



نوع مقاله (مقاله پژوهشی)

بررسی تئوری و مفهومی نقش ژئوشیمی آب منفذی در تخمین فشار شکست با مدل‌های مرسوم در عملیات شکافت هیدرولیکی

محمد رضائی^۱؛ محسن مسیحی^۲؛ حسن ماهانی^{*۲}

۱- دانشجوی دکتری؛ دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف

۲- استاد؛ دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۲۶ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۰۸

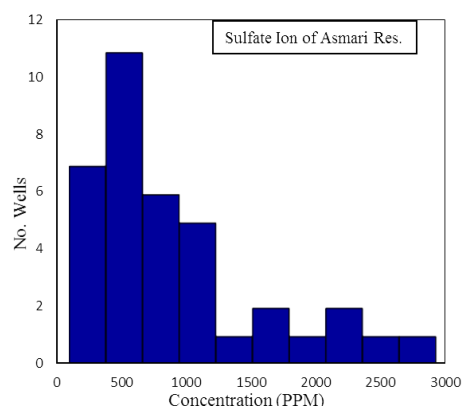
شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/JPG.2023.387350.1193

چکیده

فشار شکست سنگ پارامتری کلیدی در طراحی عملیات شکافت هیدرولیکی می‌باشد. فاکتورهای خواص سنگ (مکانیکی و پتروفیزیکی)، خواص سیال، میدان تنش‌های برجا و فشار منفذی عوامل موثر بر فشار شکست را شامل می‌شوند. براساس داده‌های میدانی، ترکیب یونی آب منفذی و برهم‌کنش‌های ژئوشیمیایی در نقاط مختلف یک سنگ مخزن تحت یک میدان تنش یکسان، می‌تواند متفاوت باشند. بنابراین در این نقاط، فشار شکست نیز می‌تواند متفاوت رفتار کند. به کمک مدل‌های تئوری مختلف می‌توان فشار شکست را تخمین زد. اما در روابط این مدل‌ها اثر تعامل ژئوشیمیایی آب منفذی-سنگ مستقیماً دیده نمی‌شود. همچنین دقت تخمین فشار این روابط کماکان چالش برانگیز است. در این مطالعه با استفاده از نتایج پژوهش‌های پیشین، دقت مدل‌های مرسوم تخمین فشار شکست و اثرات احتمالی شیمی آب مخزن بر فشار شکست بررسی گردید. همچنین مدل جدیدی با مفهوم تنش موثر در قالب فشار انفصال دانه-به-دانه و به‌کارگیری اصل برهم‌نهی توزیع تنش‌های اطراف دیواره چاه توسعه یافت. بر اساس نتایج، اکثر مدل‌های مرسوم تخمین فشار شکست در عملیات شکافت هیدرولیک ناموفق هستند. به عنوان مثال، خطای متوسط مدل بسیار مرسوم هابرت-ویلیس حدود ۳۴/۷٪ می‌باشد. همچنین این بررسی نشان می‌دهد که شیمی آب منفذی بر ترشوندگی و فشار شکست سنگ به‌دلیل مشارکت نیروهای بین سطحی طبق تئوری *Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek (DLVO)* اثر دارد. اما میزان و نحوه‌ی تاثیر ترشوندگی (آب-دوستی یا نفت-دوستی) سنگ کربناته بر فشار شکست سنگ به واسطه‌ی تغییر استحکام سنگ مبهوم و به نحوه‌ی جایگیری فازهای ترکننده در سطوح تماس دانه‌های سنگ وابسته می‌باشد. نتایج مدل مفهومی نشان داد که با افزایش غلظت یون سولفات موجود در آب منفذی سنگ کربناته ریزدانه (گچی (Chalk))، فشار شکست سنگ کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی

شیمی آب منفذی؛ فشار شکست سنگ؛ عملیات شکافت هیدرولیکی؛ مدل تخمین و نیروهای بین سطوح



شکل ۱. نمودار توزیع میزان یون SO_4^{2-} در آب منفذی نقاط مختلف مخزن آسماری یکی از میداین نفتی جنوب غربی کشور

در ارتباط با شکست هیدرولیکی، تعاملات ژئوشیمیایی سنگ-سیال می‌تواند بر خواص ژئومکانیکی (مانند مقاومت کششی و تک محوره) به عنوان عامل استاتیک مخزن و بر توزیع و وضعیت جریان سیالات به عنوان عامل دینامیک مخزن اثر بگذارد. تاثیر این تعاملات ممکن است به تغییر فشار شکست سنگ دیواره چاه منجر شود. بنابراین به علت شرایط متفاوت آب منفذی یک سنگ مخزن، طراحی این عملیات می‌بایست متفاوت باشد. در این خصوص یکی از مکانیزم‌های همراه با تاثیر ژئوشیمیایی سنگ-سیال بر فشار شکست، مرتبط با نیروهای ناشی از بارهای الکتریکی موجود در سطح ذرات سنگ و سیال می‌باشد که علاوه بر اثرگذاری بر استحکام سنگ، می‌تواند ترشوندگی را کنترل کند. همچنین در حالت استاتیک و صرف نظر از تغییر فشار منفذی به واسطه جریان سیال به داخل سنگ در حین عملیات شکافت هیدرولیکی، تاثیر ترشوندگی به تنهایی بر فشار شکست مشخص نیست. فشار شکست را می‌توان به کمک روابط تئوری که با مدل‌های مختلف ارائه شده‌اند [۱]، [۲]، [۳] تخمین زد، اما در این روابط اثر مستقیم تعاملات ژئوشیمیایی سنگ-سیال در فشار شکست لحاظ نشده‌است. از این رو خلا مطالعات تئوری و آزمایشگاهی در خصوص نقش ژئوشیمیایی آب منفذی در تخمین فشار شکست در عملیات شکافت هیدرولیکی وجود دارد. در این مطالعه ابتدا دقت مدل‌های مرسوم تخمین فشار

