

بررسی تاثیر فشار موئی نه در شکاف ها و ارتفاع بلوک ماتریس بر عملکرد یکی از مخازن ایران

حیدر پیرمرادی^۱، سعید جمشیدی^۲، حجت نوروزی^۳، علیرضا کریمی^۴

دانشگاه علوم و تحقیقات تهران

h.pirmoradi2@gmail.com

چکیده

بخش اعظمی از سیالات هیدروکربنی قابل استحصال در دنیا در مخازن ترکیدار واقع شده‌اند از این رو مطالعه ویژگیهای این نوع از مخازن از اهمیت بسزائی برخوردار می‌باشد. وجود دو نوع تخلخل متفاوت در این نوع از مخازن از ویژگیهای آنها شمرده می‌شود. تمایز اشباع سیال موجود در ماتریسها با اشباع سیال موجود در شکافهای احاطه کننده آنها، منجر به ایجاد مکانیسمهای متفاوت تولید از ماتریسها (ریزش ثقیلی/آشام، نفوذ، جابجایی گرانو و ...) می‌شود. نیروهای حاکم بر این مکانیسمها عمدتاً عبارتند از نیروهای موئینگی و ثقل که با توجه به موقعیت ماتریسها و خصوصیات سیالات اشباع کننده و جنس سنگ سازند می‌توانند به صورت همگام و یا در مقابل همدیگر عمل کرده و دبی تولید نفت از ماتریسها را کنترل کنند. وجود عدم وجود فشار موئی نگی در شکاف ها از جمله موارد بحث بر انگیز در مطالعه مخازن شکافدار می باشد. در این مقاله با اعمال فشار موئی نه غی صفر در شکاف ها و همچنین با تغیی رات ارتفاع بلوک ماتریس، تاثیر پیوستگی موئی نگی بی ن ماتریس و شکاف بر عملکرد مخزن و سایی پارامترهای تولید بررسی شده است. و مشاهده گردید که خصوصیات فی زکی شکاف که اغلب نامشخص هستند، بطور قابل ملاحظه ای بازیافت نفت را تحت تاثیر قرار می دهند.

واژه های کلیدی: فشار موئی نگی، بلوک ماتریس، مخازن شکافدار، ضریب بازیافت نفت

^۱ - دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی نفت - دانشگاه علوم و تحقیقات تهران

^۲ - دکترای مهندسی نفت - استادیار دانشگاه صنعتی شریف

^۳ - دکترای مهندسی نفت - مدیر پژوهش در شرکت مهندسی و توسعه نفت

^۴ - فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی نفت - دانشگاه علوم و تحقیقات تهران

۱- مقدمه

از اوایل قرن بیستم تا کنون مطالعات گسترده‌ای راجع به جریان سیالات در مخازن شکافدار صورت گرفته است. این مطالعات نشأت گرفته از مشاهدات حاکی بر افزایش تولید از چاه با ایجاد شکاف در محیط اطراف آن می‌باشد. از آن موقع به بعد محققان بسیار زیادی به تحقیق درباره جنبه‌های گوناگون مخازن شکافدار پرداخته‌اند. معمولاً مخازن شکافدار در سازندهای ماسه سنگی، کربناته، شیلی و ... یافت می‌شوند. ویژگی بارز این نوع از مخازن وجود دو نوع تخلخل اولیه و ثانویه توأم می‌باشد. اکثر مخازن شکافدار را می‌توان متشکل از ماتریس‌ها که به وسیله شبکه‌ای از شکاف‌ها از همدیگر جدا شده‌اند فرض کرد. ماتریس‌ها دارای تراوایی بالایی نبوده ولی تخلخل آنها می‌تواند مانند مخازن معمولی کم یا زیاد باشد. شکاف‌ها غالباً به هم پیوسته بوده و در برخی از موارد حالت منظمی نیز دارند. نقش اساسی شکاف‌ها به مثابه ایجاد اتصال بین ماتریس‌های حاوی نفت و چاه می‌باشد. تعامل بین ماتریس‌های با تراوایی کم و تخلخل بالا، با شکاف‌های با تراوایی بالا و تخلخل کم اساس عملکرد این نوع از مخازن را تشکیل می‌دهد. وجود تخلخل دوگانه و همچنین وجود سیالات متمایز بین ماتریس و شکاف‌های همجوار با آن باعث شده است تا مکانیسم‌های تولید متفاوتی را در این نوع از مخازن شاهد باشیم. از جمله مکانیسم‌های بازیافت موجود می‌توان به انبساط سیال، آشام، ریزش ثقلی، نفوذ، جابجایی گرانی و اشاره کرد. [۱]

