شبیه سازی نیمه تحلیلی برهم کنش شیمیایی-فیزیکی شیلهای حساس به آب

سید مرتضی میرعباسی و محمد جواد عامری*

دانشکده مهندسی نفت دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۱/۲۰ تاریخ پذیرش: ۹۳/۴/۸

چکیدہ

ناپایداری سازندهای شیلی، منشا اصلی بسیاری از مشکلات حفاری است که منجر به صرف هزینه های زیاد و اتلاف زمان می شود. پیش از حفاری، تنش های مکانیکی سازند، کمتر از مقاومت سنگ بوده و شرایط شیمیایی نیز در حال تعادل است. سنگ تحت این شرایط متعادل، در حالت پایدار قرار دارد. اما پس از عملیات حفاری، نیروهای برشی، کششی و تراکمی سنگ اطراف چاه، تغییر می نماید. فعل و انفعالهای شیمیایی نیز در اثر تماس سازند شیلی با سیال حفاری رخ می دهد که خود دلیلی برای ناپایداری دیواره چاه می باشد. مکانیزم عمده ناپایداری سازند شیلی با سیال هیدرولیکی و همچنین پدیده اسمزی است. به تاخیرانداختن افزایش فشار منفذی در نزدیک دیواره چاه، امری ضروری است. این امر می تواند با افزایش خاصیت غشایی شیل از طریق افزودن نمکهای مختلف و انسداد فیزیکی منافذ شیل با استفاده از انواع نانو ذرات و یا پلیمرها محق گردد. برای جلوگیری و حل مشکلات ناشی از سازندهای شیلی، شناخت و بررسی ویژگیهای سازند و همچنین تغییر و تحولات پدید آمده در اثر واکنش های مختلف و انسداد فیزیکی منافذ شیل نظر می آید. از این رو در این مقاله با به کارگیری تئوری پوروالاستیک شیمیایی خطی، معادلات میدانی حاکم بر مسال، خاص استخراج شده است. با توجه به ینده محنی و تعییر و تحولات پدید آمده در اثر واکنش های معادلات ناشی از سروری به معادری این معادلات درات و یا پلیمرها محق گردد. برای جلوگیری و حل مشکلات ناشی از سازندهای شیلی، شناخت مین می ویژگی های سازند و همچنین تغییر و تحولات پدید آمده در اثر واکنش های متقابل سنگ و سیال، ضروری به استخراج شده است. با توجه به اینکه معادلات انتشار به صورت کوپل کامل می باشند، با استفاده از روشهای تحلیل و عددی، این معادلات جداسازی و نهایتا حل شده اند. تنایج به دست آمده از این شیه سازی نشان می دهد که مدل ارائه

کلمــات کلیــدی: ناپایــداری ســازندهای شــیلی، فشــار اســمزی، بازدهــی غشــایی شــیل، تئــوری پوروالاســتیک شــیمیایی، روشهــای تحلیلــی و عــددی

> **مقدمه** ناپایـداری سـازندهای شـیلی، دلیـل بسـیاری از مشـکلات حفـاری چاههـای نفـت و گاز اسـت. ایـن مشـکل، یکـی

از اصلی ترین چالش ها، در صنعت حفاری بوده و بخش عظیمی از هزینه و زمان غیر تولیدی را شامل می شود که برای صنعت نفت دنیا سالانه ۵۰۰-۱۰۰۰ میلیون دلار هزینه دارد [۱]. از جمله این مشکلات می توان به افزایش میزان کنده های شیل

*مسؤول مکاتبات آدرس الکترونیکی ameri@aut.ac.ir **www.SID.ir**

مروش نفت مماره ۲-۸۵، زمستان ۹۴ میان شیل و گل آب پایه، بسیار حائز اهمیت است. لذا تلاشهای زیادی صورت گرفته تا اثر پتانسیل شیمیایی در مدل بوروالاستیک دخالت داده شده و پیشبینے رفتار شیل در تماس با سیال پایہ آبے دقیقتر صورت گیرد. تلاشهای بسیار زیادی با

هـدف بررسـی برهم کنـش فیزیکـی- شـیمیایی شـیل در تماس با سیال حفاری آب پایه، انجام شده که میتوان آنها را در دو دسته کلی طبقه بندی نمود. در واقع گروهی از دانشمندان تلاش کردند تا جهت شبیهسازی این رفتار شیل، مدل هایی تحلیلی و عـددی ارائـه دهنـد. از سـوی دیگـر، دسـتهای از محققین، تلاش خود را بر روی بررسی آزمایشگاهی خواص غشایی شیل متمرکز نموده اند.

شروود [۷] تئوری یوروالاستیک خطے بیوت [۸] را گسترش داد و تأثیر پتانسیل شیمیایی یونهای موجود در سیال منفذی را در مدل وارد نمود. در توسعه این مدل، شیل به صورت یک غشای ایدهآل فرض شده و از نفوذ یونها به درون سازند صرف نظر شدہ است [۹]. براساس مبانی ترمودینامیک، هیداگ و وونبگ، اولین مدل کامل کوپل پوروالاستیک شیمیایل را برای بررسی تورم سنگهای جذب کننـده آب در شـرایط دمـای ثابـت ارائـه نمودنـد [۱۰]. اساس این مدل روابط پوروالاستیک و معادله جریان دارسی میباشد که اثر اسمز شیمیایی و تورم شیل در آن لحاظ شده است. یک معادله نفوذ نیز برای بررسے نفوذ یون اب درون شیل مورد استفادہ قرار گرفته است. اما در این مدل از حرکت یونها به علت اختلاف فشار به درون شیل صرف نظر شده است [۱۰]. روشن و رحمان، مدل هیداگ و وونے را ہے منظور بررسے انتقال ہون ہے علت اختـلاف فشـار بـرای شـيلهای نسـبتا تـراوا توسـعه دادند و تغییرات تنش و فشار منفذی در اطراف چاه را آنالیـز کردنـد [۱۱]. دانشـمندان دیگـر نیـز بـا در نظر گرفتن تأثير دما، واكنشهاى الكتريكى و رفتار مكانيكي الاستوپلاستيك شيل، مدل اوليه 1. Perfect Membrane

در گل، کاهـش سـرعت گـردش گل درون چـاه، کاهـش توان سیال حفاری در تمیز نمودن چاه، توپی شدن مته حفاری و حتی انسداد کامل چاه و گیر کردن لوله های حفاری درون چاه اشاره کرد [۱ و ۲].