۱. پیش‌گفتار

تکنیک شکافت هیدرولیکی اولین بار در سال ۱۹۴۸ به صنعت نفت معرفی شد [۱]. در این سال گزارشی درخصوص مقایسه عملکرد روش اسیدکاری و شکافت هیدرولیکی توسط آقای کلارک^۱ منتشر گردید. در این گزارش روش شکافت هیدرولیکی به عنوان تکنیکی که با ایجاد شکستگی در سنگ های کم تراوا توسط یک سیال مشخص باعث افزایش تراوایی سنگ دیواره چاه می‌شود، معرفی شده است. امروزه این روش کارایی های مختلفی همچون تقویت شبکه شکافت مخازن شکافدار، افزایش رسانش گرمایی مخازن زمین گرمایی، کنترل تولید شن در مخازن ماسه سنگی سست دانه و غیره دارد. عملیات شکافت هیدرولیکی به عوامل مختلفی همچون خواص سنگ، خواص سیال و میزان و نحوه توزیع تنش های منطقه ایی وابسته می باشد. در این عملیات فشار شکست سنگ^۲، فشاری که سنگ در آن شکسته می شود، نقش کلیدی ایفا می کند. در بحث طراحی و بررسی محدودیت های عملیات شکافت هیدرولیکی توسط مهندسين طراح، فشار شکست بسیار حائز اهمیت می باشد [۱]. فشار شکست موقعیت های مکانی مختلف یک نوع سنگ مخزن در شرایط تنش منطقه ایی یکسان، به خواص سیال در نقاط مختلف آن و تعاملات ژئوشیمیایی سنگ-سیال می تواند وابسته باشد. براساس مطالعه انجام شده بر روی مخزن آسماری یکی از میداین نفتی جنوب غربی کشور مشخص شد که شیمی آب منفذی در نقاط مختلف یک سنگ مخزن می تواند بسیار متفاوت باشد. نتایج تجزیه شیمیایی آب سازندی ۳۹ حلقه چاه متعلق به این مخزن نشان داده است که آب سازندی چاه‌های موقعیت‌های مکانی مختلف، ترکیب یونی متفاوتی دارند. به عنوان نمونه، نمودار توزیع غلظت یون سولفات آب سازندی بخش‌های مختلف این مخزن در شکل (۱) خلاصه شده است. نمودار توزیع حاکی از تغییر شدید غلظت این یون در گستره ۱۰۰ تا ۲۷۵۰ پی پی ام می‌باشد.

² Formation Breakdown Pressure: FBP

¹ J. B. Clark (Stanolind Oil and Gas Co.)

میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب همبستگی پیرسون (R) می باشد.

جدول ۱. خلاصه‌ای از مدل‌های مرسوم تخمین فشار شکست [۳]، [۴]، [۵]

رابطه	نام مدل
$P_b = \frac{\sigma_T + 3\sigma_3 - \sigma_1 - \eta P_p}{1 + \beta - \eta}$	اشمیت و زوبک ^۹ ۱۹۸۹
$P_b = \sigma_T I^{-2} + \frac{1}{2} \sigma_3 (1 + 2I^{-2} + 3I^2) + \frac{1}{2} \sigma_1 (1 - 3I^2)$	آیتو و هایاشی ^{۱۰} ۱۹۹۰
$I = \frac{R_w}{(R_w + 4D_c)}$	
$P_b = \sigma_T + K_3 \sigma_3 + K_1 \sigma_1$	رامل ^۱ ، ۱۹۸۷
$\sigma_T = \frac{K_{IC}}{f(d, a)}$	
$P_b = \sigma_T + K_3 \sigma_3 + K_1 \sigma_1$	رامل ^{۱۱} ، ۱۹۸۷
$P_b = \sigma_T + K_3 \sigma_3 + K_1 \sigma_1$	رامل ^۳ ، ۱۹۸۷
$P_b = \sigma_T + K_3 \sigma_3 + K_1 \sigma_1$	رامل ^۴ ، ۱۹۸۷
$P_b = 2\sigma_3 - P_p$	روش کرش ^{۱۲} ۱۸۹۸
$P_b = \sigma_1 + C\{0.75\sigma_3 - \sigma_1 - P_p\} + P_p$	عدنوی و بلینه ^{۱۳} ۲۰۰۸
$P_b = \sigma_1 + C\{0.75\sigma_3 - \sigma_1 - P_p\} + P_p$	عدنوی و بلینه ^۲ ۲۰۰۸
$P_b = \sigma_T + 3\sigma_3 - \sigma_1 - P_p$	هابرت و ویلیس ^{۱۴} ، ۱۹۵۷
$P_b = \frac{\sigma_T + 3\sigma_3 - \sigma_1 - \eta P_p}{2 - \eta}$	هایمسون و فرهاست ^{۱۵}

شکست با استفاده از داده‌های عملیاتی و آزمایشگاهی شکافت هیدرولیکی منتشر شده در مقاله‌های پیشین [۳]، [۴]، [۵] بررسی گردید. سپس به منظور یافتن ارتباط بین ژئوشیمی آب منفذی و فشار شکست، مکانیزم‌های اثرگذار بر سنگ در حالت استاتیک مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت با توسعه یک رابطه با مفهوم تنش موثر و فشار انفصال^۳، فشارهای شکست یک سنگ کربناته اشباع از آب نمک سدیم سولفات با قدرت یونی‌های مختلف بررسی شد.

۲. تئوری و روش تحقیق

۲.۱. مدل‌های مرسوم تخمین فشار شکست

شکست‌های هیدرولیکی در جهت تنش بیشینه و اغلب به صورت شکست حالت ۱ (کششی) می‌باشد [۱]. در بحث شبیه سازی ها و طراحی های عملیات شکافت هیدرولیکی، مجموعه ای از روابط تئوری که از مدل ها و معیار های مختلف شکست بدست آمده اند وجود دارند که به کمک آن می توان فشار شکست سنگ را تخمین زد. بسیاری از مدل‌های تخمین فشار شکست در طراحی عملیات شکافت هیدرولیکی براساس معیار مقاومت کششی سنگ توسعه یافته‌اند [۲]. در این مطالعه یازده مدل مرسوم و روابط ریاضی آنها در جدول (۱) گزارش شده است. جزئیات بیشتر این روابط در مراجع [۳]، [۴] موجود می‌باشد.

در این بخش داده‌های ۱۶۸ عملیات شکافت هیدرولیکی به صورت میدانی و آزمایشگاهی جمع آوری شدند [۴]، [۵]. مدل‌ها با استفاده از داده‌ها و نتایج ۱۴۱ عملیات میدانی از لحاظ موفقیت در پیش‌بینی فشار شکست توسط پنج معیار مختلف آماری مورد بررسی قرار گرفتند. معیارهای آماری رتبه‌بندی شامل: نسبت موفقیت مدل (SR)^۴، خطای میانگین مربع باقیمانده (MRE)^۵، خطای میانگین مربعات (MSE)^۶،

^۹ Schmitt and Zoback

^{۱۰} Ito and Hayashi

^{۱۱} Rummel

^{۱۲} Kirsch

^{۱۳} Aadnoy and Belayneh

^{۱۴} Hubbert and Willis

^{۱۵} Haimson and Fairhurst

^۳ Disjoining Pressure

^۴ SR: Success Ratio

^۵ MRE: Mean Residual Square Error

^۶ MSE: Mean Squared Error

^۷ MAE: Mean Absolute Error

^۸ R: Pearson Correlation Coefficient

کرد: (۱) اثرات موینگی، (۲) اثرات شیمیایی و (۳) اثرات فیزیکی و شیمیایی.