استفاده از رابطه خطی بین تراوایی نسبی و اشباع فازها و فشار موئینگی صفر در شکاف‌ها در شبیه‌سازی مخازن شکافدار برای اولین بار توسط Romm [۲] در سال ۱۹۶۶ ارائه شد. این نظریه بر اساس کار آزمایشگاهی با استفاده از جریان سیال در بین دو صفحه صیقل شیشه‌ای می‌باشد. بنابراین در این آزمایش‌ها به دلیل عدم به حساب آوردن ناهمگونی‌ها و زبری‌های موجود در شکاف‌ها نتایج آزمایش با واقعیت‌های موجود در طبیعت مخزن کاملاً متفاوت می‌باشد. لذا، بعد از آن زمان و مشاهده تفاوت‌های بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های تولید از مخازن محققان زیادی از جمله دکتر فیروزآبادی و Huage ، vicencio ، و sepehrnoori و نوروزی و همکاران [۳، ۴] بر آن شدند تا به تحقیق در باره تأثیر زبری‌ها و ناهمگونی‌های موجود در شکاف‌ها بپردازند. در این مقاله ما از فرمول ارائه شده توسط آقاییان فیروزآبادی و Huage [۳] استفاده کردیم و پیوستگی موئینگی بین ماتریس و شکاف را در مدل شبیه‌سازی اعمال کردیم و نتایج را بر عملکرد مخزن مورد بررسی قرار داده ایم.

۲- مشخصات مخزن مورد مطالعه

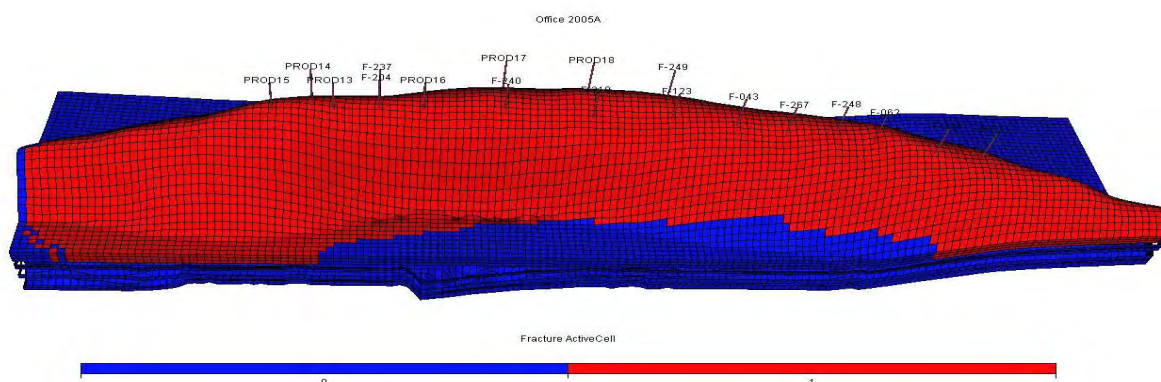
مخزن مورد مطالعه شامل ۹ لایه نفوذپذیری روغری و نفوذپذیری و لایه‌های زیرین است، در این مطالعه ما از لایه ۲ (ضخامت ۱۷۵ متر) استفاده کردیم زیرا نفوذپذیری است، هیچگونه تعامل بین زیر لایه‌های مخزنی وجود ندارد و حاوی ۷۰٪ (MMSTB۲۱۳۴) از نفت در جای مخزن می‌باشد و همچنین برای کاهش زمان اجرای نرم افزار تغیریات تنها در این لایه اعمال شده است. حجم آبدی احاطه کننده در این لایه تقریباً ۹۰۵۶ MMBbl می‌باشد. مخزن ما زیر اشباع با فشار اولیه ۵۹۲۰ و فشار اشباع ۵۹۲ می‌باشد و دمای مخزن ۱۹۰ درجه فارنهایت می‌باشد. مقدار متوسط تخلخل ماتریس و شکاف به ترتیب ۸/۱٪ و ۰/۱٪ و مقدار متوسط تراوایی ماتریس و شکاف به ترتیب ۰/۲۲ و ۸۸/۵ می‌باشد. با استفاده از داده‌های آزمایش‌های انبساط جرم ثابت و انبساط مرحله‌ای و همچنین استفاده از معادله حالت پنگ رابی‌نسون سه پارامتری و رابطه ویسکوزیته- Lohrenz-bra-clark (LBC) خواص سیال مخزن مدل سازی شده است. برخی از خواص مدل استاتیکی مخزن بصورت خلاصه در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: برخی از خصوصیات مدل استاتیکی مخزن مورد مطالعه

