

بررسی تاثیر عمق و اختلاف مدول الاستیسیته سنگ مخزن با محیط در برگیرنده روی پدیده قوس زدگی تنش

محمدحسین طاهری نیا^۱، سیدمحمود فاطمی عقدا*^۲، احمد فهیمی فر^۳، محمدرضا کوپی علیپور^۴

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۱۷

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۵/۲۴

چکیده

در این مقاله مکانیسم رانش تراکمی که میتوان آن را مرتبترین مکانیسم رانش نفت با ویژگیهای ژئومکانیکی مخزن دانست مورد بررسی قرار گرفته است. در مدل سازی های رایج تنش عمودی کل بر مخزن، ثابت فرض می شود. یکی از مشکلات مهم این مدل ها در نظر نگرفتن پدیده قوس زدگی تنش در حین تراکم مخزن بوده که منجر به کاهش تنش عمودی کل شده و همچنین توزیع تنش های عمودی و افقی را تحت تاثیر قرار می دهد. در این مقاله با توجه به قابلیت بالای نرم افزار آباکوس در مدل سازی عددی محیط متخلخل، از این نرم افزار جهت مدل سازی مخازن فرضی با خصوصیات الاستیک متفاوت و قرار گرفته در اعماق مختلف استفاده گردیده است. براساس نتایج بدست آمده تفاوت در ضریب الاستیک مخزن با محیط در برگیرنده و نسبت عمق به ابعاد مخزن مهمترین پارامترهای کنترل کننده پدیده قوس زدگی تنش و همچنین پارامترهای تعیین کننده در الگوی توزیع تنش ها و تراکم مخزن می باشد. همچنین بررسی تاثیر قوس زدگی تنش بر روی مکانیسم رانش تراکمی نشان داد که رخداد این پدیده می تواند حتی تا حدود ۵۰ درصد باعث کاهش تراکم حفرات مخزن و در واقع نصف شدن میزان تولید نفت در اثر مکانیسم رانش تراکمی نسبت به برآورد اولیه آن (بدون در نظر گرفتن اثر قوس زدگی تنش) گردد. از این رو در نظر گرفتن تاثیر قوس زدگی تنش در تخمین میزان بازیافت نفت در اثر مکانیسم رانش تراکمی بویژه در میدانی با نسبت عمق به گسترش جانبی بالا و دارای سنگ مخزنی با مدول الاستیسیته پایین تر نسبت به سنگ های در برگیرنده، امری ضروری می باشد.

کلید واژه ها: قوس زدگی تنش، رانش تراکمی، مسیر تنش مخزن، بازیافت نفت، تراکم پذیری مخزن.

۱. دانشجوی دکتری زمین شناسی مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران

۲. عضو هیات علمی گروه زمین شناسی مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران Fatemi@khu.ac.ir

۳. عضو هیات علمی دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۴. دانشجوی دکتری عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

وضعیت تنش‌های وارده بر مخزن و روند تغییر آن در طول بهره برداری تاثیر مهمی بر بازیافت نفت به صورت مستقیم از طریق رانش تراکم و غیرمستقیم از طریق تغییر نفوذپذیری دارد (Holt et al., 2004). تراکم سنگ مخزن یکی از مکانیسم‌های شناخته شده برای تولید نفت است، درست مانند خروج آب از یک اسفنج با فشردن آن (Fjar et al., 2008). همچنین وضعیت تنش‌ها و روند تغییرات آن، بر پایداری چاه‌ها در حین حفاری و طول بهره برداری و پیوستگی سنگ پوش و پدیده‌ی تولید ذرات سازندی اثر گذار است. برای تخمین هر چه دقیقتر میزان تراکم مخزن علاوه بر نیاز به تعیین پارامتر تراکم پذیری سنگ مخزن که خود به عوامل متعددی وابسته است، اطلاع دقیق از وضعیت تنش‌های وارده بر مخزن قبل و در طول دوره‌ی بهره برداری از مخزن ضروری می‌باشد. بطور معمول در مدل‌سازی تراکم مخزن، تنش سرباره وارده بر مخزن ثابت فرض می‌گردد. با این فرض افزایش تنش موثر بر مخزن برابر با کاهش فشار منفذی بوده و تراکم مخزن به عنوان تابعی از تغییرات فشار منفذی مخزن در نظر گرفته می‌شود. اما اندازه‌گیری دوره‌ای تنش‌های برجا در میادین نفتی مختلف نشان‌دهنده‌ی کاهش تنش‌های کل با کاهش فشار منفذی است (Asaei et al., 2018). این کاهش در اثر رخداد پدیده قوس‌زدگی تنش بوده که در اثر بخشی از تنش عمودی حاصل از وزن سرباره به کناره‌های مخزن منتقل شده و از تنش کل وارده بر مخزن کاسته خواهد شد (Sayers and Schutjens, 2007). این کاهش تنش عمودی موجب کاهش تراکم مخزن نسبت به مقدار پیش‌بینی شده و نهایتاً منجر به عدم حصول میزان بازیافت نفت مورد انتظار از ماتریکس سنگ می‌گردد (Segura et al., 2011) مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که رخداد پدیده قوس‌زدگی تنش در مخازن کوچک و دارای سختی کمتر از محیط در برگیرنده، محتمل‌تر بوده و دارای تاثیر بیشتری می‌باشد (Dusseault, 2011). مطالعات متعددی در مورد پدیده قوس‌زدگی تنش در دهه گذشته صورت پذیرفته که اغلب آنها به بررسی تاثیر این

