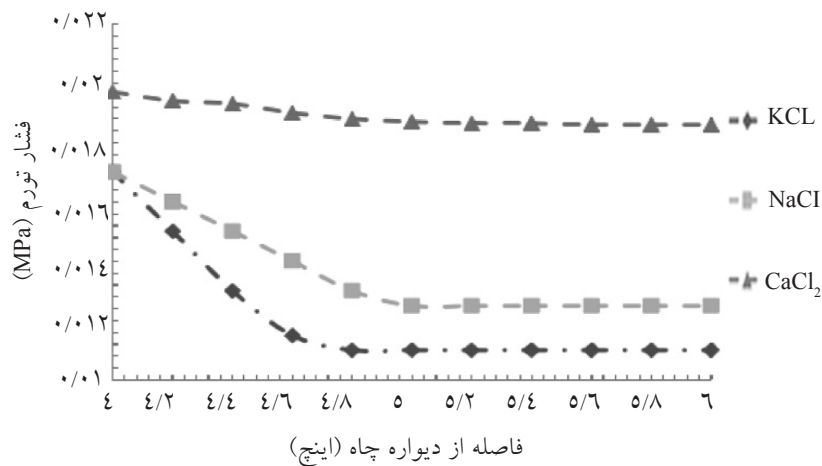
شکل ۶- تغییرات فشار منفذی با تغییر در فشار دیواره چاه

محلول کلرید پتاسیم، تاثیرات کمتری در کاهش فشار تورم و فشار منفذی از خود نشان می‌دهند.

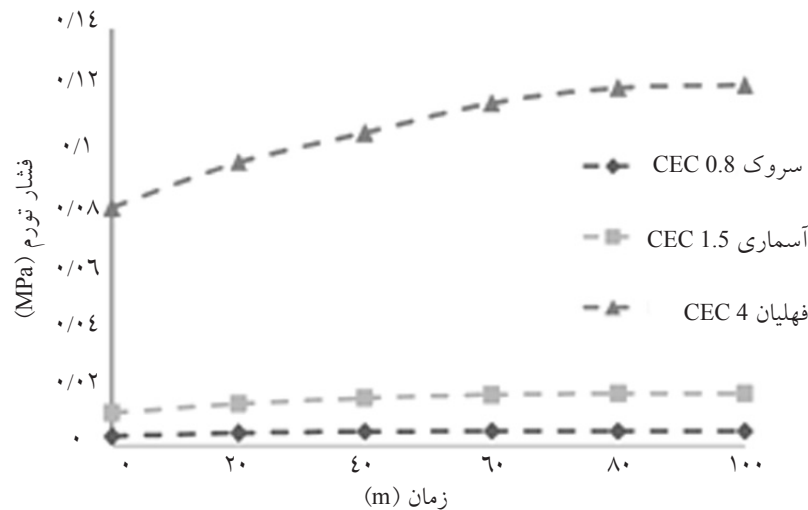
#### تفاوت میزان ضریب غشاء در سیالات مختلف در تبادل یونی ثابت

در شکل ۸ تاثیر ظرفیت تبادل کاتیون سه سازند آسماری، سروک و فهلیان بر روی تورم در شرایط یکسان مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، سازند سروک به دلیل تبادل کاتیون کمتر نسبت به سازندهای آسماری و فهلیان، کمترین فشار تورم را در شرایط یکسان از خود نشان می‌دهد.

شکل ۷ نشان می‌دهد که سیالات مختلف با میزان غلظت نمک و شرایط یکسان دارای تاثیر متفاوتی بر روی تورم شیل می‌باشند. زون پلاستیک ایجاد شده در دیواره شیلی که در تماس با محلول حفاری است، در این شکل مشاهده می‌شود. تفاوت زون‌های ایجاد شده برای هر سه محلول در تغییرات میزان فشار تورم شیل موثر می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، محلول کلرید پتاسیمی با نفوذ به داخل دیواره چاه، کاهش شدیدی در فشار تورم شیل ایجاد می‌نماید، که باعث کاهش میزان تورم دیواره شیلی می‌گردد، اما محلول کلرید سدیم و کلرید کلسیم به دلیل اکتیویته بالا و واکنش‌پذیری بیشتر با سازند شیلی نسبت به



شکل ۷- تاثیر سیالات مختلف در فشار تورم شیل (اینچ)



شکل ۸- تغییرات فشار تورم با CEC سازندهای مختلف

نمک محلول حفاری تا ۳۵٪ وزنی، با کاهش ضریب غشاء همراه می‌باشد. با افزایش غلظت نمک به بیش از ۳۵٪، ضریب غشاء ثابت می‌ماند. همچنین مطابق شکل ۱۱، با افزایش میزان تراوایی سازند شیلی، ضریب غشاء کاهش می‌یابد.