نوع محیط متخلخل	شکافدار	تعداد سلول ها	۳۷۶۸۰
طول متوسط بلوک ها در جهت X ، فوت	۸۲۰	تعداد گرید بلوک در جهت X	۱۵۷
طول متوسط بلوک ها در جهت Y ، فوت	۸۲۰	تعداد گرید بلوک در جهت Y	۴۰
طول متوسط بلوک ها در جهت Z ، فوت	۱۹۲	تعداد گرید بلوک در جهت Z	۷
تعداد لایه های نفت	۷	مدل مخزن مورد استفاده در شبیه ساز	کازمی
API	۲۶	Bobble point pressure,psi	۵۹۲
FVF ,Rbbl/STB oil	۱/۱۵	Total thickness,ft	۵۷۴
Water FVF, Rbbl/STB	۱/۰۱	Oil Viscosity, cp	۵/۲
GOR, Scf/STB	۲۱۵	Gas Viscosity ,cp	۰/۰۱۲
Rock Compressibility, $\times 10^{-6}, 1/\text{psi}$	۴/۵	Water Viscosity ,cp	۰/۷
Water Compressibility, $\times 10^{-6}, 1/\text{psi}$	۳/۳	Residual Oil Saturation,%	۰/۳۰
Oil density, lbm/ft3	۵۵/۹۵	Connate Water Saturation,%	۰/۲۸
Datum depth ,ftss	۱۰۹۹۱	WOC ,ftss	۱۲۰۰۵
Average Reservoir Pressure @ datum depth ,psi	۵۹۲۰	Reservoir Temperature , F	۱۹۰
Reservoir Top Depth , ftss	۱۰۵۶۷	Gas density, lbm/ft3	۰/۰۷۸

جدول ۲: محدودیت های اعمال شده بر چاه های تولیدی

حداقل دبی تولیدی نفت (STB/Day)	حداکثر برش آب (STBW/STBO)	حداکثر میزان (MSCF/STB)GOR	حداقل فشار ته چاه تولیدی (Psia)
۲۰۰	۰/۲	۲	۱۰۰۰



شکل ۱: شمای سه بعدی و موقعیت قرارگیری چاههای تولیدی را در مخزن مورد مطالعه

در این سناری و تولید از ۱۸ چاه تولیدی و با محدودیت‌های اعمال شده در جدول ۲ صورت گرفته است و در شکل ۱ شمای سه بعدی مخزن و طرز قرارگیری چاه‌های تولیدی در مخزن مورد مطالعه به تصویر کشیده شده است. لازم به ذکر است که بازه تکمیلی چاه‌های تولیدی در لایه دوم قرار داده شده است.

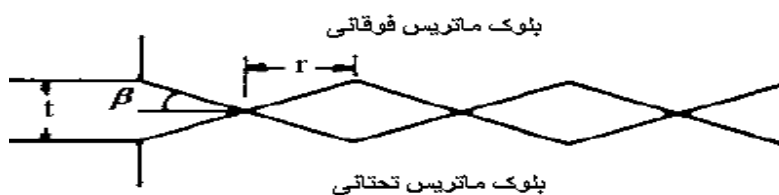
۳- تئوری فشار موئینگی در شکاف‌ها

فرض کردن فشار موئینگی صفر در شکاف‌ها منجر به ناپیوستگی موئینگی در بین ماتریس‌ها شده و میزان بازیافت نفت از ماتریس‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای این منظور فیروزآبادی و Hauge [۲] مقادیر فشار موئینگی را با استفاده از رابطه معروف Young-Laplace، رابطه ۱، بدست آورده‌اند.