گروهی از محققان بر این باورند که با افزایش اشباع سیال غیرترکننده و افزایش فشار موینگی، استحکام سنگ گچ افزایش می‌یابد [۸]. در این خصوص اکثر محققین تاثیر این عامل را بر روی استحکام سنگ رد کرده اند. در حالی که اگر سنگ اشباع از متانول توسط آب تزریقی جابه‌جا شود، نیروی موینگی کاملاً محو و استحکام سنگ بیشتر می‌شود [۹]. بنابراین عامل نیروی موینگی به‌تنهایی صادق نیست و این استحکام به نوع سیال منفذی بستگی دارد.

گروهی از محققان نشان دادند که مهاجرت کلسیم سطح سنگ گچ همراه کربنات (به علت انحلال)، باعث کاهش حجم دانه‌ها، تغییر ساختار سطح تماس دانه‌ها و کاهش مقاومت سنگ می‌شود [۶]. اما وجود یون منیزیم در آب منفذی و جایگزینی آن با کلسیم سطح دانه‌ها، سنگ را کمتر تضعیف می‌کند [۱۰]. اثر فیزیکی و شیمیایی، عمدتاً در سنگ‌های کلسیتی ترک‌دار مورد مطالعه قرار گرفته‌است. در این خصوص برخی محققان اظهار کرده‌اند که افزایش قدرت یونی سدیم کلرید به عنوان آب سازندی از طرفی باعث کاهش نیروی دافعه‌ی الکترواستاتیک و از طرف دیگر باعث انحلال و تغییر شکل نوک ترک‌ها می‌شود و در حقیقت ترک‌ها را در مسیر با مقاومت بیشتر برای شروع شکستگی قرار می‌دهد. به همین علت منجر به استحکام و افزایش فشار لازم جهت شکست کششی سنگ می‌شود [۱۰]. در خصوص سنگ‌های آهکی که حجم زیادی از سنگ‌های مخزنی کشور را تشکیل می‌دهند محققان نشان دادند که انحلال سنگ توسط آب منفذی یا آب دریا بسیار ناچیز است [۱۱]، [۱۲]، [۱۳]. بنابراین به منظور اثرگذاری این‌گونه واکنش‌های شیمیایی، تزریق صدها حجم منفذی^{۱۸} سیال به داخل منافذ سنگ نیاز است [۱۳].

همچنین شیمی متفاوت سیال منفذی و تزریقی (مانند تزریق آب کم‌شور یا مهندسی شده که برای ازدیاد برداشت نفت مورد توجه می‌باشد) می‌تواند بر ترشوندگی سنگ تاثیر بگذارد و غالب بودن نوع سیال پوشش دهنده‌ی دانه سنگ می‌تواند بر استحکام سنگ و فشار شکسته شدن سنگ تاثیر

رتبه‌بندی نهایی مدل‌ها با در نظر گرفتن نتیجه تمام معیارها می‌باشد. لازم به ذکر است از ۲۷ داده آزمایشگاهی به طور جداگانه جهت ارزیابی دقت پیش بینی فشار شکست مدل بسیار مرسوم هابرت-ویلیس استفاده گردید. در این جدول در روابط مدل‌ها P_b فشار شکست، σ_1 تنش کل بیشینه، σ_3 تنش کل کمینه، P_p فشار منفذی (فشار مخزن)، σ_T مقاومت کششی سنگ، η ثابت الاستیک منفذی، β عدد تصحیح تخلخل، K_I ضریب تنش بیشینه، K_3 ضریب تنش کمینه، I عدد بی بعد فاصله رابطه آیتو-هایاشی، R_w شعاع چاه، DC فاصله بحرانی، K_{TC} چقرمگی شکاف، d قطر چاه و a نصف طول شکاف می‌باشد.

۲.۲. ژئوشیمی آب منفذی

در اینجا به منظور مشخص شدن نحوه و مکانیزم‌های تاثیرگذار آب منفذی بر سنگ، نتایج مقاله‌های پیشین به صورت تئوری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

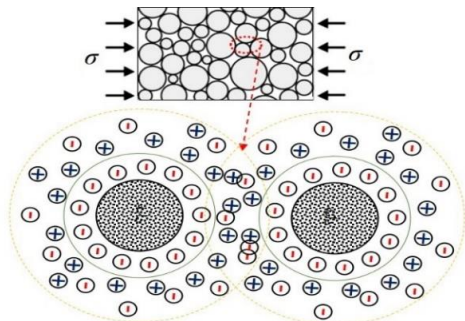
تاثیر ژئوشیمی آب منفذی در مقیاس میکروسکوپی با مکانیزم‌های شیمیایی (مانند انحلال دانه‌های سنگ و رسوب) و فیزیکی (که این اثر به‌طور ذاتی شیمیایی می‌باشد اما براساس تغییر پتانسیل الکتریکی سطوح عمل می‌کند) در ارتباط می‌باشد [۶]. بدون حضور آب منفذی، سنگ‌های خشک به علت غالب بودن نیروی جاذبه‌ی واندروالس نسبت به سنگ‌های اشباع از آب استحکام بیشتری دارند [۷]. در واقع، وجود آب به عنوان سیال قطبی با ثابت دی‌الکتریک بالا به علت اعمال نیروی دافعه‌ی الکترواستاتیک بین سطوح دانه‌های سنگ باعث کاهش مقاومت آن می‌شود. در این خصوص در بین انواع مختلف نمونه‌های سنگ، سنگ‌های کربناته (دولومیت، سنگ آهک^{۱۶} و سنگ گچ^{۱۷}) بیشترین حساسیت را نسبت به آب دارند [۸]. مکانیزم‌های متعددی برای توضیح تأثیر نوع سیال منفذی بر رفتار مکانیکی سنگ پیشنهاد شده‌است. این مکانیزم‌ها را می‌توان به سه گروه طبقه بندی

¹⁸ Pore Volume

¹⁶ Limestone

¹⁷ Chalkstone

دافعه می‌باشد که با فشار انفصال توصیف می‌شود.



شکل ۲. لایه های باردار اطراف دو دانه سنگ (لایه های دوگانه دارای هم‌پوشانی در اطراف دانه‌ها) [۷]، [۱۷].