ناپایـداری دیـواره چـاه در اکثـر سـازندها، هنگامـی رخ میدهـد کـه تنـش مؤثـر در ناحیـه اطـراف چـاه، از استحکام سنگ تجاوز نماید. اما در حین حفاری شیل، عوامل دیگری نیز دخالت دارد. هنگامی که از سیال حفاری پایه آبی برای حفاری شیلها استفاده می شود، علاوه بر عوامل پوروالاستیک، کنش و واکنشهای شیمیایی میان شیل و سیال حفاری نیز به شدت بر روی ناپایداری چاه مؤثر است [۳ و ۴]. به علت اختلاف فشار هيدروليكي و غلظت شيميايي میان سیال حفاری و سیال منفذی شیل، آب و يونها به درون سازند نفوذ مىكنند. اين واکنشها باعث تغییر در فشار منفذی و تنش موثر در دیواره چاه می شود. همچنین وقتی مولکول های آب وارد ساختار شیل شده و در میان ساختار لایهای آن جای می گیرند، با فاصله گرفتن لایه ها از یکدیگر و ضعیف شدن پیوند میان آنها، استحکام شیل کاهش می یابد. البته شیلهایی دچار آماس می شوند کے درون آن ہے سیلیکاتھای فعال وجود داشته باشد و همه سازندهای شیلی، دچار تورم نمی شوند. تنها زمانی که بلور سیلیکاتهای آبدوست، در تماس مستقیم با آب قرار می گیرد، آب پوشی شده و نیروهای دافعه بین لایههای سيليكا فعال مي شود. اين فرآيندها در نهايت منجر به شکست سازند شیلی و ریزش آن میشود. اگرچـه در گذشـته اسـتفاده از سـیالات حفـاری نفـت پایـه بـرای پایـدار نگـه داشـتن سـازندهای شـیل هنـگام حفاری، راهی رایج و مؤثر به حساب میآمد، اما استفاده از آنها به علت هزینه بالا و مشکلات زیست محیطے ممنوع شدہ است [۴-8]. بنابراین استفادہ از سیالات حفاری پایے آبے با ہمے مشکلاتی کے دارد، امری اجتنابناپذیر میباشد. به منظور حل این مشکلات، شناخت مکانیزم حاکم بر واکنش

هیدرولیکیی و شیمیایی قرار می گیرد. در مرحله بارگذاری هیدرولیکی، بالادست نمونه، در تماس با سیالی است که به عنوان فاز اشباع کننده به کار رفته است؛ ولي فشار آن بيشتر بوده و سبب اعمال اختلاف فشار هیدرولیکی می شود. در نتیجه فشار در پایین دست نمونه (سیال منفذی) بالا رفته و ثبت میگردد. اما در فاز بارگذاری شیمیایی، بالادست نمونـه در تمـاس بـا محلولـی قـرار میگیـرد کـه غلظـت نمـک أن بالاتر اسـت و فشـار هيدروليكـي أن بـا مرحلـه قبل برابر مي باشد (شكل ۱). اين اختلاف غلظت شیمیایی سبب اعمال اختلاف فشار اسمزی شده و منجر به حرکت آب و یونها میشود [۴، ۱۹ و ۲۰]. تئوری پوروالاستیک شیمیایی معرفی شدہ در این مقاله، کرنش حجمی و تغییر در میران آب را که به دليل تغييرات غلظت نمك به وجود مي آيد، تحت شرایط تنش و فشار منفذی ثابت، محاسبه می کند. به این منظور، در ابتدا لازم است معادلات ساختاری[†] یوروالاستیک، بر حسب یارامترهای زیر فرموله شوند: کرنے شحجمے فضای متخلخے ع، ـش میانگیـن کوشـی (σ)، افزایـش جرمـی (_m <∗>) کے بیان گر مول بر واحد حجم فضای متخلخل است) و همچنین پتانسیل شیمیایی جزء kام محلول اشباع کننده ($\pi^{<k>}$). در اینجا محلول شامل ۲ جـزء اسـت كـه جـزء اول أن حـلال (آب) و جزء دیگر حل شونده (انواع نمک ها، مثلا KCl و NaCl) می باشد. حال می توان تمام متغیرهای $S = \{\sigma, \mu_w, \mu_s\}$ تعريف شـده را در دو گـروه اصلـی تنـش و کرنےش E={ɛ, m_w, m_s} قرار داد. پاس از آن، به کمے مفاہیے ترمودینامیکے، معادلات ساختاری بر , ,E'= $\{\varepsilon, \zeta, \theta\}$ و S'= $\{\sigma, p, \pi\}$ حسب بردارهای جدید نوشته می شود که در آن p فشار منفذی و π فشار اسـمزی میباشـد. طبـق رابطـه وانـت هـاف، *،*ه=RTc برقـرار مى باشــد.

3. Downstream

ارائه شده توسط هیداگ را توسعه دادند [۱۲– ۱۵]. استاورمن نخستین کسی بود که در مورد ضریب انعکاس شیل (ضریب بازدهی غشایی)، تحقیقاتی انجام داد. او نشان داد فشار اسمزی اندازه گیری شده به شدت به نفوذپذیری غشاء نسبت به نمکهای محلول بستگی دارد [۱۶]. فریتز و مارین تئوری اسمزی را به عنوان مبنایی جهت توجیه حرکت آب رسیدند که غشاء شیلی ایده آل نبوده و یونها تا حدودی از آن عبور میکنند. میزان ایده آلی غشاء، تابعی از قابلیت تبادل کاتیونی شیل، تخلخل و غلظت سیال منفذی است. آنها به این نتیجه رسیدند که شیل همچون یک غشاء شبه تراواست [۱۷].