#### اعتبار سنجی مدل عددی

در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نتایج به دست آمده توسط مارتین چنورت و همکارانش رسم شده است، این محققین تاثیر اکتیویته سیالات حفاری را بر فشار تورم شیل مورد بررسی قرار داده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در اکتیویته‌های بالای محلول، بیشترین تغییرات فشار تورم به وجود می‌آید و هر چه اکتیویته محلول کمتر باشد، تغییرات فشار تورم در زمان مشخص حداقل می‌باشد. مقایسه نتایج به دست آمده در این پژوهش با نتایج سایر محققین در شکل ۱۴ رسم شده است.

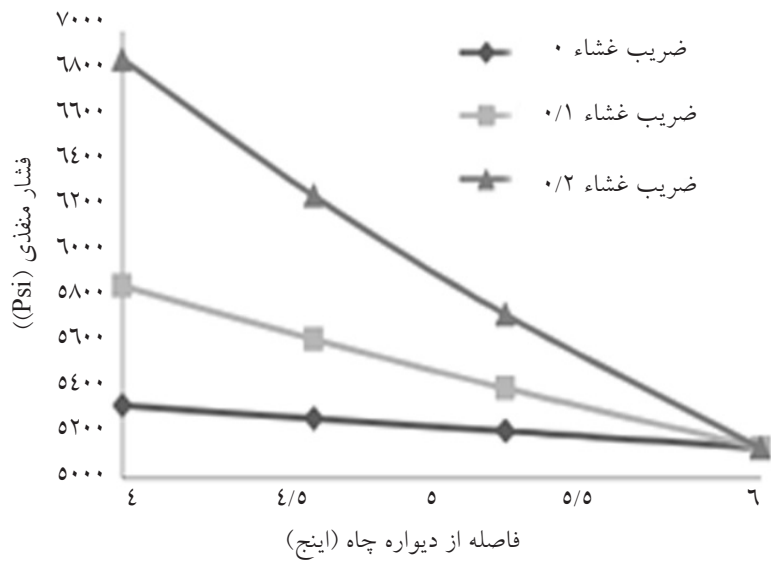
#### تغییرات فشار منفذی در ضریب غشاهای متفاوت

شکل ۹ نشان می‌دهد که با افزایش میزان ضریب غشاء، فشار منفذی سازند نیز افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش ضریب غشاء به نفع پایداری دیواره چاه نیست و با افزایش فشار منفذی، میزان تورم شیل بالا می‌رود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، وقتی ضریب غشاء صفر است، میزان فشار منفذی در محدوده ۵۳۰۰ Psi می‌باشد که با افزایش ضریب غشاء به ۰/۱ و ۰/۲ به ترتیب میزان فشار منفذی به ۵۹۰۰ و ۶۹۰۰ Psi افزایش می‌یابد، که این افزایش مشکلات بعدی را به همراه دارد.

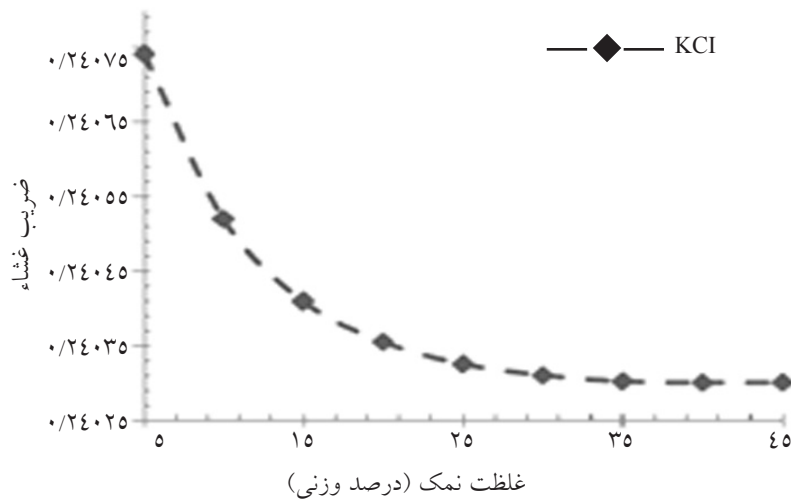
#### تغییرات ضریب غشاء با تغییرات تراوایی و غلظت نمک