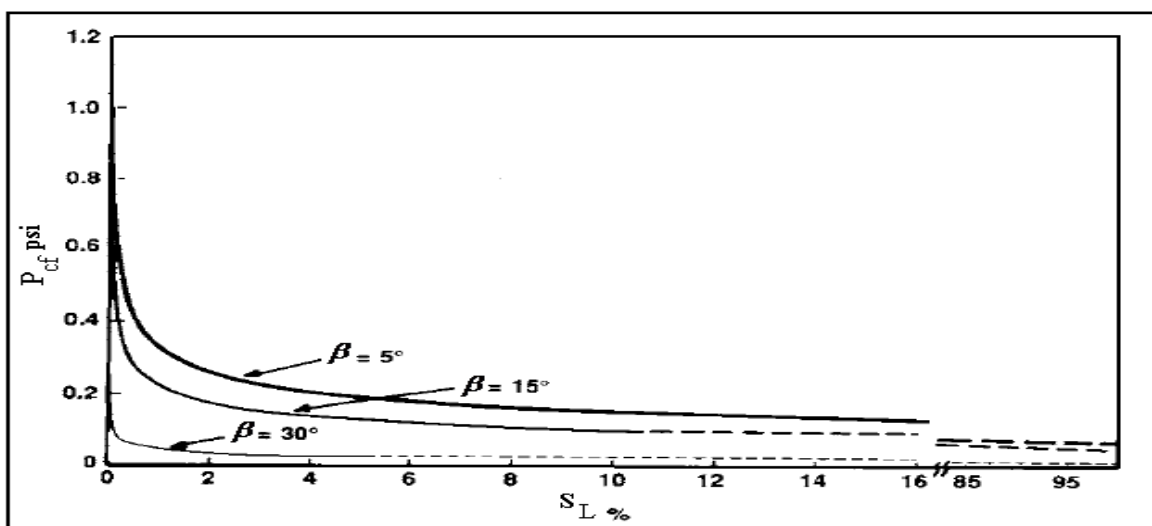
$$P_c = \gamma \times \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \dots\dots\dots(1)$$

در این رابطه P_c بیانگر تفاضل فشار در سطح تماس، r_1 و r_2 بیانگر شعاع‌های انحناهای سطوح منحنی در سطح تماس و γ بیانگر کشش سطحی بین دو فاز می‌باشد.

آنها بیان کردند که فشار موئینگی در شکاف‌ها تابعی از عرض شکاف، زبری سطوح شکاف و تعداد نقاط تماس بین دو سطح شکاف می‌باشد. همانگونه که در شکل ۲ نشان داده شده است، از شکل‌های هندسی مخروطی برای شبیه‌سازی محل‌های تماس بین دو سطح شکاف استفاده شده است. مقادیر فشار موئینگی به دست آمده برای زوایای β متفاوت در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲: نحوه شبیه سازی نقاط تماس در شکاف‌ها جهت محاسبه فشار موئینگی در شکاف‌ها. [۶]



شکل ۳: مقادیر فشار موئینگی به دست آمده برای زوایای β متفاوت. [۶]

۴- نحوه تعیین منحنی‌های فشار موئینگی برای شکاف‌ها [۷]

مقادیر به دست آمده فشار موئینگی توسط فیروزآبادی و Hauge با فرض زاویه به $\beta = 5^\circ$ صورت پارامتر بدون بعد (P_{cfd}) تبدیل شده است.

$$P_{cfd} = C \times \frac{b_o P_c}{\gamma} \dots\dots\dots(2)$$

در این رابطه، C ثابت معادله می‌باشد که با توجه به سیستم واحد مورد استفاده تعیین می‌گردد، b_o بیانگر میانگین نصف عرض شکاف‌ها، γ بیانگر کشش سطحی و P_c نیز بیانگر فشار موئینگی در شکاف می‌باشند. مقادیر عددی فشار موئینگی بدون بعد P_{cfd} به صورت تابعی از اشباع فاز تر کننده در جدول (۳) آورده شده است. در این رابطه اگر b_o ، γ و P_c به ترتیب دارای واحدهای میکرون، dynes/cm و psi باشند، مقدار ثابت برابر با ۰/۱۴۵ خواهد بود. همانگونه که در رابطه ۲ مشخص می‌باشد، فشار موئینگی در شکاف‌ها رابطه معکوس با عرض شکاف دارد. به طوریکه با افزایش عرض شکاف‌ها، فشار موئینگی در شکاف‌ها کاهش می‌یابد. طبق تحقیقات انجام گرفته توسط سعیدی [۸] مشخص شده است که برای مقادیر عرض شکاف بیش از ۵۰ میکرون می‌توان از فشار موئینگی در شکاف‌ها صرف‌نظر کرد در حالی که آستانه عدم تأثیرگذاری فشار موئینگی توسط افراد دیگر [۶] ۱۰۰ میکرون گزارش شده است.