پدیده بر وضعیت تنش‌های وارده بر مخزن (Khan et al., 2000)، فعال‌سازی مجدد گسل‌های واقع در محدوده مخزن (Mulders, 2003; Soltanzadeh and Hawkes, 2008) و یا بر تغییر تراوایی سنگ مخزن (Wang et al., 2015) پرداخته‌اند. آقای سورگه و همکاران (Segura et al., 2011) با استفاده از روش عددی و استفاده از دو نرم افزار ELFEN و TEMPEST تاثیر قوس‌زدگی تنش در تغییرات فشار مخزن را مورد بررسی قرار دادند. براساس نتایج حاصل از این مطالعات، عدم در نظر گرفتن قوس‌زدگی تنش، باعث برآورد بالاتری از مقدار واقعی فشار مخزن خواهد گردید.

در این مقاله مکانیسم رانش تراکمی و تاثیر قوس‌زدگی تنش روی آن و بازیافت نهایی نفت از یک میدان نفتی فرضی با استفاده از نرم افزار آباکوس مدلسازی گردیده است. با توجه به مطالعات پیشین، دو فاکتور نسبت مدول یانگ مخزن به محیط در برگیرنده و عرض مخزن به عمق آن به عنوان دو پارامتر کلیدی تاثیر گذار انتخاب شده و تاثیر تغییرات آنها مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. مکانیسم رانش تراکمی

تولید نفت از سنگ مخزن حاصل عملکرد مکانیسم‌های مختلفی است که هر یک به نوبه‌ی خود باعث استخراج بخشی از نفت برجا در سنگ مخزن می‌شود. از مهمترین این مکانیسم‌ها می‌توان به چهار مکانیسم اصلی اشاره نمود:

(۱) رانش تخلیه: که در اثر انبساط نفت و گاز با کاهش فشار منفذی رخ می‌دهد.

(۲) رانش کلاهک گازی: که در اثر انبساط کلاهک گازی ایجاد می‌شود.

(۳) رانش تراکمی: که در اثر تراکم منافذ سنگ مخزن به دلیل افزایش تنش موثر وارده بر سنگ مخزن رخ می‌دهد.

(۴) رانش آب (آبران) که در اثر نفوذ آب از آبخوان مجاور مخزن ایجاد می‌گردد.

سهام متوسط هر یک از این مکانیسم‌ها در تولید نفت در جدول (۱) ارائه شده است.

مکعب گزارش گردیده است (فاطمی عقدا و همکاران ۱۳۹۲). خسارات وارده در اثر فرونشست در این میدان، بسیار برجسته بوده و در اغلب مقالات مرتبط به آن اشاره شده است. ولی نکته مهمی که درباره رخداد تراکم بیش از انتظار این مخزن و فرونشست سطح آن کمتر به آن اشاره شده، میزان تاثیر تراکم مخزن بر میزان بازیافت نفت از این میدان است. رانش تراکمی در این مخزن باعث بازیافت بیش از ۳۰ درصدی از نفت موجود در مخزن تا سال ۱۹۸۰ گردید که این روند همچنان ادامه داشته و سود اقتصادی حاصل از این مقدار تولید بیشتر که در مراحل توسعه میدان پیش بینی نگردیده بود از میزان خسارات وارده به این میدان بیشتر بوده است (Dake, 2001) با توجه به مباحث مطرح شده برآورد دقیق میزان تراکم مخزن هم از جهت پیش‌بینی معضلات احتمالی مرتبط و همچنین تخمین دقیق میزان بازیافت نفت جهت توسعه میدان از اهمیت بالایی برخوردار است.

۳. بررسی مسیر تنش مخزن و نقش آن در تراکم مخزن

برای درک بهتر روند تغییرات تنش‌ها در طول بهره‌برداری از یک مخزن، تغییرات تنش کل نسبت به کاهش منفذی سنجدیده شده که پارامتر حاصل ضریب مسیر تنش (stress path coefficients) نامیده شده و به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\gamma_V = \frac{\Delta\sigma_V}{\Delta p_f} \quad (1)$$

$$\gamma_H = \frac{\Delta\sigma_H}{\Delta p_f} \quad (2)$$

γ_V ضریب مسیر تنش عمودی بوده که ضریب قوس‌زدگی نیز نامیده می‌شود، و γ_H ضریب مسیر تنش افقی می‌باشد. ضریب قوس‌زدگی در صورت عدم رخداد قوس‌زدگی تنش و در واقع ثابت بودن تنش کل در طول بهره‌برداری از یک مخزن برابر با صفر می‌باشد و در صورت رخداد قوس‌زدگی کامل تنش و برابر بودن کاهش ایجاد در تنش کل عمودی با کاهش فشار منفذی مخزن برابر با یک خواهد شد. در مدل تراکم تک محوری مخزن با فرض $\gamma_V=0$ و $\gamma_H(x)=\gamma_H(y)$ ، متوسط ضریب مسیر تنش‌ها از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