با توجـه بـه اهمیـت ایـن خاصیـت شـیل در مسـأله پایـداری دیـواره چـاه و ارائـه مدلهایـی بـه منظـور حـل ایـن مشـکل، دانشـمندان بازدهـی غشـاء شـیل را بـه صـورت کمـی، بررسـی نمودنـد. مـودی و هـال، آزمایشـاتی طراحـی کردنـد تـا بـا کاربـرد ترکیبـات خـاص در سـیال حفـاری، غشـایی بـا بازدهـی بـالا در کـه بازدهـی غشـایی شـیل، هنگامـی کـه در ارتبـاط بـا کـه بازدهـی غشـایی شـیل، هنگامـی کـه در ارتبـاط بـا نـدرت از ۱۰٪ تجـاوز میکنـد. ضمـن اینکـه بـه کمـک سـیال حفـاری پایهآبـی قـرار میگیـرد، کـم بـوده و بـه نـدرت از ۱۰٪ تجـاوز میکنـد. ضمـن اینکـه بـه کمـک بازدهـی غشـایی حـدود ۸۰٪ رسـید. آنهـا معتقـد بودنـد بـه کمـک کاهـش فشـار منفـذی شـیل، می تـوان بـه دیـواره چـاه را پایـدار نمـود [۱۸].

استخراج معادلات ميداني

اندازه گیری بازدهی غشایی شیل در تماس با سیال حفاری، با استفاده از روش آزمایشگاهی مرجع "تست انتقال فشار منفذی" معروف به PPTT، انجام می گیرد. در این تست نمونه استوانهای، با یک سیال تحت فشار و غلظت اولیه مشخص، اشباع شده و سپس به ترتیب تحت بار گذاری

^{1.} Reflection Coefficient (Membrane Efficiency Coefficient)

^{2.} Upstream

^{4.} Constitutive Equation



به شکل زیر به دست می آید.

$$\varepsilon = C \sigma + Q_w \mu_w + Q_s \mu_s$$

 $m_w = Q_w \sigma + R_{ww} \mu_w + R_{ws} \mu_s$ (۳)
 $m_s = Q_s \sigma + R_{sw} \mu_w + R_{ss} \mu_s$

ایـن ثابتها بـر پایـه مفاهیـم ترمودینامیکی بـوده و بـر اسـاس تحقیقـات شـروود، از طریـق آزمایـش بهدسـت میآینـد. در واقـع ایـن ضرایـب نـه تنهـا بـه ترکیـب شیمیایی و خـواص فیزیکی سـنگ و سـیال وابسـتهاند، بلکـه تخلخـل و توزیع آن نیـز بـر آنهـا تاثیـر دارد [۷]. از ایـن رو، سعی میشود تـا بـه کمـک یـک سـری روابـط و خطـی سـازیها، ایـن ضرایـب بـر حسـب پارامترهـای مکانیـک سـنگی و خـواص شـیمیایی سـنگ نوشـته شـود.

فرمول بندى جديد معادلات ساختارى

طبق روابط ترمودینامیکی، چنانچه محلول ایده آل فرض شود، تحت شرایط ایزوترمال و با استفاده از معادله گیبس دوهام، فرم دیفرانسیلی پتانسیل شیمیایی یک مول نمک و پتانسیل شیمیایی حلال (آب)، از رابطه زیر بهدست می آید:

 $d \mu_s = v_s dp + \operatorname{RT} \frac{\operatorname{dc}_s}{\operatorname{c}_s}, \qquad d \mu_w = v_w dp - RT \frac{\operatorname{dc}_s}{\operatorname{c}_w} \quad (f)$ $\Sigma_{-} > c_w i = v_w dp - RT \frac{\operatorname{dc}_s}{\operatorname{c}_w} \quad (f)$ $\Sigma_{-} > c_w i = c_w i =$ در این رابطـه R ثابـت جهانـی گاز (J/mol.K) ۲ دمـای مطلـق (K) و c_s غلظـت مولـی نمـک (mol/m³) میباشـد. پارامتـر ζ بیان گـر مقـدار سـیال و پارامتـر θ نشـاندهنده مقـدار نمـک اسـت.

معادلات ساختاری حاکم بر مسأله

برای یک سیستم ایزوترمال، متشکل از بخش سنگ و سیال منفذی، میتوان به کمک مفاهیم انرژی آزاد هلمهولتز، انرژی آزاد گیبس و مفهوم پتانسیل شیمیایی، رابطه زیر را برای جزء حجمی انرژی آزاد گیبس نوشت [۷ و ۲۱].

 $-dG_{v}^{solid} = \varepsilon d\,\sigma + m_{w}d\,\mu_{w} + m_{s}d\,\mu_{s} = E\,dS$

با توجه به اینکه dG^{volid} دیفرانسیل کامل میباشد، با نوشتن روابط ماکسول برای معادله ۱، رابطه زیر بهدست میآید.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \mu_i} = \frac{\partial m_i}{\partial \sigma}, \quad \frac{\partial m_i}{\partial \mu_j} = \frac{\partial m_j}{\partial \mu_i} \tag{(1)}$$

که در آن {w, s} \mathcal{E} اینکه روند حل، خطی است، هدف یافتن روابط تنش-کرنش الاستیسیته میباشد. از این رو، هر یک از مشتقهای جزئی، با یک سری ثابت مرتبط شده و به کمک آنها، تنش و کرنش به هم مرتبط میشوند. بنابراین سه معادله ساختاری برای مرتبط کردن \mathcal{E} = { ε , m_w , m_s } = S = { σ , μ_w , μ_s }

49

طور کامل یک پارامتر شیمیایی محسوب می شود و از رابطه زیر محاسبه می گردد که در آن Ø بیان گر تخلخل مؤثر است [۲۰]. $\gamma = \frac{\phi}{\overline{c_s} \left(1 - \overline{c_s} v_s\right)} \frac{1}{RT}$ (۹)

معادلات انتقال و قوانين تعادل

طبق اصول ترمودینامیکی، ثابت شده که برای فرآیندهای آهسته نزدیک به تعادل، جریانها به صورت خطی با نیروهای متناظر خود در ارتباط هستند. در این مطالعه، جریان آب و نمک به وجـود آمـده درون سـنگ، بـه علـت وجـود گراديان هیدرولیکی و شیمیایی میباشد. همچنین جریان نفوذ مولكولي ناشي از اختلاف پتانسيل شيميايي، توسط قانون فيك وجريان سيال ناشي از اختلاف پتانسيل هيدروليكي، توسط قانون دارسي بيان می گردد. اما یک جریان می تواند ناشی از یک نیروی متناظر و چند نیروی غیرمتناظر باشد. مطابق جـدول ۱، فرآیند مسـتقیم نفوذ فشار درون سـنگ، توسيط رابطه دارسي و فرآيند مستقيم نفوذ يونها ، وسيله رابطــه فيــک تعريـف ميشـود. در مقابــل، فرآیند غیرمستقیم در نفوذ سیال، پدیده اسمز است کے مخصوص مرواد بے خاصیے غشایی میباشد. چنانچه اختلاف پتانسیل شیمیایی در دو طرف غشاء وجود داشته باشد، آب از سمتی که غلظت کمتری دارد، به طرف با غلظت بیشتر نفوذ می کند. از طرف دیگر، فرآیند غیرمستقیم انتقال یون ها، پدیده نفوذ مولکولے فشار ^۵ است کے اثر گرادیان فشار بر روی انتقال نمك و يونها را بررسي مي كند [1].