جدول ۳: مقادیر عددی فشار موئینگی بدون بعد P_{cfd}

S_L	P_{cfd}
%	
۰	۱۷/۲۴
۰/۰۱	۴/۷۴
۰/۰۲	۳/۸۰۷
۰/۰۴	۳/۰۱۶
۰/۰۶	۲/۵۸۵
۰/۰۸	۲/۴۴۲
۰/۱	۲/۲۹۸
۰/۱۲	۲/۱۵۴
۰/۱۴	۲/۰۱۱
۰/۱۶	۱/۸۶۷
۱	۰/۸۶۱۹

۵- بررسی تأثیر پیوستگی موئینگی بر عملکرد مخزن

برای شبیه‌سازی پیوستگی موئینگی از دو روش پیشنهاد شده زیر استفاده شده است:

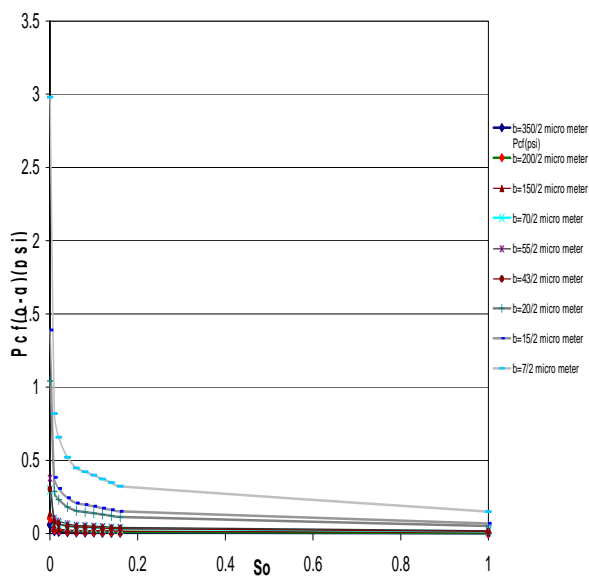
۱- اعمال پیوستگی موئینگی بی‌ن ماتریس و شکاف با استفاده از منحنی‌های فشار موئینگی ارائه شده توسط Firoozabadi-Huage

۲- اعمال پیوستگی موئینگی بی‌ن ماتریس با در نظر گرفتن توده‌ای از بلوک‌های ماتریس‌های انباشته به صورت یک بلوک ماتریس

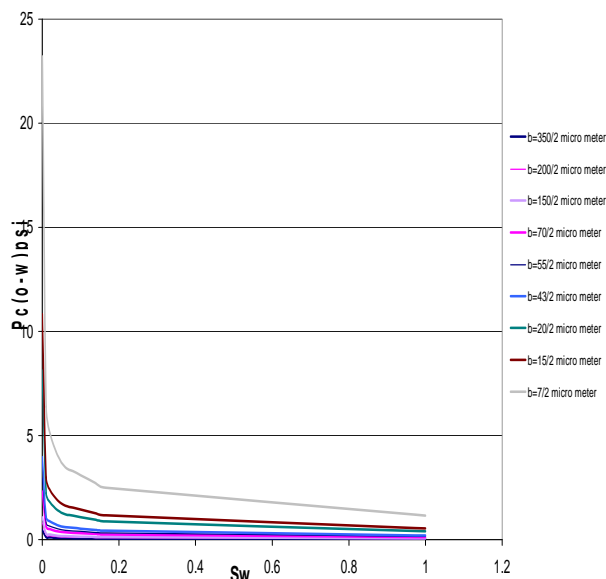
طبق روش ارائه شده Firoozabadi-Huage ابتدا اندازه عرض شکافها موجود در هر کدام از سلول‌های شبکه با استفاده از رابطه (۳) [۱] محاسبه شده و به ۹ ناحیه، تقسیم‌بندی شده اند. منحنی‌های فشار موئینگی با به کار بردن داده‌های کشش سطحی و میانگین عرض شکافها در هر ناحیه در معادله (۲) محاسبه می‌شوند. میانگین عرض شکافهای در نظر گرفته شده و منحنی‌های فشار موئینگی سیستم آب-نفت و گاز-نفت متناظر با هر کدام از این ناحیه‌ها در شکافها در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده اند. وبعد از تعریف جداول فشار موئینگی برای شکافها در نرم افزار، نتایج زیر به دست آمده است.