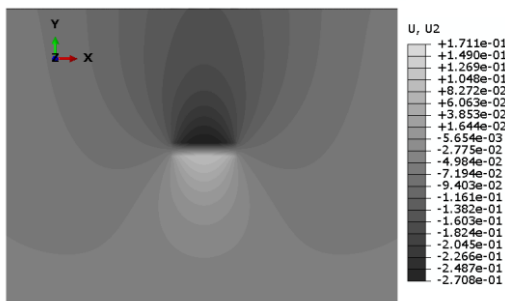
جدول ۱. مکانیسم‌های تولید نفت و نقش هر کدام در بازیافت نفت (Sanni, 2018)

Drive mechanism	Recovery of original oil (%)
Depletion drive	5-25
Segregated gas-cap drive	15-40
Compaction drive	2-5
Water drive	15-60

در بین مکانیسم‌های فوق، رانش تراکمی در حوزه‌ی ژئومکانیک مخزن قرار داشته و در این مقاله به آن پرداخته شده است. اگرچه در اکثر مخازن سهم این مکانیسم به ندرت بیش از ۵ درصد از کل بازیافت نفت به وسیله‌ی مکانیسم‌های رانشی اولیه می‌باشد، اما در برخی از مخازن این مکانیسم دارای سهم قابل توجهی در بازیافت نفت است. برای نمونه بیش از ۵۰٪ بازیابی نفت در مخزن باچاکوئرو (Bachaquero) در ونزوئلا، را ناشی از رانش تراکم می‌دانند. در مخزن والهال (Valhall) در بخش نروژی دریای شمال، سهم تولید نفت به وسیله‌ی رانش تراکمی بیش از ۷۰ درصد برآورد گردیده است. البته جنبه‌ی منفی مهم رانش تراکمی و تراکم مخزن، فرونشست ایجاد شده در سطح میدان می‌باشد. اگر میدان در وسط بیابان واقع شده باشد، آثار منفی این رویداد کم بوده ولی اگر فرونشست در میدین واقع در مناطق مسکونی و سواحل (چه خشکی و دریا) اتفاق بیفتد می‌تواند تاثیرات بسیار منفی محیط زیستی و اقتصادی به همراه داشته باشد (Dake, 2001).

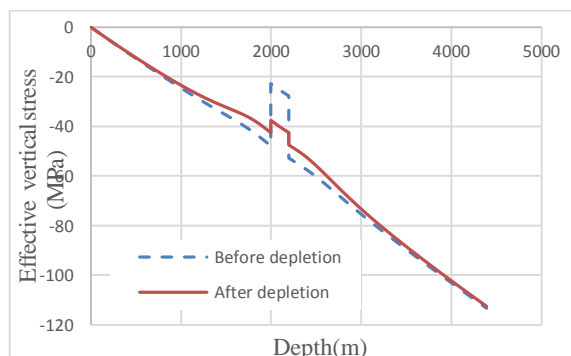
یکی از نمونه‌های معروف رخداد فرونشست و ایجاد خسارات عمده به سکوی نفتی، فرونشست رخداد در میدان ایکوفیسک است. بستر دریا در زیر سکوی‌های استخراج فعال در میدان ایکوفیسک در سال ۱۹۸۴ بیش از ۳/۵ متر فرونشست کرد، و باز گرداندن سکو به حالت قبل ۱ میلیارد دلار آمریکا هزینه در پی داشت (Sulak, 1991) فرونشست این میدان در سال ۱۹۹۴ به ۵/۵ متر رسید و تاکنون با سرعت ۰/۴ متر بر سال ادامه یافته است (Taherynia et al., 2017) وسعت منطقه‌ی فرونشست برابر با ۵۰ کیلومترمربع و حجم توده‌ی سنگی سرباره‌ی جابه‌جا شده برابر با ۱۵۰ کیلومتر

سنگ مخزن ۲۵٪ و مدول یانگ آن برابر با ۵ GPa است. مدول یانگ مخزن در تمام مدل سازی‌ها برابر بوده و مدول یانگ سنگ‌های در برگیرنده ۵، ۲۵ و ۵۰ فرض گردیده است. همچنین فشار اولیه مخزن در شروع برداشت ۲۵ MPa فرض گردید که در پایان استخراج به ۵ MPa می‌رسد. در شکل‌های ۱-۳ برای نمونه نتایج حاصل از مدل مخزن قرار گرفته در عمق ۲۰۰۰ متر و با نسبت $E_s/E_r=5$ ارائه شده است. در شکل ۱ جابجایی عمودی رخ داده در مخزن و محیط در برگیرنده آن در اثر تخلیه مخزن نشان داده شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در این شکل کف مخزن با کاهش فشار مخزن به سمت بالا جابجا شده که این امر نشان‌دهنده رخداد قوس‌زدگی تنش در سرباره مخزن و کاهش تنش اعمالی به کف مخزن است. در نمودار ارائه شده در شکل ۲ تغییرات تنش عمودی در امتداد محور میانی مخزن و در شکل ۳ چگونگی تغییرات تنش عمودی در مخزن و محیط در برگیرنده ارائه شده است.