اکنون دو متغیر سرعت q که بیان گر تخلیه ویژه محلول و r که بیان گر شار نسبی نمک میباشد، به صورت زیر تعریف می شود:

$$q = V_w \,\mathbf{\hat{s}}_w + V_s \,\mathbf{\hat{s}}_s, \quad r = \frac{\mathbf{\hat{s}}_s}{c_s} - \frac{\mathbf{\hat{s}}_w}{c_w} \tag{(1)}$$

2. Drained Bulk Modulus

- 3. Biot Stress Coefficient
- 4. Unconstrained Specific Storage Coeffcient
- 5. Advection
- 6. Discharge of Solution
- 6. Relative Flux

 $-dG_{v}^{s} = \varepsilon d \sigma + (v_{w} \Delta m_{w} + v_{s} \Delta m_{s}) \mathbf{z} \mathbf{z} + (\frac{\Delta m_{s}}{c_{s}} - \frac{\Delta m_{w}}{c_{w}}) \mathbf{z} \pi$ $= \varepsilon d \sigma + \zeta dp + \theta d \pi = E' dS' \qquad (\Delta)$

که در آن دو پارامتر کو θ به شکل زیر تعریف می شوند: $\zeta = v_w \Delta m_w + v_s \Delta m_s, \quad \theta = \frac{\Delta m_s}{c_s} - \frac{\Delta m_w}{c_w}$ بـه کمـک ماتریـس متقـارن <u>D</u>، می تـوان 'S و 'Z را بـه هـم مرتبط کـرد. ضمـن اینکـه بـا توجـه بـه متقـارن هـم مرتبط کـرد. ضمـن اینکـه بـا توجـه بـه متقـارن بـودن ماتریـس <u>D</u>، بـرای کامـل شـدن درایههـای ماتریـس، تنهـا کافی است بـه جـای پنـج پارامتـر، سـه پارامتـر معرفی شـود. ایـن پارامترهـا عبارتنـد از، ۵، θ و (۲) پارامتـر معرفی شـود. ایـن پارامترهـا عبارتنـد از، ۲۵، $\theta = \gamma$. $\mathbf{C} = \begin{pmatrix} c & bC & -\alpha\beta C \\ bC & s_{\sigma} & -\beta S_{\sigma} \\ -\alpha\beta C & -\beta S_{\sigma} & \gamma \end{pmatrix}$

فرم نهایی معادلات ساختاری که مقادیر دوگانه 'E و S' را به هم مرتبط میکند، به شکل زیر میباشد $\varepsilon = C \Delta \sigma + bc (\Delta p - \alpha \Delta \pi)$ (۸-۱)

 $\zeta = bC\,\Delta\sigma + S_{\sigma}\left(\Delta p - \beta\Delta\pi\right) \tag{A-Y}$

$$\theta = -\alpha b C \,\Delta \sigma - \beta S_{\sigma} \Delta p + \gamma \Delta \pi \tag{A-T}$$

به طور کلی، پارامترهای ماتریس <u>C</u> را میتوان به سه گروه تقسیم کرد. اولین گروه، پارامترهای پوروالاستیک کلاسیک میباشد که تراکمپذیری الاستیک در حالت تخلیهای^۲ C (معکوس مدول بالک تخلیہ ای)'، ضریب بیوت'' b ($b \le b \le 0$)، ضریب ذخیرہ ويــژه نامحـدود $S_{\sigma} = \frac{bC}{R}$) S_{σ} نامحـدود ($S_{\sigma} = \frac{bC}{R}$) ويــژه نامحـدود) کـه در آن، B ضریـب اسـکمیتون $(1 \ge B \ge 0)$ نـام دارد. دومین گروه اعداد α و β میباشند که به ترتیب، کوپل شیمیایی-مکانیکی و کوپل شیمیایی-هیدرولیکی را کمّے میکنند. برای سےولت، این اعداد به گونهای معرفی شدهاند که در محدوده (۰ تا ۱) قـرار گیرنـد. حـد پاییـن صفـر، در شـرایط عـدم فعـل و انفعال شیمیایی است که ترکیب سیال منفذی، تغييري نمى كند (پوروالاستيک كلاسيک). حد بالای ۱، مربوط به حالتی است که یونهای نمک درون شیل به دام افتاده باشند (مدل غشاء ایدهآل یونے). آخریےن پارامتےر، عےدد γ اسےت. ایےن عےدد بے www.SID.ir **شرففت** شماره ۲-۸۵، زمستان ۹۴

جدول ۱ – فرایندهای مستقیم و عیرمستفیم در جریان سیال و یونها ۱۱									
ی	گرادیان شیمیایی								
سيال	قانون دارسي	پدیده اسمزی							
يون	نفوذ مولکولی فشار (Advection)	قانون فيک							

[1] 1. 1. 4. 4.