۲.۳. توسعه رابطه فشار انفصال^{۲۱} در سیستم

الاستیک منفذی

اگر یک برش مربعی از یک سنگ مانند تصویر بالای شکل (۲) با سطح جانبی کل A_T و تنش کل اعمالی (خارجی) بر آن σ فرض شود، آنگاه تنش‌های اعمالی بر دانه‌ها از تفاوت بین تنش کل اعمالی و فشار منفذی ناشی می‌شود. حال اگر نیروی وارد بر سطح یک دانه را در نظر بگیریم، تمام نیروی وارد شده F_T به سطح دانه-به-دانه F_g منتقل می‌شود [۱۷]. بنابراین تعادل نیروها در سطح دانه-به-دانه به صورت معادله (۲) خواهد بود:

$$F_T = F_g \quad (2)$$

که از نظر تنش و مساحت می‌توان به صورت معادله (۳) بیان کرد [۱۷]:

$$\sigma A_T = \sigma_c A_c + P_p (A_T - A_c) \quad (3)$$

که در آن A_c سطح تماس دانه و σ_c تنش موثر نرمال وارده بر سطح تماس دانه می‌باشد. حال پارامتر λ را به صورت $\frac{A_c}{A_T}$ معرفی می‌نماییم. آنگاه خواهیم داشت:

$$\sigma = \lambda \sigma_c + (1 - \lambda) P_p \quad (4)$$

بگذرد. بر اساس مرجع [۱۲] با افزایش غلظت یون سولفات در آب منفذی سنگ آبدوست‌تر و استحکام سنگ کمتر می‌شود. اما براساس مرجع [۱۴] با افزایش غلظت یون سولفات در آب منفذی با وجود آبدوستی، استحکام سنگ بیشتر می‌شود. بر اساس مرجع [۱۳] با افزایش غلظت یون سولفات در آب منفذی، سنگ آبدوست‌تر می‌شود، اما استحکام سنگ تغییر نمی‌یابد. همچنین براساس [۱۵]، [۱۳] با افزایش یون منیزیم در شیمی آب منفذی سنگ نفت‌دوست‌تر و استحکام سنگ بیشتر می‌شود.

این نتایج، تناقض‌های زیادی را نشان می‌دهند. ترشوندگی سنگ مخزن به میزان پایداری فیلم آب بر روی سطح دانه های سنگ نسبت داده می‌شود. این پایداری، محصول برهم‌کنش نیروهای بین سطحی می‌باشد [۱۶]. برآیند این نیروهای بین سطحی توسط فشار انفصال بیان می‌شود. یک فیلم آب پایدار دارای فشار انفصال کل مثبت (به علت غلبه نیروهای دافعه) می‌باشد و زمانی که فشار انفصال کل منفی (به علت غلبه نیروهای جاذبه) باشد، ناپایدار می‌شود. نظریه DLVO جهت توصیف نیروهای بین مولکولی که بین سطوح باردار یا ذرات کلئیدی در محلول الکترولیت عمل می‌کنند، توسعه یافته است. این نیروها به صورت دافعه یا جاذبه می‌باشند و پایداری سیستم با نیروی کل به صورت معادله (۱) تعیین می‌شود [۷]:

$$F_T(h) = F_A(h) + F_R(h) \quad (1)$$

که در آن F_T ، F_A و F_R به ترتیب نیروی برآیند کل، نیروی جاذبه و نیروی دافعه، به عنوان تابع فاصله h (ضخامت فیلم آب جداکننده سنگ-نفت یا فاصله بین دو لایه باردار) از سطح ذرات می‌باشند [۱۳]، [۱۶]. بار الکتریکی موجود بر سطح ذرات نه تنها ممکن است بر ترشوندگی سنگ تاثیر بگذارد بلکه می‌تواند یک دافعه‌ی الکترواستاتیکی در ناحیه سطح تماس ذرات ایجاد و بر مقاومت سنگ تاثیر بگذارد. تغییر فاصله بین سطح دانه-به-دانه، در یک سنگ اشباع از آب‌نمک باعث هم‌پوشانی^{۱۹} لایه نفوذ^{۲۰} سطح هر دانه با دانه دیگر می‌شود (شکل (۲)). این هم‌پوشانی عامل پدیدار شدن یک نیروی

²¹ Disjoining Pressure

¹⁹ Overlap

²⁰ Diffusion Layer

در شرایط ژئوشیمیایی مختلف سیال-سنگ به داده‌های پتانسیل زتای سطح نیاز دارد. به کمک اصل برهم‌نهی^{۲۲}، می‌توان ترم فشار انفصال موضعی محیط سیال-سنگ را در توزیع تنش نرمال موثر مماسی $\sigma_{\theta\theta}$ در حالت دینامیک (حین عملیات شکافت هیدرولیک) اعمال و به صورت رابطه (۹) بیان کرد:

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3 - 2\alpha P_p}{2} \left(1 + \frac{r_w^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \left(1 + 3 \frac{r_w^4}{r^4} \right) \cos(2\theta) - P_w \frac{r_w^2}{r^2} - \eta \Delta P(r, t, q) + Z P_D \quad (9)$$

در اینجا α ضریب بیو، P_w فشار سیال داخل چاه و θ زاویه نسبت به تنش بیشینه می‌باشد. پارامتر $\Delta P(r, t, q)$ مقدار فشار مضاعف در حین تزریق و جریان سیال شکاف‌زنی می‌باشد که وابسته به فاصله (r)، دبی تزریق (q) و در سیال‌های تراکم‌پذیر تابعی از زمان (t) می‌باشد. نوع ترشوندگی سنگ ناشی از شیمی آب منفذی در این ترم نیز اثر دارد که در این مقاله به آن پرداخته نمی‌شود. براساس رابطه (۹) می‌توان اثر P_D را در معادله‌های تخمین فشار شکست اصلاح نمود و در شرایط ژئوشیمیایی مختلف، فشار شکست را پیش‌بینی کرد. به‌طور مثال رابطه هایمسون-فراست (H-F) با در نظر گرفتن اثر P_D به صورت رابطه (۱۰) بسط داده می‌شود:

$$P_b = \frac{\sigma_T + 3\sigma_3 - \sigma_1 - \eta P_p + Z P_D}{2 - \eta} \quad (10)$$

به کمک روابط (۱۱) و (۱۲) [۷]، [۱۲] مقادیر P_D برای سطوح باردار تقریباً یکسان و با هم‌پوشانی نسبتاً ضعیف لایه‌ی دوگانه قابل محاسبه می‌باشد. در این روابط، A ثابت هاماکر، ψ_0 پتانسیل سطح، I قدرت یونی، k معکوس طول دبابی، ε ثابت دی‌الکتریک و T دمای مطلق می‌باشد.

$$P_D = \frac{-A10^{27}}{6\pi h^3} + \frac{1.1210^6 \times I \times \psi_0^2 e^{-kh}}{T} \quad (11)$$

تنش بین دانه‌ای را می‌توان با عملیات حدگیری که در آن λ به شدت کوچک می‌شود به‌دست آورد:

$$\lim_{\lambda \rightarrow 0} \lambda \sigma_C = \sigma_g \quad (5)$$

به طوری که تنش "موثر" اعمالی روی دانه‌های منفرد، σ_g ، به صورت معادله (۶) حاصل می‌شود:

$$\sigma_g = \sigma - (1 - \lambda) P_p \quad (6)$$

در شرایط میکروسکوپی سطح تماس دانه ($\lambda \rightarrow 0$) و با فرض تماس جزئی و وجود فیلم آب بر سطوح دانه‌ها، تنش حاصل از این سیال به صورت معادله (۷) معرفی می‌شود:

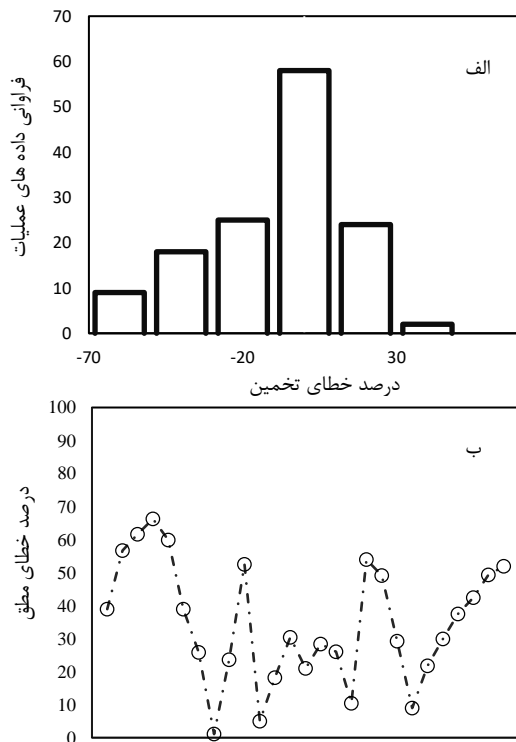
$$\lim_{\lambda \rightarrow 0} \lambda P_p = P_D \quad (7)$$

این فشار P_D که حاصل نیروهای بین سطوح باردار نزدیک به سطح تماس دانه می‌باشد به عنوان فشار انفصال فیلم روی سطح دانه و به صورت نیروی دانه-به-دانه، موضعی و تابع ضخامت فیلم آب روی دانه شناخته می‌شود. این فشار با فاصله گرفتن از سطح دانه به مقدار صفر میل می‌کند. فشار انفصال می‌تواند به صورت مقادیر مثبت (دافعه)، یا صفر و یا منفی (جاذبه) و بر حسب میزان فاصله دو سطح دانه در مقیاس نانومتر مطرح شود. بنابراین میزان تنش "موثر" وارده بر روی دانه‌های منفرد، σ_g ، در این حالت به صورت رابطه (۸) بیان می‌شود.

$$\sigma_g = \sigma - P_p + Z P_D \quad (8)$$

در این رابطه Z بیانگر علامت فشار انفصال می‌باشد. اگر نیرو دافعه و فشار انفصال عددی مثبت بدست آید آنگاه $Z=-1$ و در غیر این صورت $Z=+1$ قرار می‌گیرد. سنگ‌های خشک به علت غالب بودن نیروهای جاذبه‌ی واندروالس نسبت به سنگ‌های اشباع از آب استحکام بیشتری دارند [۷]. بنابراین به‌طور کل در سیستم‌هایی که کاملاً از آب‌نمک اشباع می‌باشند مقدار P_D می‌تواند به صورت فشار انفصالی مثبت عمل کند و می‌بایست مقدار بیشینه (P_{DM}) لحاظ گردد. محاسبه ترم P_D

پیش‌بینی فشار شکست و بعد از آن مدل کُرش می‌باشد. مطابق رتبه‌بندی نهایی، در صورت وجود داده‌های ژئومکانیکی معتبر، می‌توان با استفاده از مدل‌های عدنوی-بلینه پیش‌بینی فشار شکست دقیق‌تری را انتظار داشت. در صورت محدود بودن داده‌ها و ورودی، رابطه کُرش می‌تواند جایگزینی مناسب باشد. با این حال، این مدل‌ها، پراکندگی تخمین فشار شکست را به همراه خطای نسبتاً بالایی نشان می‌دهند (شکل (۳)). همچنین، مدل هابرت-ویلیس در پیش‌بینی فشار شکست عملیات شکافت هیدرولیکی نسبت به سایر مدل‌ها رتبه نهم را از نظر دقت دارد.



شکل ۳. الف، هیستوگرام میزان خطای مدل عدنوی-بلینه. ب، نتایج درصد خطای پیش‌بینی فشار شکست مدل هابرت-ویلیس

براساس رتبه بندی حاصله در جدول (۲) ممکن است اینگونه استنباط شود که رابطه مدل عدنوی-بلینه که رتبه اول در موفقیت تخمین فشار شکست بدست آورده می‌تواند مدلی مطمئن در طراحی عملیات شکافت هیدرولیکی باشد. اما این نوع نتیجه گیری می‌تواند یک طراح را با مشکل مواجه کند

$$k = 502.25 \sqrt{\frac{I}{\varepsilon T}} \quad (12)$$

۳. نتایج و بحث

۱.۳. دقت مدل‌های مرسوم تخمین فشار

نتایج ارزیابی پیش‌بینی مدل‌ها در شش ستون سمت چپ جدول (۲) براساس معیارهای آماری رتبه‌بندی شده‌اند. در ستون آخر جدول رتبه بندی نهایی این روابط از لحاظ دقت و موفقیت در پیش‌بینی فشار شکست عملیات های شکافت هیدرولیکی نشان داده شده است و امکان مقایسه این روابط را فراهم می‌کند.

جدول ۲. نتایج رتبه بندی دقت و موفقیت یازده مدل براساس هر معیار و به صورت نهایی

رتبه بندی نهایی	R	M A E	M S E	M R E	S R	نام مدل
۱	۲	۲	۱	۱	۱	عدنوی و بلینه ۱، ۲۰۰۸
۲	۳	۱	۲	۲	۱	عدنوی و بلینه ۲، ۲۰۰۸
۳	۶	۴	۳	۶	۳	روش کُرش،
۴	۹	۳	۴	۵	۲	اشمیت و زوبک، ۱۹۸۹
۵	۵	۸	۷	۳	۵	رامل ۲، ۱۹۸۷
۶	۷	۵	۵	۸	۴	آیتو و هایشی، ۱۹۹۰
۷	۱	۱۰	۹	۴	۶	رامل ۳، ۱۹۸۷
۸	۸	۹	۸	۷	۷	رامل ۱، ۱۹۸۷
۹	۱۱	۶	۶	۱۰	۶	هابرت و ویلیس، ۱۹۵۷
۱۰	۴	۱۱	۱۱	۹	۹	رامل ۴، ۱۹۸۷
۱۱	۱۰	۷	۱۰	۱۱	۸	هایمسون و فرهاست، ۱۹۶۷

باتوجه به جدول (۲)، مدل عدنوی-بلینه دارای بهترین رتبه

همچنین میزان خطای حدود ۳۰٪ می‌تواند بیانگر تاثیر ژئوشیمی منطقه‌ای چاه‌های یک سنگ مخزن و تفاوت حالت اساتیک و دینامیک (تغییرات فشار منفذی ناشی از: ترشوندگی، تراوایی موثر، دبی پمپاژ و نوع سیال شکافزنی) در تخمین فشار شکست باشد.