شکل ۱. جابجایی عمودی رخ داده در اطراف مخزن تخلیه‌شده

و بالا آمدن بخش پایینی مخزن در اثر کاهش تنش عمودی



شکل ۲. تغییرات تنش موثر عمودی در امتداد محور میانی

مخزن

$$\bar{\gamma} = \frac{2}{3} \frac{1-2\nu_{fr}}{1-\nu_{fr}} \alpha \quad (3)$$

در اینجا α ضریب بایو و ν_{fr} ضریب پواسون چهارچوب سنگ است. پارامتر تراکم پذیری حفرات سنگ (C_{pp}) را با در نظر گرفتن $\Delta\sigma = \gamma \Delta p_f$ و همچنین صرف نظر از تراکم ماتریس سنگ (بخش جامد) بواسطه اختلاف زیاد مدول بالک آن نسبت به مدول بالک توده‌ی سنگ ($K_{fr} \ll K_s$) می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$C_{pp} = \frac{1}{V_p} \frac{\Delta V_p}{\Delta p_f} = \frac{1}{\phi} \frac{1}{3K_{FR}} \frac{1+\nu}{1-\nu} \quad (4)$$

در این رابطه VP-حجم حفرات سنگ مخزن و ΔV_p تغییر ایجاد شده در آن در اثر کاهش فشار منفذی برابر با Δp_f و ϕ مقدار تخلخل، k_{fr} تراکم پذیری چهارچوب سنگ rock (frame) و ν ضریب پواسون می‌باشد. با تعیین C_{pp} به راحتی می‌توان مقدار تولید نفت در اثر کاهش حجم حفرات سنگ مخزن و رانش تراکمی را با استفاده از رابطه زیر محاسبه نمود:

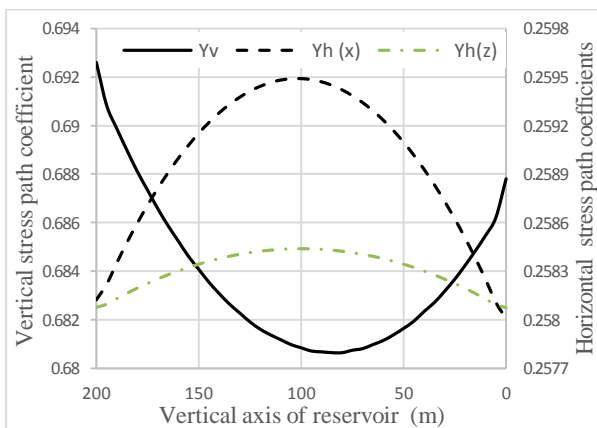
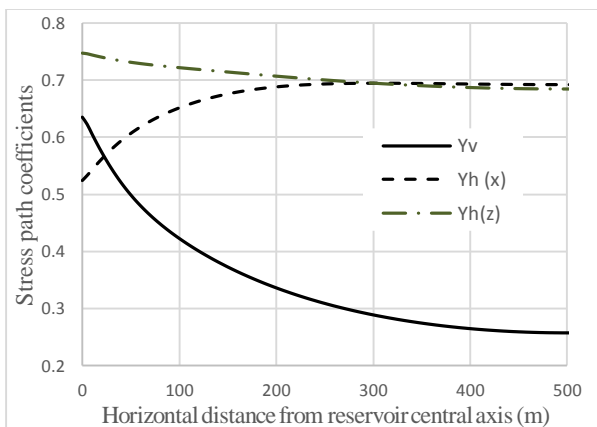
$$\Delta V_{prod} = -V_p C_{pp} \Delta p_f \quad (5)$$

روابط ۴ و ۵ همان رابطه ساده مورد استفاده در بسیاری نرم افزارهای نفتی بدون در نظر گرفتن اثر قوس‌زدگی تنش در سرباره مخزن (با فرض ثابت تنش عمودی کل) می‌باشد. استفاده از این رابطه در مخازنی که در آنها قوس‌زدگی تنش رخ داده موجب یک برآورد بیش از مقدار واقعی تولید نفت به ازای افت فشار مد نظر می‌گردد.

۴. مدل سازی تراکم مخزن

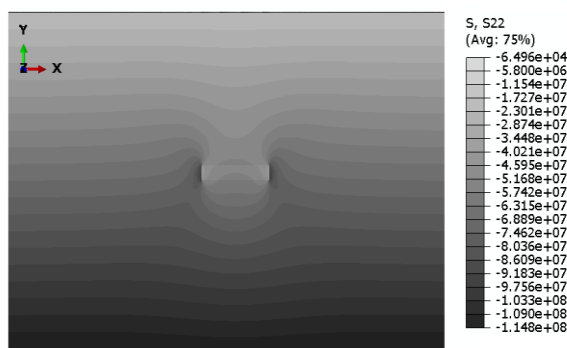
در این مقاله جهت مدل‌سازی پدیده قوس‌زدگی تنش و تاثیر آن بر میزان تراکم سنگ مخزن از نرم‌افزار آباکوس استفاده گردید. بدین منظور ابتدا مخزنی با ارتفاع ۲۰۰ متر و عرض ۱۰۰۰ واقع در سه عمق مختلف ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰ متری به صورت دو بعدی مدل‌سازی گردید. علاوه بر عمق مخزن، نسبت مدول یانگ سنگ مخزن (E_r) به محیط در برگیرنده آن (E_s) نیز به عنوان یکی از متغیرها در مدل‌سازی در نظر گرفته شد و مدل‌سازی برای سه نسبت ۱، ۵، و ۱۰ E_s/E_r انجام پذیرفت. ضریب پواسون مخزن و سنگ در برگیرنده آن یکسان و برابر با ۰٫۳ در نظر گرفته شده است. تخلخل