$$b = \sqrt{\frac{k_f}{84.4 \times \phi_f}} \dots\dots\dots(3)$$

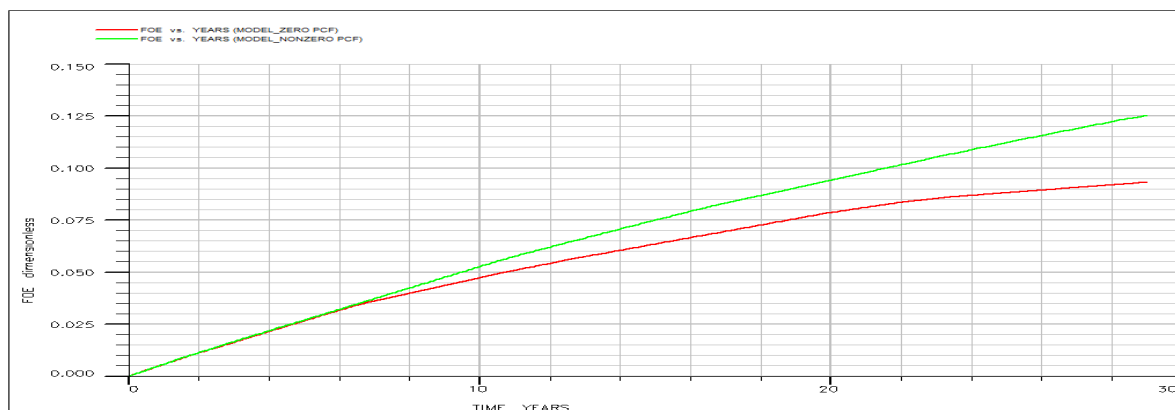
نمودارهای ۱ و ۲ میزان افزایش در ضریب بازیافت نفت و افزایش افت فشار مخزن را نشان می‌دهند. با توجه به نمودارهای مذکور اعمال فشار موئینگی غیر صفر در شکاف موجب افزایش ۲/۸٪ (۶۰ MMSTB) در ضریب بازیافت نهایی و افزایش افت فشار مخزن به مقدار ۸۰۰ psi نسبت به حالت فشار موئینگی صفر در مخزن شده است. بدلیل اینکه اعمال فشار موئینگی در شکافها موجب کاهش اثر فشار موئینگی در ماتریس‌ها و در نتیجه افزایش تولید از ماتریس می‌شود. همانگونه که در شکل نیز مشخص شده است، می‌توان این گونه بیان کرد که وارد کردن فشار موئینگی در شکافها منجر به کاهش تأثیر بازدارندگی فشار موئینگی ماتریس در میزان بازیافت نفت می‌شود.



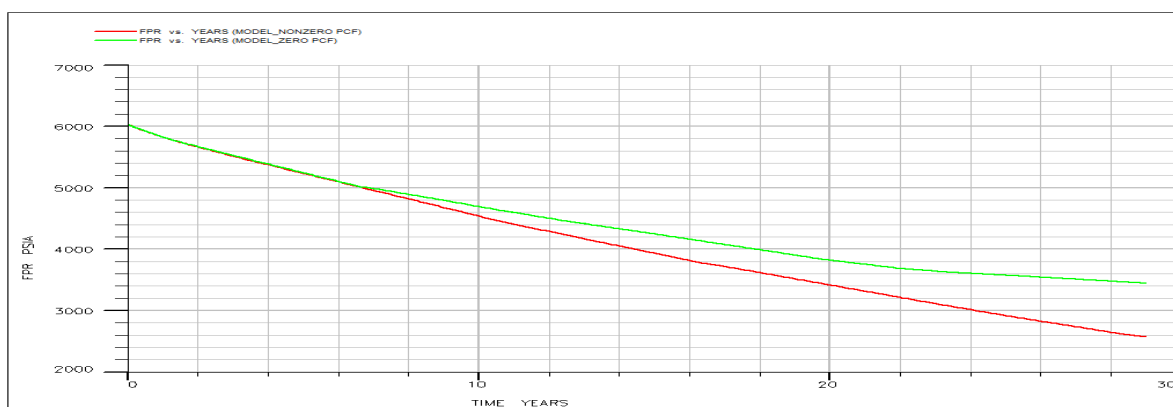
شکل ۵: منحنی‌های فشار موئینگی متناظر در سیستم گاز-نفت