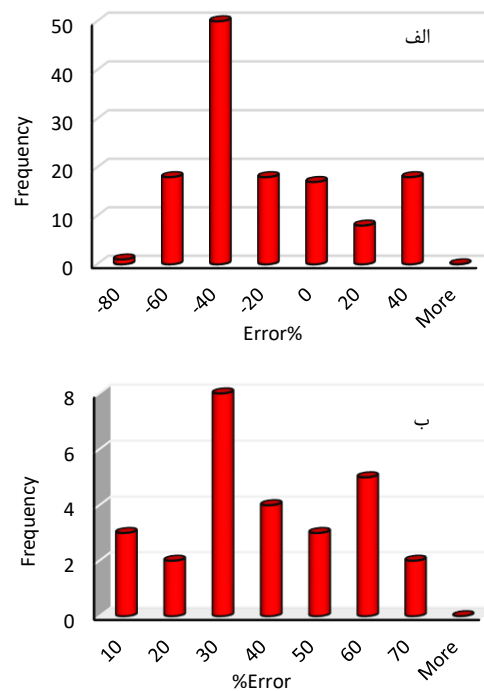
۲.۳. تاثیر ژئوشیمی آب منفذی

بنا به نتایج پژوهشگران و تناقض‌های مطرح شده در قسمت تئوری، اثر واکنش شیمیایی (انحلال) بر استحکام سنگ در نمونه‌های که به اشباع اولیه آب رسیده‌اند به دلیل حجم کم آب منفذی داخل سنگ، قابل چشم‌پوشی است. بنابراین نمی‌توان آن را به عنوان مکانیزم غالب لحاظ کرد. اما تاثیر عامل تغییر بار سطح دانه‌های سنگ بر استحکام آن محتمل‌تر و بیشتر می‌باشد. عامل تغییر بار سطح علاوه بر تغییر استحکام سنگ، می‌تواند بر ترشوندگی سنگ و متعاقباً فشارآستانه مویبندی و تغییر فشار منفذی (دینامیک) تاثیر بگذارد [۲]، [۱۱]، [۱۳]. در حالت اساتیک و در ارتباط با شیمی آب منفذی اثر ترشوندگی بر استحکام سنگ به خوبی مشخص نیست. اما مکانیزمی که در ترم‌های استحکام و ترشوندگی مشترک و تاثیرگذار است، اثر شیمی آب منفذی بر میزان نیروهای بین سطحی می‌باشد. این نیروها در سطح تماس دانه-به-دانه سنگ نقش ایفا می‌کنند. زمانی که نفت در سطح تماس دو دانه قرار بگیرد، اثر نیروی الکتروستاتیک را تضعیف می‌کند [۶]، [۱۲]، [۱۳]، [۱۵]. برای درک بهتر شکل (۵) ارائه می‌گردد.

و پیامد های غیر قابل جبرانی در طراحی عملیات شکافت هیدرولیکی به همراه داشته باشد.

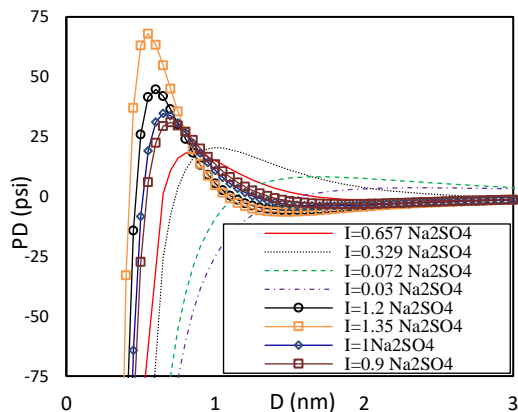
لازم به ذکر است رتبه بندی بدست آمده برای این مدل صرفاً به صورت یک موفقیت نسبی و مقایسه ایی با ده رابطه دیگر می باشد. همچنین این مدل فشار شکست را با خطای میانگین ۲۹٫۴٪ پیش بینی نموده است.

رابطه هابرت-ویلیس که در طراحی ها استفاده زیادی از آن می گردد، فشار شکست عملیات های میدانی را با خطای میانگین ۳۲٫۹٪ پیش بینی نموده است. همچنین این رابطه با استفاده از داده های عملیات شکافت هیدرولیکی که به صورت آزمایشگاهی بدست آمده و کنترل و اندازه گیری پارامترها دقیق تر می باشد، فشار شکست را با میانگین خطای ۳۴٫۷٪ پیش بینی نموده است (شکل (۴)).

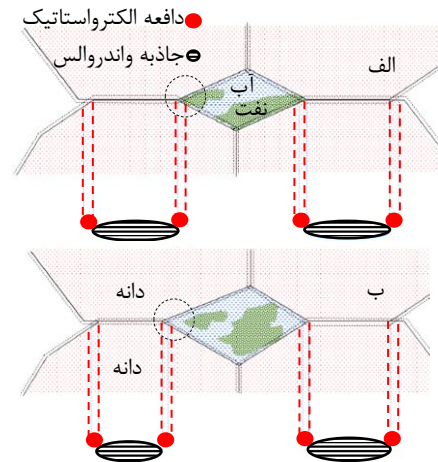


شکل ۴. مقایسه توزیع خطا رابطه هابرت-ویلیس برای داده های (الف) میدانی و (ب) آزمایشگاهی عملیات شکافت هیدرولیکی

بنابراین در قضاوت مهندسی در مورد کیفیت داده‌های پیش‌بینی تردید ایجاد می‌کند.



شکل ۶. فشار انفصال در سطح دانه-به-دانه یک نمونه سنگ گچی در هشت غلظت مختلف آب نمک سدیم سولفات



شکل ۵. نحوه قرار گیری فاز نفت و آب منفذی و محل نیروهای بین سطحی برای یک نمونه سنگ آب دوست. الف: فاز نفت در سطح تماس دو دانه قرار دارد و اثر نیروی الکترواستاتیکی را کاهش می دهد، ب: فاز آب نمک در سطح تماس دانه-به-دانه در فضای منفذ قرار دارد و نیروی الکترواستاتیک را تقویت می کند. اصلاح شده [۱۳]، [۱۵].