تخمین یک مقدار معین برای ضرایب مسیر تنش در بازه‌ی کل مخزن است. این مقدار معمولا بر مبنای مدل سازی عددی و یا تحلیلی در امتداد محور میانی مخزن برآورد می‌گردد. در حالی که نتایج مدل سازی عددی تغییرات تنش‌ها در بازه‌ی کل مخزن نشان می‌دهد که مقادیر ضریب مسیر تنش‌ها هم در راستای افقی و هم در راستای عمودی در مخزن متفاوت می‌باشد. در شکل ۵ روند تغییرات این پارامتر در امتداد محور افقی میانی مخزن و هم در امتداد محور عمودی میانی نشان داده شده است. مانند اشکال ۱-۳، شکل ۵ نیز مربوط به مدل‌سازی مخزن واقع در عمق ۲۰۰۰ متری با نسبت $E_s/E_r=$



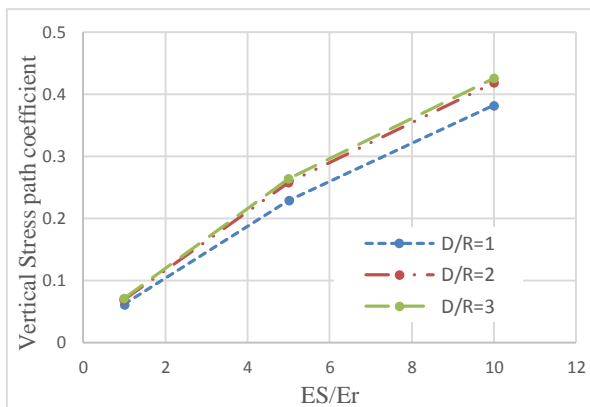
شکل ۵. مسیر تنش عمودی در حالت مختلف D/R و نسبت E_s/E_r

همانگونه که در شکل ۵ قابل مشاهده است محور میانی مخزن دارای کمترین مقدار ضریب مسیر تنش عمودی (ضریب قوس‌زدگی) بوده که این امر نشان‌دهنده‌ی رخداد کمترین قوس‌زدگی تنش و کاهش کمتر در تنش عمودی کل



شکل ۳. تغییرات تنش عمودی موثر در مخزن و محیط در برگیرنده‌ی آن

در اشکال ۲ و ۳ بخوبی کاهش تنش عمودی کل و موثر در سرباره و کف مخزن در اثر تخلیه آن قابل مشاهده است. همچنین در شکل ۳ افزایش تنش عمودی در کناره‌های مخزن که ناشی از رخداد قوس زدگی تنش و انتقال بخشی از وزن سرباره به این دو بخش است قابل مشاهده است. در شکل ۴ نتایج حاصل از مدل سازی‌ها و محاسبه مسیر تنش عمودی برای ۹ حالت مدل سازی صورت گرفته ارائه شده است.



شکل ۴. مسیر تنش عمودی در حالت مختلف D/R و نسبت E_s/E_r

همانگونه که در شکل ۴ قابل مشاهده است زمانی که نسبت مدول یانگ مخزن و محیط در برگیرنده با هم برابر باشد ضریب مسیر تنش (ضریب قوس زدگی) برای هر سه مخزن واقع در اعماق مختلف تقریبا با هم برابر می‌باشد ولی با افزایش این نسبت اختلاف ضریب مسیر تنش در اعماق مختلف بیشتر خواهد گردید.

نکته مهم و قابل تامل درباره‌ی مدل‌سازی تراکم مخزن، حتی در مواردی که قوس‌زدگی تنش نیز در نظر گرفته می‌شود،

($\gamma v=0$) کمینه مقدار ضریب تنش افقی حاصل می‌گردد و می‌توان رابطه فوق را به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\gamma_{h-min} = \frac{1-2v}{1-v} \alpha \quad (۸)$$

رابطه فوق مبنای محاسبه‌ی میانگین مسیر تنش در رابطه ۳ می‌باشد ($\bar{\gamma} = 2/3 (2\gamma_h + \gamma_v)$). براساس رابطه فوق مسیر تنش افقی در تمامی موارد مدل‌سازی با توجه به ضریب پواسون ۰,۳، مورد استفاده برابر با ۰,۵۷ می‌باشد. لازم به ذکر است در مدل‌سازی‌های انجام شده در این مطالعات ضریب بایو برابر با ۱ در نظر گرفته شده است. همانگونه که در اشکال ۵ ارائه شده است نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که بجز در حاشیه‌های مخزن که به واسطه افزایش تنش افقی مسیر تنش کاهش می‌یابد در بازه‌ی وسیعی از مخزن ضریب تنش افقی بالاتر از مقدار محاسبه شده از رابطه ۸ می‌باشد.