شکل ۴: منحنی‌های متناظر فشار موئینگی در سیستم آب-نفت



نمودار ۱- تاثیر پیوستگی موئینگی بین ماتریس و شکاف بر مقدار ضریب بازیافت نفت



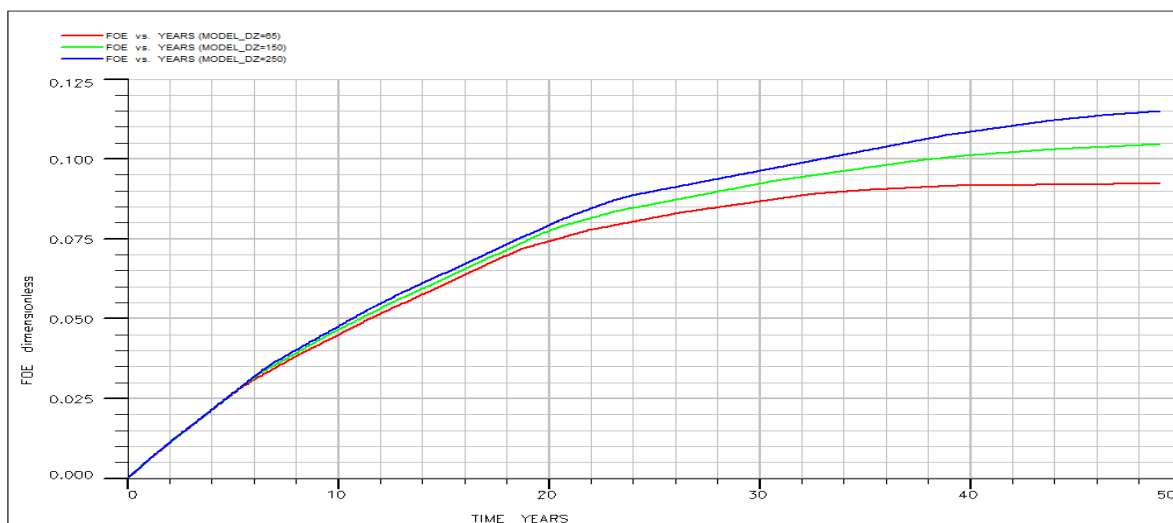
نمودار ۲- تاثیر پیوستگی موئینگی بین ماتریس و شکاف بر مقدار افت فشار مخزن

۶- نقش پیوستگی موئینگی در ماتریس ها با اعمال افزایش ارتفاع بلوک در ماتریس

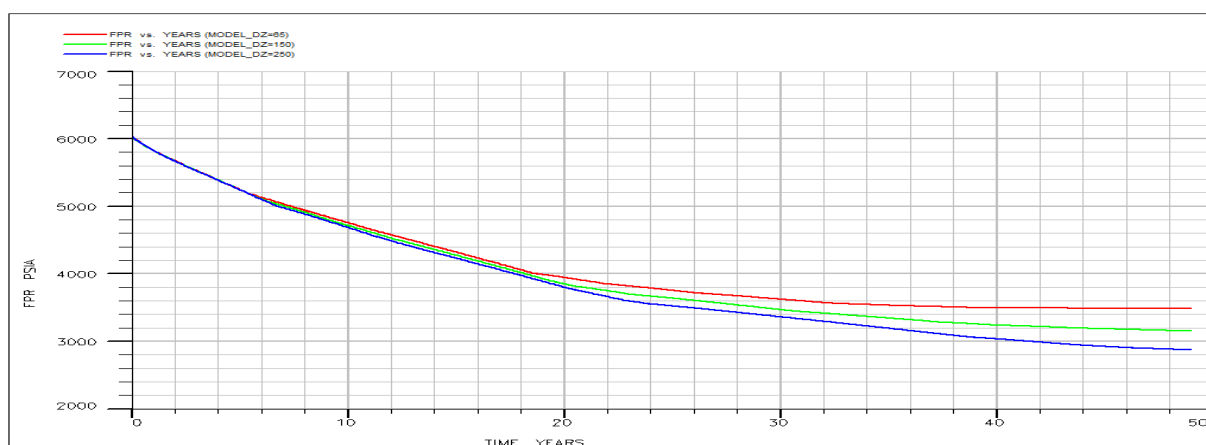
در این قسمت با افزایش ارتفاع بلوک ماتریس، نقش پیوستگی موئینگی در ماتریس را بر تولید مخزن بررسی می‌کنیم. برای بررسی نقش پیوستگی موئینگی در چگونگی عملکرد مخزن از ارتفاع بلوک‌های ۶۵، ۱۵۰ و ۲۵۰ فوت استفاده شده است. نمودارهای ۳، ۴ به ترتیب نشان دهنده تاثیر ارتفاع بلوک‌ها بر ضریب بازیافت نفت، افت فشار مخزن، دبی نفت تولیدی می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی در جدول ۴، نشان دهنده افزایش تولید با افزایش ارتفاع بلوک ماتریس می‌باشد، که تاثیر اعمال پیوستگی موئینگی در ماتریس‌ها با افزایش در ارتفاع بلوک ماتریس‌ها می‌باشد.