ارائه شکل نهایی معادلات میدانی

در آخرین مرحله، تمامی معادلات حاکم بر مسأله، يعنى معادلات ساختاري، معادلات انتقال و معادلات تعادل، با هم ترکیب شده و معادلات میدانی بهدست مى آيد. معادلات ميدانى شامل يك معادله ناوير و دو معادله انتشار ۲ کویل شده می باشد که در نهایت می توان کرنے اعمالے بر نمونے شیلی را از معادلے ناوير بهدست آورد. ضمن اينكه فشار هيدروليكي و فشار اسمزی از معادلات انتشار، محاسبه می گردد. شکل نہایے معادلہ ناویر بہ صورت زیر است کہ در آن η ضريب تنش پوروالاستيک بوده و در محدوده [0, 5.0] تعريف می شود:

$\varepsilon = \frac{\eta}{G} (\Delta \mathbf{\vec{z}} - \alpha \Delta \pi)$	(14)
$n - \frac{b(1 - Yv)}{v}$	(10)
γ = <mark>Υ()</mark> = ν)	

حال با قرار دادن دو معادله (۸–۱) و (۱۴) در روابط
(۸–۲) و (۸–۳) عبارات زیر بهدست خواهند آمد:
(۱۶)
$$\zeta = S\Delta p - C S\Delta \pi$$

(۱۶) $\theta = -C S\Delta p + [\gamma - \alpha^2(S_{\sigma} - S)]\Delta \pi$
(۱۷) در نهایت با ادغام این روابط در معادلات انتقال

و معادلات تعادل، معادلات انتشار کویال شده به شــکل زیــر حاصـل میشـود: $D \nabla^{\mathsf{Y}} n + 4 D \nabla^{\mathsf{Y}} \pi$ $(\Lambda \Lambda)$

$$\mathbf{C}_{hh} D_h \mathbf{V} p + A_{hc} D_h \mathbf{V} \quad \pi = p \tag{(1A)}$$

$$\mathbf{L}_{ch} D_h \nabla^r p + A_{cc} D_h \nabla^r \pi = \dot{\pi} \tag{19}$$

ضرایب معادلات بالا، به صورت زیر تعریف می شود:

$$A_{hh} = \frac{\varphi - CR}{\varphi - C^2}, \quad A_{hc} = \frac{C\psi\omega - R\varphi}{\varphi - C^2},$$

$$A_{ch} = \frac{C - R}{\varphi - C^2}, \quad A_{cc} = \frac{\psi\omega - CR}{\varphi - C^2}$$
(۲۰)

1. Onsager Principle

2. Chemical Diffusion Coefficient

3. Equilibrium Equation

4. Diffusion Equation

I و I شار جرمی آب و نمک بوده و بیان گر تعداد ا مول های عبوری از واحد سطح فضای متخلخل در واحد زمان است. با استفاده از قوانین فیک و دارسی، مفهموم تابع اتلاف واصول انساگر، معادلات كوپل انتقال به شکل زیر در میآید [۲۰]: $q = -k (\nabla p - R \nabla \pi), \quad r = kR \nabla p - \frac{D_s}{N} \nabla \pi^{(11)}$ که در آن k، ضریب تحرک (نسبت نفوذپذیری ذاتی k به ویسکوزیته μ)، و N (N=RT/v) معرف تنش می باشد. به منظور برقراری ارتباط بین نیروهای رانشی ترمودینامیکی شیمیایی و هیدرولیکی، یک پارامتر بی بعد به نام ضریب انعکاسی شیل R، تعریف میشود ([R € [0, 1]). پارامتـر R نشـان دهنـده توانایـی غشاء در جلوگیری از نفوذ یون ها به درون غشاء میباشد. به این صورت که عدد یک نشان دهنده غشاء کاملا ایدهآل و عدد صفر نشان دهنده عدم وجود هرگونه خاصیت غشایی است که در عبور آب و نمـک، تفاوتـی قائـل نیسـت (سـنگ از لحاظ شـیمیایی خنثی است) [19]. همچنین لازم است ضریب انتشار شیمیایی^۲ D_s نیز تعریف شود. فرآیند نفوذ مولکولی شیمیایی انتقال یون ها درون یک محیط، به علت گرادیان غلظت شیمیایی روی میدهد. این فرآیند با استفاده از ضریب نفوذ D کمیسازی میشود [77]

با جای گذاری رابطه ۱۱ در معادله قانون پایستگی جـرم، قوانیـن تعـادل جرمـی بـر حسـب دو متغیـر q و r، بەدست مىآيد: $abla q = -\Delta \dot{\zeta}, \quad
abla .r = -\Delta \dot{ heta}$ (17)همچنین قانون تعادل مکانیکی^۳ به شکل زیر نوشته مىشود: $\nabla \Delta \sigma = \mathbf{I}$ (17)

در معادلات بالا، _h ضریب انتشار هیدرولیکی^۱ بر حسب او S ضریب ذخیره ویژه تک محوره^۲ (اُدیومتریک^۳) [L^2/T] می باشد که به همراه سایر اعداد تعریف شده در بالا، به شکل زیر محاسبه می شود [۲۰]:

$$D_{h} = \frac{k}{\mu\phi c} , \ \omega = \frac{D_{s}}{D_{h}}$$

$$S = b \left[\frac{\eta}{G} + (\frac{1}{B} - b)C \right], \ S_{\sigma} = \frac{bC}{B}, \ \chi = \frac{S_{\sigma}}{S} \ge 1$$

$$C = \alpha \cdot (\alpha \cdot \beta)\chi, \ \psi = \frac{1}{NS}, \ \varphi = \frac{\gamma}{S} - \alpha^{2}(\chi - 1)$$

$$(\Upsilon))$$

ارائے ہے کروش تحلیل یے عیددی بے رای حل معادلات ميداني مدل ریاضی حاکم بر شرایط آزمایشگاه در اینجا، طول نمونه L، سطح مقطع آن A و معادلات به صورت یک بعدی و در راستای z نوشته می شود. در واقع مطابق شکل ۱، z = 0 بالادست نمونه و z = 1 بیان گر محلی است که به حجم مخزن (۷٫) متصل است. شرایط مرزی در بالادست نمونه (z=0) در هریک از حالات بار گذاری هیدرولیکی (حالت اول) و شیمیایی (حالت دوم) به شکل زیر است که در آن، تابع (H(t $\sigma_{x}^{(r)} = \pi_{m} - \pi_{0} = \sigma_{x}^{(r)} = p_{m} - p_{0}$ تابع یله بوده[†] و تنشرها برابر مے باشــد.