با بررسی نتایج حاصل از شکل ۱۰ مشخص می‌شود که افزایش میزان غلظت نمک در محلول، باعث کاهش ضریب غشاء خواهد شد. مطابق شکل، افزایش غلظت

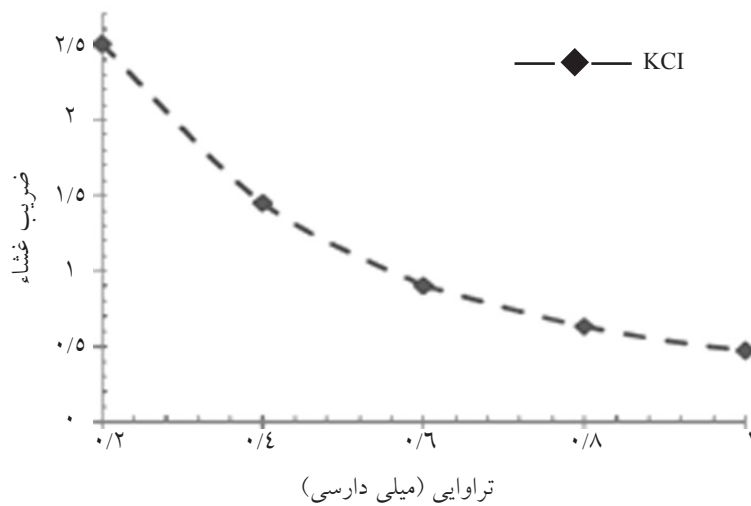




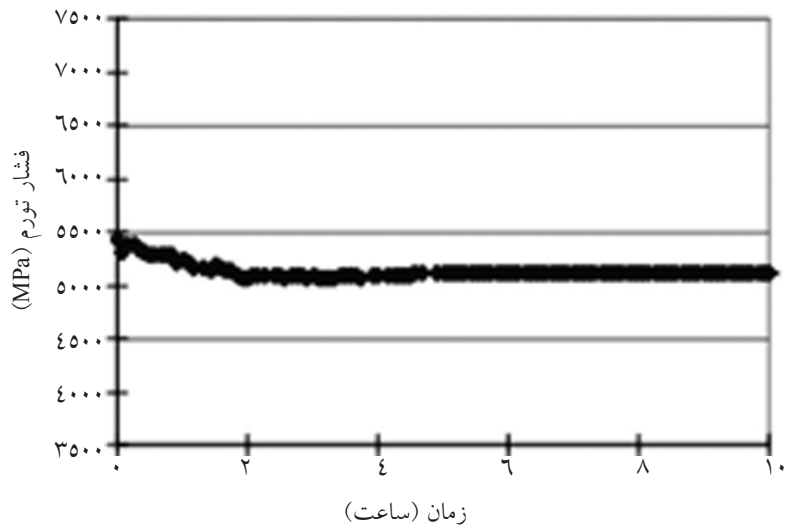
شکل ۹- تغییرات فشار منفذی با تغییر ضریب غشاء