میزان تراکم پذیری حفرات سنگ (C_{pp}) مخزن مدل‌سازی با توجه یکسان بودن پارامترها الاستیک مخزن در تمامی مدل‌ها براساس رابطه‌ی ۴ برابر با 0.59 GPa^{-1} می‌باشد و تغییر حجم حفرات در اثر کاهش فشار منفذی 20 MPa در واحد حجم (متر مکعب) سنگ مخزن برابر با 0.003 m^3 خواهد بود. در واقع این ضریب تراکم پذیری و تغییر حجم حفرات، بیشینه مقادیر ممکن بوده و مدل‌سازی صورت پذیرفته، مشخص ساخت که به علت رخداد پدیده قوس‌زدگی تنش، مقادیر مذکور در بعضی از موارد حاصل نخواهند گردید. شاید در نگاه اول این مقدار تراکم حفرات مخزن و تولید نفت ناشی از آن بسیار ناچیز و بی اهمیت بنظر برسد ولی با توجه به حجم کل نفت موجود در این مخزن این مقدار تراکم (در صورت رخداد) باعث رانش ۱/۲ درصد از کل نفت برجای مخزن شده و با توجه به اینکه در بهترین حالت تنها ۳۰ تا ۴۰ درصد نفت موجود در یک مخزن قابل استخراج است این مقدار سهمی در حدود ۳ تا ۴ درصد از تولید نفت مخزن مورد مطالعه را شامل خواهد شد. در شکل ۶ میانگین تراکم حفرات مخزن و در واقع میزان نفت تولید شده در اثر پدیده رانش تراکمی در هر یک از مدل‌سازی‌ها ارائه شده است. در این نمودار میزان بازیافت نفت بدون در نظر گرفتن قوس‌زدگی

نسبت به سایر بخش‌های مخزن در این بخش می‌باشد. در مقابل در کناره‌های مخزن بیشترین تغییرات در تنش عمودی ایجاد شده و ضریب قوس‌زدگی تنش بیشینه می‌باشد. مسیر تنش افقی روند متفاوتی را نشان می‌دهد که در بخش میانی مخزن دارای بیشترین مقدار بوده و این امر نشان‌دهنده‌ی نزدیکی مقدار تغییرات ایجاد شده در مقدار تنش افقی کل با مقدار کاهش فشار منفذی است. ولی در کناره‌های میدان در اثر قوس‌زدگی تنش و انتقال بار به کناره‌های مخزن مقدار تنش افقی کل افزایش داشته و کاهش تنش کل ایجاد شده به واسطه کاهش فشار منفذی در این بخش مخزن نسبت به بخش مرکزی کمتر است.

۴. بررسی نقش قوس‌زدگی تنش در رانش تراکمی نفت

همانگونه که اشاره گردید افزایش ضریب قوس‌زدگی تنش باعث کاهش تنش کل وارده بر مخزن شده و در نتیجه کاهش تراکم پذیری مخزن را به دنبال خواهد داشت. رابطه ۴ با فرض عدم قوس‌زدگی تنش ($\gamma v=0$) و پیروی ضریب تنش افقی از روابط استخراج شده براساس مدل تراکم تک محوری محیط پروالاستیک ارائه گردیده است. این رابطه را می‌توان براساس ضریب مسیر تنش بصورت زیر بازنویسی نمود:

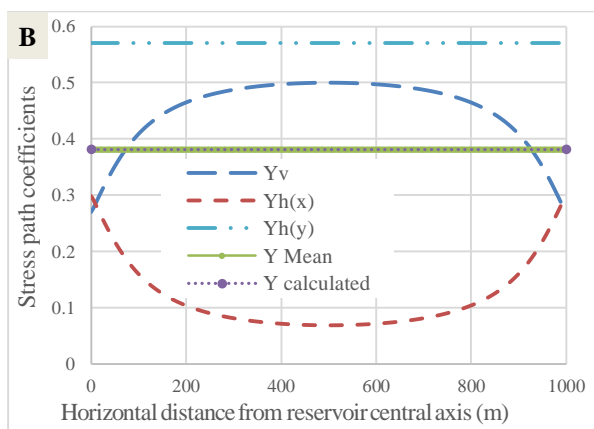
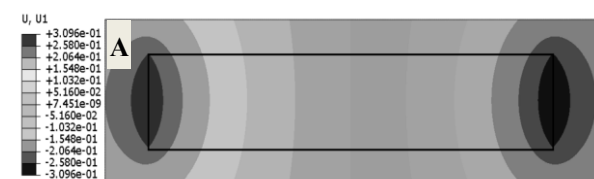
$$G_{pp} = \frac{1-\bar{\gamma}}{\varphi} \frac{1}{K_{FR}} \quad (۹)$$

این رابطه موید این است که در مدل تراکم تک محوری سنگ مخزن در صورت افزایش میانگین مسیر تنش‌ها که بیشینه مقدار آن برابر با یک می‌باشد مقدار تراکم پذیری حفرات سنگ مخزن به سمت صفر میل خواهد کرد. در صورت در نظر نگرفتن قوس‌زدگی تنش علاوه بر خطایی که به واسطه صفر در نظر گرفتن مسیر تنش عمودی در این رابطه ایجاد می‌شود، خطای مضاعفی نیز به واسطه تاثیر تنش عمودی روی مسیر تنش‌های افقی مخزن، ایجاد خواهد گردید. در رابطه ۷ چگونگی ارتباط میان مسیر تنش عمودی و افقی ارائه شده است:

$$\frac{v}{1-v} = \frac{\alpha-\gamma_h}{\alpha-\gamma_v} \quad (۱۰)$$

رابطه ۷ مشخص می‌سازد که رابطه‌ی مستقیمی میان ضرایب تنش افقی و عمودی وجود دارد. براساس این رابطه با فرض