 $\int \Delta \pi^{(\mathbf{Y})} = \sigma_{\cdot}^{(\mathbf{Y})} H(t), \qquad \Delta p^{(\mathbf{Y})} = \cdot, \quad at \quad z = \cdot (\mathbf{Y} \mathbf{Y})$ چنانچـه حجـم V مخـزن در زيـر نمونـه (z ≥ L)، ثابـت در نظر گرفته شود، هر نوع انتقال سیال به آن باعــث افزایــش فشــار مخــزن میگـردد. از ایــن رو بــا انجام یک سری محاسبات جبری، شرایط مرزی در پاییــن دســت نمونــه (z = 1)، برحسـب تغییــرات فشــار هیدرولیکی و اسمزی، به شکل زیر خواهد بود.

$$B_{hh}\nabla p + B_{hc}\nabla \pi = \frac{L}{D_{h}}\dot{p}$$

$$B_{ch}\nabla p + B_{cc}\nabla \pi = \frac{L}{D_{h}}\dot{\pi}$$
(YY)

کــه در آن، ضرایــب B_{ch} ،B_{hc} ،B_{hh} و B_{cc}، خطــی بـوده و $\overline{\pi}$ و با درنظر گرفتن $\overline{c_s}$ غلظت مولے متوسط و فشار اسمزی متناظر با آن، به شکل زیر تعریف می شود [۲۰]:

ل معادلات شـود: $\left[\Delta p^{(1)} = \sigma_{\cdot}^{(1)} H(t), \qquad \Delta \pi^{(1)} = \bullet\right]$

www.SID.ir

$$\Delta p^{(0)} = \sigma^{(0)}_{\cdot} H(t), \qquad \Delta \pi^{(0)} = \cdot at \qquad z = \cdot \Delta \Delta at \qquad z = \cdot \Delta at \qquad z$$

$$\varsigma = \frac{z}{L}, \qquad \tau = \frac{tD_h}{L^*} \tag{(YF)}$$

در واقع، معادلات حاکم بر فشار P(ç, t) و (ç, t) به

شـكل زيـر خلاصـه مىشـود.

$$\iota \frac{\partial^{\mathsf{Y}} X_{hc}}{\partial \varsigma^{\mathsf{Y}}} = \frac{\partial X_{hc}}{\partial \tau}, \quad \boldsymbol{\cdot} < \varsigma < \mathfrak{l}, \quad \mathbf{X} = \begin{cases} P \\ \Pi \end{cases}, \tag{YY}$$

$$X_{h} = X_{ho}H(t), \quad X_{c} = X_{co}H(t), \quad \varsigma = \cdot, \quad X_{ho} = \left\{ \begin{matrix} \mathbf{1} \\ \mathbf{\cdot} \end{matrix} \right\}, \quad X_{co} = \left\{ \begin{matrix} \mathbf{1} \\ \mathbf{1} \end{matrix} \right\}, \quad (\Upsilon \wedge)$$

$$B \frac{\partial X_{hc}}{\partial \varsigma} = \frac{\partial X_{hc}}{\partial \tau}, \quad \varsigma = \mathbf{1}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{2} & \mathbf{$$

$$A = \begin{bmatrix} A_{hh} & A_{hc} \\ A_{ch} & A_{cc} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} B_{hh} & B_{hc} \\ B_{ch} & B_{cc} \end{bmatrix}$$
(\vee \cdot)

به منظور حل مسأله، لازم است مراحل زير انجام - قطریسازی ماتریکس A و جدا کردن⁶ معادلات انتشار کویل شده - جـدا کـردن معـادلات حاکـم بـر شـرايط مـرزى در پایین دست نمونه با قطری سازی ماتریس B - حل کردن هر یک از معادلات انتشار مجزا به $\Phi^{(i)}$ روش تبدیل لاپلاس و بر حسب توابع ویژه و $\Phi_{t}^{(i)}$ این توابع ویژه، خود ترکیب خطی از توابع بیبعدد ⁽ⁱ⁾ و Π⁽ⁱ⁾ میباشند. - بازگشت به فرم P⁽ⁱ⁾ و Π⁽ⁱ⁾ در محیط لاپلاس - بازگشت به حیطه زمان به کمک لایلاس معکوس عددی به روش استیفست [۲۳]

1. Hydraulic Diffusivity Coefficient

- 2. Uniaxial Specific Storage Coefficient
- 3. Oedometric Test
- 4. Heaviside Function
- 5. Uncouple
- 6. Eigen Function
- 7. Stehfest's Method

برای انجام این مراحل، لازم است مقادیر ویژه و بردارهای ویژه ماتریس A، طبق روابط زیر بهدست آید. در این روابط λ_1 و λ_2 مقادیر ویژه و ξ_1 و ξ_2 ر بردارهای ویژه میباشند.

$$\lambda_{\mathbf{1},\mathbf{Y}} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{Y}} \left[A_{hh} + A_{cc} \pm \sqrt{(A_{hh} - A_{cc})^{\mathbf{Y}} + \mathbf{\xi} A_{hc} A_{ch}} \right] \qquad (\texttt{```)}$$

$$\xi_{1} = \begin{bmatrix} \xi_{11} \\ \xi_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{\lambda_{1} - A_{hh}}{A_{hc}} \end{bmatrix}, \quad \xi_{2} = \begin{bmatrix} \xi_{21} \\ \xi_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\lambda_{2} - A_{cc}}{A_{ch}} \\ 1 \end{bmatrix}$$
(°T)

با ضرب ماتریس بردارهای ویژه ξ^{T}_{i} در دو طرف رابطه ۲۷، معادله زیر به دست می آید که با استفاده از مفاهیم هندسی و مفهوم توابع ویژه، به شکل معادله ۳۴ جداسازی می گردد. شکل معادله ۳۴ جداسازی (۳۳)

$$\lambda_i \frac{\partial^{\mathbf{v}} \Phi_i}{\partial \boldsymbol{\zeta}^{\mathbf{v}}} = \frac{\partial \Phi_i}{\partial \tau} \quad \mathbf{\&} \quad \Phi_i = \boldsymbol{\xi}_i^T X \tag{(3.16)}$$

چنانچه لاپلاس $\Phi_{j}^{(\mathbf{w})} \Phi$ با فرض $[1, 2^{2}] \Im(\mathbf{i}, \mathbf{j})$ ، به صورت $\Phi_{j}^{(\mathbf{w})}$ نشان داده شود، می توان معادلات انتشار جدا شده را به روش لاپلاس حل کرد. با در نظر گرفتن معادله ۳۷ به عنوان یک معادله S ،ODE به عنوان پارامتر لاپلاس و شرایط اولیه همگن، عبارت زیر بهدست خواهد آمد:

$$\lambda_i \frac{\partial^{\mathbf{v}} \Phi_i}{\partial \varsigma^{\mathbf{v}}} = s \, \partial \tilde{\Phi}_i \tag{(``\Delta)}$$