جدول ۳. مشخصه سنگ کربناته مدل مورد مطالعه

مقدار	مشخصه
۰٫۳	ضریب پواسون
۰٫۹	ضریب بیو
۲٫۶ مگاپاسکال	مقاومت کششی سنگ
۰٫۷ مگاپاسکال	تنش افقی بیشینه
۰٫۱ مگاپاسکال	تنش کمینه
۰٫۱ مگاپاسکال	فشار منفذی

برای مدل سنگ کربناته با مشخصات جدول (۳) فشار شکست در دو حالت ۱: در نظر گرفتن شیمی هشت آب منفذی با رابطه اصلاح شده هایمسون-فراست (*Disjoining H-F Model*) و ۲: بدون در نظر گرفتن ژئوشیمی آب منفذی با رابطه (*H-F*)، فشار شکست تخمین زده شد. مقایسه دو حالت به صورت یک نمودار میزان درصد اختلاف دو حالت در شکل (۷ الف) انجام شده است.

تصویر (الف) و (ب) مربوط به ترشوندگی یکسان اما نحوه جایگیری آب متفاوت می باشد. وجود لایه نفت در نزدیکی سطح تماس دو دانه در تصویر (الف) می تواند لایه دوگانه الکتریکی ناشی از یون های باردار آب منفذی را متراکم تر و نیروی ناشی از دافعه الکترواستاتیک را کاهش و سنگ را نسبت به (ب) مستحکم تر کند.

۳٫۳ بررسی مدل فشار شکست و فشار انفصال

با کمک رابطه بسط داده شده (۱۰)، برای یک نمونه سنگ گچی مشخص [۱۲] که با هشت غلظت مختلف آب نمک سدیم سولفات به عنوان آب منفذی اشباع شده، فشار شکست محاسبه گردید. با استفاده از رابطه (۱۱) مقادیر فشار انفصال محاسبه گردید. این مقادیر به صورت نمودار در شکل (۶) خلاصه شده است. ویژگی های سنگ مورد مطالعه در جدول (۳) گزارش شده است.

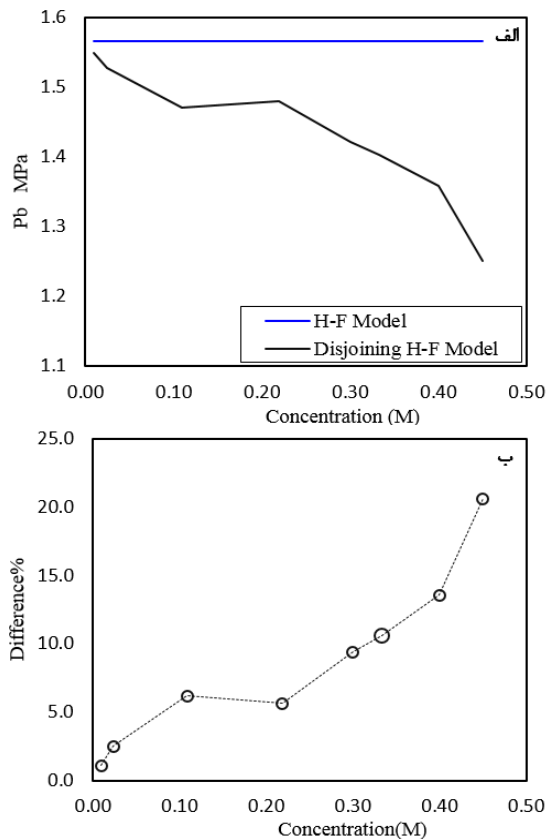
همچنین غلظت های بالاتر از ۰/۲۱۹ مولار سدیم سولفات اثر بیشتری بر فشار شکست دارند. لازم به ذکر است مقاومت کششی نمونه سنگ ها بدون اعمال فشار محصور اندازه گیری می شوند. در واقع اثر فشار منفذی تقریباً صفر می باشد. تفاوت مقاومت کششی در نمونه خشک و تر با فرض عدم انحلال دانه یا رسوب می تواند بر اثر نیروهای سطح و فشار انفصال باشد. در صورت اندازه گیری مقاومت کششی در حالت اشباع با آب نمک مشخص، می توان از ترم ZP_D در روابط تخمین فشار شکست صرف نظر کرد.

در ارتباط با حضور هم زمان سیال منفذی نفت/آب، بررسی پژوهش های پیشین نشان می دهد که تاثیر ترشوندگی سنگ بر فشار شکست صرفاً به واسطه تغییر استحکام سنگ مبهم می باشد و این اثر به نحوه جایگیری فازهای ترکننده در سطوح تماس دانه های آن بستگی دارد و وجه مشترک آنها نیروهای بین سطوح باردار می باشد. در خصوص مطالعات بیشتری مورد نیاز است که در ادامه این پژوهش صورت خواهد گرفت.

۴. نتیجه گیری

در این مطالعه ابتدا با استفاده از داده های چاه های مخزن آسماری، تفاوت ژئوشیمی آب مخزن در نقاط مختلف آن نشان داده شد. سپس با استفاده از نتایج و داده های مقاله های پیشین، دقت مدل های مختلف تخمین فشار شکست و اثرات ژئوشیمیایی آیمنفذی-سنگ بر فشار شکست بررسی شد. با مشخص شدن مکانیزم غالب یعنی تغییر نیروهای بین سطوح بر اثر تعامل ژئوشیمیایی، مدل جدید تخمین فشار شکست با نقش فشار انفصال ارائه گردید که با کمک آن می توان اثرات شوری و یون را در فشار شکست بررسی نمود. خلاصه نتایج مطرح این مطالعه به صورت زیر بیان می گردد:

- با توجه به بررسی نتایج پیش بینی مدل ها، اکثر مدل های مرسوم با متوسط ۳۰٪ خطا در تخمین فشار شکست، نشان دهنده ریسک بالا در به کارگیری این مدل ها در طراحی عملیات شکافت هیدرولیکی می باشد.
- مدل اصلاح شده در این مطالعه با داده های مربوط به آب منفذی متشکل از یون های Na^+ و SO_4^{2-} و سنگ کربناته (کلسیم کربنات) نشان داد که فشار شکست سنگ در غلظت های کمتر از ۰/۵ مولار با افزایش غلظت



شکل ۷. الف: مقادیر فشار شکست تخمین زده شده رابطه هایمسون-فراست و رابطه اصلاح شده فشار انفصال نسبت به غلظت آب نمک سدیم سولفات به عنوان آب منفذی. ب: میزان درصد اختلاف فشار شکست تخمین زده شده بین روابط اصلاح شده و روابط بدون در نظر گرفتن شیمی آب منفذی

با توجه به نمودار فشار شکست با افزایش میزان غلظت نمک سدیم سولفات میزان فشار شکست کاهش می یابد. دلیل این امر، جذب بیشتر یون سولفات روی سطح سنگ در غلظت های بیشتر است. افزایش غلظت سطحی یون سولفات موجب منفی تر شدن بار سطحی سنگ می شود، لذا نیروی دانه-به-دانه از نوع دافعه شکل می گیرد که منجر به سست شدن سنگ می گردد. البته این روند در حضور همزمان دیگر یون های موثر مانند کلسیم و منیزیم می تواند تغییر کند. لذا محاسبات ژئوشیمیایی که مبتنی بر تشکیل کمپلکس های سطحی است مورد نیاز خواهد بود.