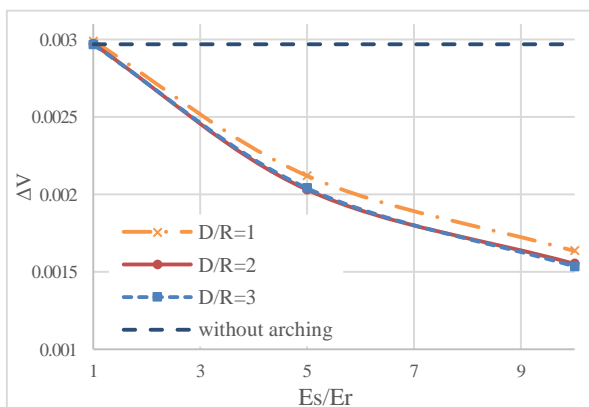
این امر بدین معنی نیست که قوس زدگی تاثیری در توزیع تنش ها و تراکم مخزن نخواهد داشت. از اینرو رخداد قوس-زدگی تنش به ویژه در سنگ مخزنهایی که تراوایی آنها به تنش های وارد بستگی دارد برای نمونه سنگ مخزن های درزه-دار حتی در حالتی که تاثیر در میزان تراکم نهایی نداشته باشد می تواند نقش مهمی در عملکرد چاه های بهره برداری داشته باشد.



شکل ۷. الف) جابجایی افقی ایجاد شده در مخزن و محیط در برگیرنده ی آن در اثر تخلیه مخزن، **ب)** ضرایب مسیر تنش عمودی و افقی مخزنی با پارامتر الاستیک برابر با محیط در برگیرنده

رخداد قوس زدگی تنش بواسطه کاهش تنش موثر در بخش هایی از سنگ مخزن، باعث عدم کاهش تراوایی سنگ و در واقع حفظ درصد بیشتری از تراوایی اولیه سنگ مخزن در این بخش ها می گردد. البته رخداد قوس زدگی همزمان می تواند تنش های وارده به بخش های دیگری از مخزن (کناره های آن) را افزایش داده و باعث افزایش تراکم و کاهش تراوایی این بخش ها گردد. آزمایش های وانگ و همکاران (۲۰۱۳) جهت بررسی تاثیر قوس زدگی تنش بر تراوایی سنگ مخزن مشخص ساخت در صورتی که ضریب قوس زدگی تنش برابر ۰/۱۲ باشد ۲۳٪ و در صورتی که ضریب قوس زدگی تنش برابر با

تنش و خروجی مستقیم آباکوس که همزمان در آن هم ضریب تنش افقی و هم عمودی در بخش های مختلف مخزن متفاوت است برای ۹ وضعیت مختلف مدل سازی ارائه شده است.



شکل ۴. قوس زدگی تنش بر بازیافت نفت در اثر مکانیسم

رانس ترکمی

همانگونه که در شکل ۶ قابل مشاهده است در شرایطی که مدول الاستیک مخزن و محیط در برگیرنده یکسان باشد در هر سه نسبت D/R ، کاهش ایجاد شده در حجم حفرات مخزن بدست آمده از مدل سازی با در نظر گرفتن پدیده قوس زدگی تنش در نرم افزار آباکوس و محاسبه شده براساس روابط ۵ بدون در نظر گرفتن قوس زدگی تنش تقریباً یکسان است. بررسی دقیق تر مدل ها مشخص ساخت علت این امر نه بدلیل عدم رخداد قوس زدگی تنش بلکه به علت فشار افقی وارده به کناره های مخزن در اثر تمرکز تنش در این بخش ها است (شکل ۷ الف). در شکل ۷ ب تغییرات سه مسیر تنش اصلی و همچنین میانگین آنها در امتداد محور افقی میدان در شرایطی که مدول الاستیک مخزن و محیط در برگیرنده یکسان باشد ارائه شده است. نکته جالب درباره مسیرهای تنش مخزن عدم پیروی هیچ از آنها از روابط موجود براساس مدل تراکم تک محوری ($v\gamma \neq 0$) و $\gamma_H \neq (1-2v)/(1-v)$ بوده در حالی که میانگین مسیر تنش دارای تطابق بالایی با مقدار بدست آمده از رابطه ۳ است.

در واقع در صورت یکسان بودن مدول الاستیک سنگ مخزن و محیط اطراف، تغییر حجم ایجاد شده در مخزن در اثر تراکم، مستقل از نسبت عمق به عرض مخزن می باشد. البته

این اساس بیشترین تراکم مخزن زمانی حاصل می شود که مدول الاستیک سنگ مخزن و محیط دربرگیرنده برابر بوده که در این حالت هندسه مخزن تاثیر بر میزان تراکم آن نداشته و میزان تراکم مخزن برابر با مقدار محاسبه شده بر اساس مدل تراکم تک محوری خواهد گردید. البته لازم به ذکر است حتی در این حالت نیز ضرایب مسیر تنش مخزن متفاوت از مقادیر محاسبه شده براساس مدل تراکم تک محوری بوده و نمی توان از تاثیر قوس زدگی تنش بر توزیع تنش ها و سایر پارامترهای متاثر از آن مانند تراوایی مخزن صرف نظر نمود.