با حل معادله دیفرانسیل، شکل عمومی جواب معادله برای هریک از حالتهای بار گذاری به شکل زیر خواهد بود: $\tilde{\Phi}_{j}^{(J)} = a_{ij}e^{\sqrt{s/\lambda_{j}}\varsigma} + b_{ij}e^{-\sqrt{s/\lambda_{j}}\varsigma}$, (۳۶) $a_{ij} = a_{ij}e^{\sqrt{s/\lambda_{j}}}$, در معادله ۶۳، ضرایب ا با قرار دادن شرایط مرزی در معادله ۶۳، ضرایب ا بالا، فشارهای بیبعد در دامنه لاپلاس به شکل زیر حاصل می شود:

$$\begin{split} \tilde{P}^{(\mathbf{j}\mathbf{b})} &= \tilde{\Phi}_{\mathbf{j}}^{(\mathbf{j}\mathbf{b})} + \boldsymbol{\xi}_{\mathbf{j}\mathbf{j}} \tilde{\Phi}_{\mathbf{j}}^{(\mathbf{j}\mathbf{b})} \\ \tilde{\Pi}^{(\mathbf{j}\mathbf{b})} &= \boldsymbol{\xi}_{\mathbf{j}\mathbf{j}} \tilde{\Phi}_{\mathbf{j}}^{(\mathbf{j}\mathbf{b})} + \tilde{\Phi}_{\mathbf{j}}^{(\mathbf{j}\mathbf{b})} \end{split}$$
(\mathcal{W}

بـرای برگردانـدن ایـن جوابهـا از دامنـه لاپلاس بـه دامنه

مستان ۹۴ مستان ۹۴ مستان ۹۴ مستان ۹۴ (مستان ۹۴ مستان ۹۴ مستان ۹۴ مستان ۹۴ مستان ۱

كارایی آن در مسائل پوروالاستیک اثبات شده است [۲۳].

نتايج مدلسازي

عموما در تست نفوذ فشار PPTT، پس از اعمال بارگذاریهای شیمیایی و هیدرولیکی مورد نظر، تغییرات فشار هیدرولیکی در پایین دست نمونه (۲۰٫۹، ثبت و تحلیل می شود. به منظور بررسی عملکرد و صحت راه حل ارائه شده، با در نظر گرفتن یک سری پارامتر معلوم به عنوان خواص شیمیایی یک سری پارامتر معلوم به عنوان خواص شیمیایی و مکانیکی سنگ و سیال، فشارهای بیبعد (P و II)، محاسبه گردید و نمودارهای مربوطه رسم شد. لازم به ذکر است که معادلات در نرمافزار Matlab حل شده است. پارامترهای مورد نظر جهت اجرای کد نوشته شده در جدول ۲ ارائه گردیده است.

همان گونیه کیه در شیکل ۲ مشیاهده می شیود، در مرحله بار گذاری هیدرولیکے، به دلیل اختلاف فشار بین بالادست و پایین دست نمونه، سیال به سنگ نفوذ کرده و با گذشت زمان، فشار در پاییندست افزایـش می یابـد، تـا اینکـه فشـار در دو سـمت برابـر شود. اما در مرحله بارگذاری شیمیایی، با توجه به اینکه غلظت نمک در بالادست بیشتر است، آب از محیط با شوری کمتر، به محیط با شوری بیشتر حركت مىكند تا غلظتها به تعادل برسد. از این رو با خروج سیال از نمونه، فشار در یاییندست نمونه تا رسیدن به تعادل، کاهش می یابد. شکل ۳ نتایج حاصل از تست انتقال فشار را برای یک نمونه شیل در شرایط آزمایشگاهی نشان میدهد. این شیل متعلق به سازند قم بوده و از رخنمون کوههای اطراف سمنان تهیه شده است کــه در آزمایشــگاه مکانیـک ســنگ دانشــگاه صنعتــی امیرکبیر مورد آزمایش قرار گرفته است [۲۴ و ۲۵]. همان گونے کے مشاهدہ می شود، رونے تغییرات فشار در بالادست نمونه در نمونه آزمایشگاهی، به خوبی مشابه روند مدل شبیهسازی میباشد.

شبیهسازی نیمه تحلیلی ...

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	ویژگی سیال			
φ	7.89	Е	۰/۲۸ GPa	R	۰/٣	V _d	۴×۱۰ -۶ m ³	سيال اشباع	KC12 6% wt		
А	$\Delta \times 1 \cdot {}^{-r} m^2$	ν	۰/۸۳	D _h) • -9	K _f	۲/۳ GPa	كننده	KC15.0% Wt		
L	$r/\Delta \times 1 \cdot r m$	G	۰/۸۳ GPa	ω	•/•)	b	١		NaCl		
Т	790/80 K	В	٠/٩	α	٠/٩	β	١	سيال تست	15% wt		

جدول ۲- پارامترهای معلوم جهت بررسی راه حل ارائه شده



شکل ۲- تغییرات فشار هیدرولیکی در پایین دست نمونه برای حالت الف) بارگذاری هیدرولیکی و ب) بارگذاری شیمیایی

پروفایل فشار در طول نمونه

شکل ۴، نشاندهنده جبهـ انتشار فشار از بالادست

نمونیه به سیمت پاییین دست میباشد. همان گونیه

کے دیے دہ می شود در بارگے ذاری هیدرولیکے، در

زمان های اولیه، فشار در بالادست بیشترین حالت و

در پایین دست، تقریب برابر با صفر میباشد.

البته ابعاد محورهای دو شکل یکسان نبوده و براساس روابط ۲۵ و ۲۶ قابل تبدیل به یکدیگر میباشد. همان طور که مشاهده میشود، محورهای شکل ۲، زمان و فشار بی بعد و محورهای شکل ۳، زمان و فشار میباشد. در واقع پس از فاز اشباع، در مرحله بارگذاری هیدرولیکی، فشار در بالادست نمونه روند افزایشی و سپس در فاز بارگذاری شیمیایی، روند کاهشی دارد.