دبی تزریق	m3hr-1	q
فاصله از مرکز چاه	m	r
زمان	hr	t
ضریب بیو	-	α
عدد تصحیح تخلخل	-	β
ثابت دی الکتریک	-	ϵ
ثابت الاستیک منفذی	-	η
زاویه نسبت به تنش بیشینه	degree	θ
$\frac{A_C}{A_T}$	-	λ

۶. مراجع

- [1] Hubbert M. K. & Willis D. G. (1957): *Mechanics of Hydraulic Fracturing*. SPE 4597 Vol. 20. 6 Oct. L.A.
- [2] Sampath, M., Perera, A., Ranjith, G., (2018): *Theoretical overview of hydraulic fracturing breakdown pressure*. Journal of Natural Gas Science and Engineering. Vol. 58, P.: 251-265.
- [3] Kiss A, Fruhwirth R., Pongratz R., Maerr R. (2018): *Formation Breakdown Pressure Prediction with Artificial Neural Networks*. SPE paper191391-18IHFT-MS.18 Oct. Muscat.
- [4] AlTammar, Sharma M., (2018): *Effect of Borehole Pressurization Scheme on Breakdown Pressure*. Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering. Vol. 52, Iss. 8, P.: 2709-2715.
- [5] Cheng Y., Zhang Y., Yu Z., Hu Z., (2021): *Experimental & Numerical Studies on HF Characteristics With Different Injection Rates in Granite Geothermal*. Energy Science & Engineering. Vol. 9, Iss. 1, P.:142-168.
- [6] Bergsaker A., Røyne A., Ougier J., F. Renard, (2016): *The effect of fluid composition, salinity, and acidity on subcritical crack growth in calcite crystals*. J. Geophysical Research: Solid Earth, Vol. 121, P.: 1631-1651.
- [7] Israelachvili J, (2011): *Intermolecular and surface forces*. Academic Press, New York City.
- [8] Gutierrez M, Høeg K., (2000): *The Effect of Fluid Content on the Mechanical Behaviour of Fractures in Chalk*. Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering. Vol. 33, Iss. 2, P.: 93-117.
- [9] Risnes, R., (2001): *Deformation and Yield in High Porosity Outcrop Chalk*. Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy. Vol. 26, Iss. 1-2, P.: 53-57.
- [10] Rostom, F., A. Røyne, D. K. Dysthe, and F. Renard (2013), *Effect of fluid salinity on subcritical crack propagation in calcite*. Journal of Tectonophysics, Vol. 583, P.: 68-75.
- [11] Mahani H., Levy K. A., Berg S., Bartels W., Nasralla R., Rossen W., (2015): *Insights into the Mechanism of Wettability Alteration by Low-Salinity Flooding (LSF) in Carbonates*. Energy Fuels, Vol. 29, Iss. 3, P.: 1352-1367.
- [12] Megawati M., Hiorth A., Madland M. V., (2013):

یون سولفات، کاهش می‌یابد. همچنین این مدل برای تخمین فشار شکست در زمانی که ترکیب آب سازندی با ترکیب آب تزریقی متفاوت باشد (مانند عملیات ازدیاد برداشت) قابل استفاده می‌باشد.

۵. فهرست نمادها

جدول ۴. فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح
A_C	m2	سطح تماس دانه
A_T	m2	سطح اعمال نیرو
D_C	m	فاصله بحرانی
F_A	N	نیروی جاذبه
F_R	N	نیروی دافعه
F_T	N	نیروی برآیند کل
F_g	N	نیروی وارد شده به سطح دانه-به-دانه
K_{IC}	MPa.m0.5	چقرمگی شکاف
K_1	-	ضریب تنش بیشینه
K_3	-	ضریب تنش کمینه
P_D	Mpa	فشار انفصال
P_{DM}	Mpa	مقدار بیشینه فشار انفصال
P_P	Mpa	فشار منفذی (فشار مخزن)
P_b	Mpa	فشار شکست
P_w	Mpa	فشار سیال داخل چاه
R_W	m	شعاع چاه
σ_T	Mpa	مقاومت کششی سنگ
σ	Mpa	تنش
σ_g	Mpa	تنش "موثر" اعمالی روی دانه‌های منفرد
σ_g	Mpa	تنش موثر نرمال وارده بر سطح تماس دانه
$\sigma_{\theta\theta}$	Mpa	تنش نرمال موثر مماسی
σ_1	Mpa	تنش کل بیشینه
σ_3	Mpa	تنش کل کمینه
ψ_0	mVolt	پتانسیل سطح
ΔP	Mpa	فشار مضاعف در حین تزریق
I	M	قدرت یونی
A	J	ثابت هاماکر
F	N	نیرو
I	-	عدد بی بعد فاصله رابطه آیتو-هایاشی
T	K	دمای مطلق
Z	-	علامت فشار انفصال
a	m	نصف طول شکاف
a	m	قطر چاه
h	m	فاصله بین دو لایه باردار
k	nm-1	معکوس طول دبای

The impact of surface charge on the mechanical behavior of high-porosity chalk. Rock Mech. Rock Eng. Vol. 46, Iss. 5, P.:1073–1090.

[13] Sachdeva J., Nermoen A., Reidar I., Korsnes, Madland V., (2020): *Effect of Initial Wettability on Rock Mechanics and Oil Recovery: Comparative Study on Outcrop Chalks.* Transport in Porous Media, Vol. 133, P: 85-117.

[14] Strand, S., Høgenesen, E.J., Austad, T., (2006b): *Wettability Alteration of Carbonates—Effects of Potential Determining Ions (Ca^{2+} and SO_4^{2-}) and Temperature.* Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Vol. 275, Iss. 1–3, 1, P.: 1-10.

[15] Meireles L., Storebø E., Welch M., Fabricius I., (2021): *Water weakening of soft and stiff outcrop chalk induced by electrical double layer disjoining pressure.* International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 141, ISSN 1365-1609.

[16] Alshakhs M.J., Kavscek A.R., (2015): *Understanding the Role of Brine Ionic Comp. on Oil Recovery by Assessment of Wettability from Colloidal Forces.* Adv Colloid Interface Sci. Vol. 233, Epub, P.: 126-138.

[17] Zoback M., (2010-2007): *Reservoir Geomechanics.* ISBN-978-0-521-77069-9. Page 65-69.