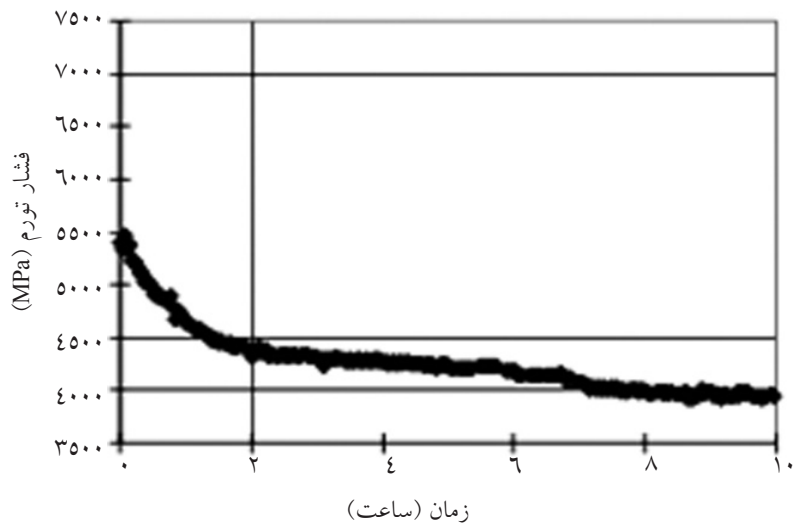
شکل ۱۰- تغییرات ضریب غشاء با تغییرات غلظت نمک



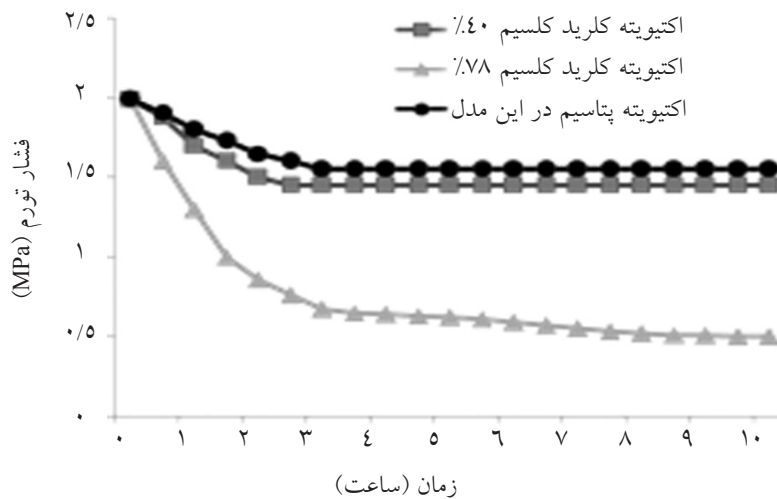
شکل ۱۱- تغییرات ضریب غشاء با تغییرات تراوایی



شکل ۱۲- رفتار فشار تورم برای محلول کلرید کلسیم ۴۰٪ [۱۱]



شکل ۱۳- رفتار فشار تورم سازند برای محلول کلرید کلسیم ۷۸٪ [۱۱]



شکل ۱۴- رفتار فشار تورم با اکتیویته‌های مختلف محلول

$h$ : فاصله بین لایه‌های رسی ( $^{\circ}A$ )

$k_{\parallel}$ : ضخامت الکتریکی بین لایه‌ها ( $^{\circ}A$ )

$k_s$ : غلظت نمک توزیع شده در لایه غشاء

$k$ : تراوایی شیل (D)

$p$ : فشار منفذی محلول سازند ( $gr/cm.sec^2$ )

$pw$ : فشار محلول داخل چاه ( $gr/cm.sec^2$ )

$pf$ : فشار منفذی محلول ( $gr/cm.sec^2$ )

$Ps$ : فشار تورم ( $gr/cm.sec^2$ )

$r$ : فاصله شعاع چاه (cm)

$rw$ : شعاع دیواره چاه (cm)

$re$ : شعاع مرز خارجی (cm)

$R$ : ثابت جهانی گازها ( $J/grmol.$ )

$S$ : سطح ویژه ( $cm^2/gr$ )

$t$ : زمان (s)

$T$ : درجه حرارت (k)

$V$ : سرعت حجمی ( $cm/s$ )

$\bar{V}_w$ : حجم مولکولی آب ( $cm^3/mol$ )

$\bar{V}_s$ : حجم مولکولی نمک ( $cm^3/mol$ )

$W$ : درصد جذب رطوبت شیل

$\bar{\phi}_w$ : تخلخلی که به وسیله آب احاطه شده (%)

$\sigma$ : ضریب غشاء (membrane coefficient)

$\rho_{grain}$ : دانسیته توده شیل ( $gr/cm^3$ )

$\epsilon$ : ثابت دی الکتریک

$\rho_{mix}$ : دانسیته محلول ( $gr/cm^3$ )

$\beta$ : ضریب تراکم پذیری محلول

$\eta$ : ویسکوزیته (cP)

همان‌گونه که مشاهده می‌شود برای محلول کلرید کلسیم با هر دو اکتیویته مورد تست، دقیقاً همان نتایج چنورت و همکارانش به دست می‌آید.