شکل ۳- نتایج حاصل از تست PPTT بر روی نمونه سنگ سازند قم [۲۴ و ۲۵]



شکل ۴- نیمرخ فشار هیدرولیکی در طول نمونه (۲ (ζ, ۲) ، تحت بارگذاریهای الف) فیزیکی و ب) شیمیایی در زمانهای مختلف

رفتار پوروالاستیک شیمیایی شیل در تماس با سیال حفاری، شبیهسازی گردید. مقایسه نتایج بهدست آمده از شبیهسازی و دادههای آزمایشگاهی تست نفوذ فشار، نشان میدهد که نتایج شبیهسازی تطابق خوبی با نتایج فشار واقعی حاصل از آزمایش دارد. در واقع این مدل به خوبی میتواند برهم کنش شیمیایی- فیزیکی شیلهای حساس به آب را شبیهسازی نماید. در نتیجه با تغییر خواص سیال حفاری، میتوان رفتار شیل در مجاورت آن را شبیهسازی نمود و بهترین ترکیب سیال حفاری جهت کاهش مشکلات و هزینهها را پیشاه کرد.

اما با گذشت زمان، پس از رسیدن موج فشاری به انتهای نمونه، فشار در بالادست نیز افزایش داشته و در تمام طول نمونه به تعادل رسیده است. همچنین این شکل، تاثیر برعکس بارگذاری شیمیایی، نسبت به بارگذاری هیدرولیکی در پروفایل فشار هیدرولیکی را به تصویر کشیده است.

نتيجه گيرى

51

در این مقاله با به کار گیری تئوری خطی پوروالاستیک شیمیایی، معادلات میدانی حاکم بر مسأله استخراج شد. با توجه به کوپل بودن معادلات انتشار، ضمن ارائه روشی تحلیلی-عددی، جهت حل معادلات،

منابع

[1]. Van Oort E., Hale A. H., Mody F. K, and Roy S., "*Transport in shales and the design of improved water-based shale drilling fluids*," SPE 28309, 1996.

[2]. Van Oort E., "On the physical and chemical stability of shales," J. Petrol Sci. Eng. Vol. 38, p. 213, 2003.

[3]. Chenevert M. E. "Shale control with balanced-activity oil continuous mud," J. Pet. Tech., pp. 1309-1316, 1970.
[4] Sarout J. and Detournay E. "Chemoporoelastic analysis and experimental validation of the pore pressure transmission test for reactive shales", Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., Vol. 48, p. 759, 2011.

[5] Al-Bazali T., Zhang J., Chenevert M. E., and Sharma M. M., "*Factors controlling the compressive strength and acoustic properties of shales when interacting with water-based fluids*," Rock. Mech. Rock. Eng., Vol. 45, pp. 729-738, 2008.

[6]. Diaz-Perez A., Cortes-Monroy I., and Roegiers J. C. "The role of water/clay interaction in the shale characterization," J. Petrol. Sci. Eng., Vol. 58, pp. 83-98, 2007.

[7]. Sherwood J. D., "Biot poroelasticity of a chemically active shale," Proc. R. Soc. London, 440, p. 365, 1993.

[8]. Biot M. A. "General theory of three-dimensional consolidation," J. Appl. Phys., 12, p. 155, 1941.

[9]. Sherwood J. D. and Bailey L. "Swelling of shale around a cylindrical well-bore," Proc. R. Soc., London, A 444, pp. 161–184, 1994.

[10]. Heidug W. and Wong S. W., "Hydration swelling of water-absorbing Rocks: a constitutive model," Int. J. Numer Anal Methods Geomech, 20, p. 403, 1996.

[11]. Roshan H. and Rahman S. S. "A fully coupled chemo-poroelastic Analysis of pore pressure and stress distribution around a wellbore in water active rocks", Rock. Mech. Rock. Eng., 44, pp. 199-210, 2011.

[12]. Roshan R. and Rahman S. S. "Analysis of pore pressure and stress distribution around a wellbore drilled in chemically active elastoplastic formations," Rock. Mech. Rock. Eng. 44, 541-552, 2011.

[13]. Ghassemi A., Tao Q., and Diek A. "Influence of coupled chemo-poro-thermoelastic processes on pore pressure and stress distributions around a wellbore in swelling shale," J. Petrol. Sci. Eng., 67, pp. 57-64, 2009.

[14]. Roshan H. and Aghighi M. A., "Analysis of pore pressure distribution in shale formations under hydraulic, chemical, thermal and electrical interactions," Trans. Porous Med., 92, pp. 61-81, 2012.

[15]. Qian W., Yingcao Z., Gang W., Hongwei J., and Yushi L., "*A fluid-solid-chemistry coupling model for shale wellbore stability," Petrol. Explor. Develop.*, 39 (4), pp. 508-513, 2012.

[16]. Staverman A. J., "The theory of measurement of osmotic pressure," Rec. Trav. Chim., 70, pp. 344-352, 1951.

[17]. Fritz, S. J. and Marine I. W., "Experimental support for a predictive osmotic model of clay membranes", Geochemistry Cosmochim, Acta 47, 1515-1522, 1983.

[18]. Mody F. K. and Hale A. H., "A borehole stability model to couple the mechanics and chemistry of drilling fluid shale interaction," J. Pet. Tech. 1093, Nov. 1993.

[19]. Kiewiet L., "Membrane efficiency screening equipment test procedures," CSIRO Petroleum –Specialised Drilling Fluids Laboratory, 2007.

[20]. Detournay E., Sarout J., Tan C., and Caurel J., "Chemoporoelastic parameter identification of a reactive shale," *IUTAM Symposium on Physichemical and Electromechanical Interaction in Porous Media*, pp. 125-132 2005.

[21]. Firoozabadi A., "Thermodynamics of hydrocarbon reservoirs," McGraw-Hill, 1998.

[22]. Sherwood J. D. and Craster B., "Transport of water and ions through a clay membrane," J. Coll. Interf. Sci. 230, pp. 349-358, 2000.

[23]. Egonmwan A. O., "The numerical inversion of the laplace transform," M.Sc. Dissertation, Johannes Kepler University. 2012.

[۲۴]. رحیم زاده کیوی، ۱.، "شبیهسازی پایداری دیواره چاه دارای شیل و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی،" پایاننامه کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۹۲.

[25]. Rahimzadeh Kivi I., Ameri M. J., and Ghassemi A., "Membrane properties and pore pressure transmission of Ghom shale: experimental and numerical study," Submitted to the International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Elsevier B. V. 2016..