جدول ۴: تاثیر ارتفاع بلوک بر بازیافت نفت

ارتفاع بلوک ماتریس (ft)	ضریب بازیافت نهایی %	افت فشار مخزن Psia
۶۵	۹/۲	۳۴۹۵
۱۵۰	۱۰/۳	۳۱۸۵
۲۵۰	۱۱/۵	۲۸۷۰



نمودار ۳: تأثیر ارتفاع بلوک ماتریس بر ضریب بازیافت نفت



نمودار ۴: تأثیر ارتفاع بلوک ماتریس بر افت فشار مخزن

۷- نتایج

فشار موئینگی در شکاف ها پارامتر تاثیرگذار بر عملکرد مخزن می باشد، که این اثر در برخی از مخازن با توجه به خصوصیات ماتریس و شکاف می تواند بی شتری یا کمتر باشد، بنابراین نادیده گرفتن این پارامتر می تواند خطای زیادی را بر نتایج مطالعات شبیه سازی ایجاد کند. در این تحقیق می توان نتایج زیر را برشمرد:

۱- در مخزن مورد مطالعه اعمال فشار موئینگی غیر صفر در شکافها منجر به کاهش تأثیر فشار موئینگی در ماتریسها شده و در نتیجه میزان بازیافت نفت و افت فشار مخزن افزایش می یابد.

۲- پیوستگی موئینگی بین ماتریسها با افزایش ارتفاع بلوک ماتریس منجر به افزایش قابل توجه بازیافت نفت و عملکرد مکانیسم ریزش ثقلی می شود.

۳- در مخازن دارای بلوک های ماتریس با فشار موئینگی بی شتر، اعمال فشار موئینگی غیر صفر در شکاف ها، تاثیر بی شتری بر میزبان بازیافت دارد.

۸- علائم و اختصارات

FPR =	افت فشار مخزن	FOE =	ضریب بازیافت نفت
b_0 =	میانگین عرض شکاف	H =	ارتفاع بلوک ماتریس
p_c =	فشار موئینگی	P_{cfd} =	فشار موئینگی بدون بعد شکاف
K_f =	تراوایی شکاف	S_L =	درجه اشباع سیال

۹-مراجع

- 1) Van Golf-Racht, T.D.: “*Fundamentals of Fractured Reservoir Engineering*”, Elsevier Scientific Pub. Co., Amsterdam (1982).
- 2) Romm, E. S.: “*Fluid Flow in Fractured Rocks*” (English translation) W. R. Blake (transl.), Philips Petroleum Co., Bartlesville, Okla., 1972.
- 3) Firoozabadi A., Hauge J.: “*Capillary Pressure in Fractured Porous Media*”, Paper SPE 18747 presented at the SPE California Regional meeting held in Bakersfield, CA. (April 5-7, 1989).
- 4) Vicencio O.A., Sepehrnoori K., Miller M.A.: “*Simulation of Nitrogen Injection Into Naturally Fractured Reservoirs Based on Uncertain Properties and Proper Matrix Grid Resolution*”, paper SPE 104038 Presented at the SPE International Petroleum Conference in Mexico, (September 2006)
- 5) Noroozi M.M., Moradi B. and Bashiri G.: “*Effects of Fracture Properties on Numerical Simulation of a Naturally Fractured Reservoir*”, paper SPE 132838 Presented at the Trinidad Energy Resources Conferences held in Spain, (June 2010)
- 6) A.M. Saidi: “*Discussion of Capillary Pressure in Fractured Porous Media*”, Paper SPE 21892 (february 1991).
- 7) Porte J.J., Kossack C.A.: “*The Effect of Fracture Relative Permeabilities and Capillary Pressure on the Numerical Simulation of Naturally Fractured Reservoirs*”, paper SPE 95241 presented at the SPE annual technical conference and exhibition held in Dallas, Texas (October 9-12, 2005).
- 8) Saidi, A.M.: “*Reservoir Engineering of Fractured Reservoirs*”, TOTAL Edition Press, Paris (1987).