### نتیجه‌گیری

۱- مدل ریاضی استفاده شده در این تحقیق جهت بررسی ضریب غشاء به کار رفته است. با تحلیل این مدل می‌توان دریافت که ضریب غشایی به ضریب تبادل یونی بسیار حساس است.

۲- از شبیه‌سازی و همچنین مدل ریاضی به دست آمده نتیجه می‌شود که محلول کلرید پتاسیم بهترین گزینه برای کنترل ناپایداری در سازندهای شیلی می‌باشد. به این دلیل که کمترین واکنش بین محلول حفاری و شیل در حضور این نمک، روی می‌دهد. در حالی که سیالات حفاری کلرید کلسیم دارای بیشترین میزان تورم است و واکنش شیل با این نمک نسبت به کلرید پتاسیم بسیار بالاتر است.

### علائم و نشانه‌ها

$a_w$ : اکتیویته محلول حفاری

$a_s$ : اکتیویته آب شیل

$C_s$ : غلظت میانگین نمک در حفره (w/w)

$C_{sw}$ : غلظت نمک در دیواره چاه (w/w)

$C_{sf}$ : غلظت اولیه نمک در منفذ (w/w)

$CEC$ : ظرفیت تبادل کاتیون ( $100\text{ g}/meq$ )

$D_s$ : نفوذ پذیری نمک در منافذ ( $cm^2/s$ )

$C_w$ : نفوذ پذیری آب در منافذ ( $cm^2/s$ )

$D_{eff}$ : نفوذ پذیری موثر محلول ( $cm^2/s$ )

### مراجع

- [1]. Low P. F. and Anderson. D. M., "Osmotic pressure equation for determining thermodynamic properties of soil water", Soil Science, Vol. 86, pp. 251-258, 1958.
- [2]. Chenevert M. E., Shale control with balanced-activity oil-continuous muds, J. of Petroleum Technology, Oct. 1970.
- [3]. Bol G. M, Wong S. W., Davidson C. J. and Woodland, D. C. "Borehole Stability in Shales", SPE. Drilling & Completion, Sept. 1994.

- [4]. Tare U. A. and Halliburton Mody F. K., Shell International E. & P. Inc., *Managing borehole stability problems: On the learning, unlearning and relearning curve* presentation at the AADE. Technology Conference "Drilling & Completion Fluids and Waste Management" AADE-02-DFWM-HO-31, 2002.
- [5]. Sarout J. and Detournay E., "*Chemoporoelastic analysis and experimental validation of the pore pressure transmission Test for reactive shales*". International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, pp. 759-772-48, 2011.
- [6]. Al-Bazali T. M., "*The consequences of using concentrated salt solutions for mitigating wellbore instability in shales*". Journal of Petroleum Science and Engineering, pp. 94-101, 80, 2012.
- [۷]. غلامی.ک. و شهریار ک. «بررسی پایداری دیواره چاه در روش تحت تعادل با آنالیز NYZA در یکی از مخازن نفتی سازند آسماری»، سومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران - ۲۴ الی ۲۶ مهر ۱۳۸۶.
- [8]. Joel S., *Experimental identification of chemoporoelastic parameters for reactive Shales*, Thesis Submitted to Faculty of The Graduate School of The University of Minnesota, Ma. 2003.
- [9]. Chen Yu M., Chenevert G. and Sharma M. M., "*Chemical and thermal effects on wellbore stability of shale formations*". SPE. 71366, New Orleans, 30 Sep. 3 Oct. 2001.
- [10]. Chenevert Yu M. and Sharma M. M., "*Chemical-mechanical wellbore instability model for shales: accounting for solute diffusion*" Journal of petroleum Science and Engineering, 38, pp. 131-143, 2003.
- [۱۱]. عبداللهی ح. «گزارش خواص مکانیک سنگی لایه‌های مختلف تشکیل دهنده سازند آسماری»، ۱۳۸۲.