بر اساس نتایج نتایج مدل سازی انجام شده قوس زدگی تنش بویژه در مخازنی که دارای مدول الاستیک پایتتری نسبت به سنگ های دربرگیرنده بوده تاثیر بسزایی در میزان تراکم مخزن و تولید نفت بواسطه مکانیسم رانش تراکمی خواهد داشت. قوس زدگی تنش در این مخازن می تواند باعث کاهش تراکم حفرات مخزن حتی تا ۵۰ درصد مقدار محاسبه شده بدون در نظر گرفتن تاثیر قوس زدگی تنش گردد. این کاهش تراکم مخزن متعاقبا باعث کاهش میزان تولید نفت در اثر رانش تراکمی و افت سریع تر فشار مخزن نسبت به مقادیر پیش بینی شده می گردد.

۰/۲۸ باشد ۵۰ درصد بیشتر از حالتی خواهد بود که ضریب قوس زدگی تنش در آن برابر با صفر باشد (Wang et al., 2013).

۵. نتیجه گیری

در این مقاله تاثیر قوس زدگی تنش بر میزان تراکم مخزن و مکانیسم رانش تراکمی به عنوان یکی از مکانیسم های تولید نفت از مخزن مورد بررسی قرار گرفت. رانش تراکمی یکی از چهار مکانیسم شناخته شده بازیافت نفت بوده که هرچند در اغلب میادین سهم کمتری نسبت به سه مکانیسم دیگر دارد ولی نمی توان از نقش آن در بازیافت نفت از ماتریس سنگ صرف نظر نمود.

نتایج مدل سازی انجام شده با استفاده از نرم افزار آباکوس مشخص ساخت ضرایب مسیر تنش های مخزن که پارامتر تعیین کننده در میزان تراکم مخزن هستند بسیار متفاوت از مقادیری است که براساس روابط پروالاستیک و مدل تراکم تک محوری محاسبه می شوند.

مدل سازی های انجام شده مشخص ساخت دو پارامتر هندسه مخزن و تفاوت مدول الاستیسیته سنگ مخزن و محیط دربرگیرنده آن دارای بیشترین تاثیر بر تراکم مخزن هستند. بر

منابع

- فاطمی عقدا، س. ا.، قاضی فرد، ا.، طاهری نیا، م. ح.، ۱۳۹۲. مدل سازی فرونشست میدان پارس جنوبی با روش های تحلیلی و نیمه تحلیلی، مجله انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، جلد ششم، ۴۷-۵۸.
- Asaei, H., Moosavi, M., Aghighi, M.A., 2018. A laboratory study of stress arching around an inclusion due to pore pressure changes. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 10, 678-693.
- Dake, L.P., 2001. *The practice of reservoir engineering* (revised edition). Elsevier.
- Dusseault, M.B., 2011. Geomechanical challenges in petroleum reservoir exploitation. *KSCE Journal of Civil Engineering* 15, 669-678.
- Fjar, E., Holt, R.M., Raaen, A., Risnes, R., Horsrud, P., 2008. *Petroleum related rock mechanics*. Elsevier.
- Holt, R., Flornes, O., Li, L., Fjær, E., 2004. Consequences of depletion-induced stress changes on reservoir compaction and recovery, Gulf rocks 2004, the 6th north America rock mechanics symposium (NARMS). American Rock Mechanics Association.
- Khan, M., Teufel, L.W., Zheng, Z., 2000. Determining the effect of geological and geomechanical parameters on reservoir stress path through numerical simulation, SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- Mulders, F.M.M., 2003. Modelling of stress development and fault slip in and around a producing gas reservoir.
- Sanni, M., 2018. *Petroleum Engineering: Principles, Calculations, and Workflows*. John Wiley & Sons.

-
- Sayers, C.M., Schutjens, P.M., 2007. An introduction to reservoir geomechanics. *The Leading Edge* 26, 597-601.
- Segura, J., Fisher, Q., Crook, A., Dutko, M., Yu, J., Skachkov, S., Angus, D., Verdon, J., Kendall, J., 2011. Reservoir stress path characterization and its implications for fluid-flow production simulations. *Petroleum Geoscience* 17, 335-344.
- Soltanzadeh, H., Hawkes, C.D., 2008. Semi-analytical models for stress change and fault reactivation induced by reservoir production and injection. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 60, 71-85.
- Sulak, R., 1991. Ekofisk field: the first 20 years. *Journal of Petroleum Technology* 43, 1,265-261,271.
- Taherynia, M.H., Aghda, S.F., Ghazifard, A., Moradi, E., 2017. Prediction of subsidence over oil and gas fields with use of influence functions (case study: South Pars gas field, Iran). *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science* 41, 375-381.
- Wang, F., Li, X., Couples, G., Shi, J., Zhang, J., Tepinhi, Y., Wu, L., 2015. Stress arching effect on stress sensitivity of permeability and gas well production in Sulige gas field. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 125, 234-246.
- Wang, F., Li, X., Couples, G.D., Wang, M., Zhang, Y., Zhao, J., 2013. The effect of stress arching on the permeability sensitive experiment in the su lige gas field, *International Conference Vibroengineering, JVE International*, pp. 158-163.