

## شبیه‌سازی و مدل‌سازی مخزن نفتی تحت تزریق آب با متلب

مهدی فدایی، دانشگاه علم و صنعت ایران

### چکیده

در صنایع نفت و گاز معمولاً شبیه‌سازی و مدل‌سازی مخازن نفتی با استفاده از نرم‌افزارهای رایج مانند اکلپس انجام می‌شوند. در این مطالعه یک مخزن نفتی تحت فرایند ازدیاد برداشت با استفاده از تزریق آب با نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی و مدل‌سازی شده است. میدان نفتی واقع شده در جنوب‌غربی ایران دارای مخازن نفتی با ابعاد ۴×۱۴ کیلومتر مربع در لایه آسماری و ۵×۱۸ کیلومتر مربع در لایه بنگستان می‌باشد که در این مطالعه مخزن بنگستان شبیه‌سازی شده است. جنس سنگ مخزن کربناته بوده و دارای نفت با درجه سبکی API ۲۷/۷، فشار ۵۰۰۰ پام در عمق مبنای ۱۱،۴۳۰ فوت زیر سطح دریا، فاقد کلاهدک گازی و دمای ۲۳۸ درجه فارنهایت می‌باشد. از جمله نوآوری‌های کد متلب ارائه شده، جامعیت این کد جهت مدل‌سازی مخازن نفتی و گازی در ابعاد وسیع و در حالت‌های همگن و ناهمگن می‌باشد به طوری که اگر در مخزن نفتی و یا گازی بلوک‌های غیرفعال، تغییرات چینه‌ای، گسل در ابعاد وسیع، اثر پوسته، شکاف و سفره آب فعال وجود داشته باشد، قابلیت مدل‌سازی مخزن را دارد. نتایج دقیق ارائه شده و تسهیل فرایند مدل‌سازی مخازن نسبت به نرم‌افزار اکلپس از قابلیت‌های دیگر کد متلب ارائه شده می‌باشد. در این مطالعه جهت بررسی عملکرد کد متلب ارائه شده برای مدل‌سازی مخزن نفتی بنگستان، یک مخزن نفتی مستطیل شکل با ابعاد ۵۰×۱۸۰ بلوک مربعی با طول و عرض برابر با ۱۰۰ متر در نظر گرفته شده است. مخزن نفتی شکافدار بوده و انتقال‌پذیری در جهات عمودی و افقی برای لایه‌هایی از مخزن به دلیل تغییرات چینه‌ای متفاوت می‌باشد. چاه‌های تولیدی و تزریقی با استفاده از آرایش پنج‌نقطه (چهار چاه تولیدی و یک چاه تزریقی) قرار داده شده‌اند. بر این اساس، صحت کد نوشته شده با استفاده از آنالیز پایداری<sup>۱</sup> بررسی شد. با توجه اینکه مخزن نفتی شبیه‌سازی شده، شکافدار می‌باشد، با مقایسه نتایج حاصل از کد متلب و اکلپس مشاهده گردید که اختلاف متوسط بین فشار چاه‌های تولیدی در طول عملیات ازدیاد برداشت با تزریق آب کمتر از ۳ درصد می‌باشد که نشان‌دهنده قابلیت بالای کد متلب ارائه شده برای شبیه‌سازی مخازن شکافدار است. با مقایسه زمان اجرای کد متلب ارائه شده برای شبیه‌سازی مخزن نفتی بنگستان با زمان اجرای نرم‌افزار اکلپس، مشاهده می‌شود که کد ارائه شده منجر به کاهش ۳۱ درصدی زمان اجرای شبیه‌سازی می‌شود. با توجه به اینکه در کد متلب ارائه شده برای هر بلوک، فلاکس‌های جرمی در نظر گرفته می‌شود، کد متلب ارائه شده قادر خواهد بود که مخازن نفتی ناهمگن تحت تأثیر سفره آب فعال را نیز با دقت بالا شبیه‌سازی کند.

### اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۷/۱۲/۲۳

تاریخ ارسال به داور: ۹۸/۱۰/۱۷

تاریخ پذیرش داور: ۹۸/۰۲/۱۸

### واژگان کلیدی:

شبیه‌سازی، مدل‌سازی، مخزن، نفت، تزریق آب، متلب.

### مقدمه

روش‌های حل عددی با استفاده از نرم‌افزار متلب برای جریان در محیط متخلخل منتشر نمودند. با وجود اینکه هنر شبیه‌سازی مخزن بیش از چهار دهه تکامل یافته، هنوز یک فعالیت پژوهشی قابل توجه است که هدف آن، شبیه‌سازی‌های مخزنی سریع‌تر، قوی‌تر و دقیق‌تر باشد، ارائه نگردیده است. مطالعه انجام‌شده توسط آرنس و همکاران [۲] با جریان تک‌فاز غیرمتراکم شروع و گام به گام به مدل نفت سیاه و جریان دو فازی فشرده تقسیم می‌شود. برای هر مورد، یک طرح عددی اساسی در جزئیات ارائه می‌گردد. در مطالعه انجام شده توسط آرنس و همکاران به مدل مخزن نفتی تحت فرایند ازدیاد

از مهم‌ترین اهداف مدیریت مخزن، بهینه‌سازی بازیافت نفت از مخازن است. امروزه بحث ازدیاد برداشت از مخازن به مسئله‌ای بسیار مهم در صنعت نفت تبدیل گشته است. مزیت ازدیاد برداشت با تزریق آب نسبت به روش تزریق گاز بهبود نسبت تحرک و بازده ماکروسکوپی می‌باشد. محققان زیادی تاکنون موفق به استفاده از نرم‌افزار متلب برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی مخازن هیدروکربوری شده‌اند. کریمی فرد و همکاران [۱] فرایند تزریق آب در محیط شکافدار را با استفاده از روش‌های عددی شبیه‌سازی کردند. آرنس و همکاران [۲] در سال ۲۰۰۷، کتابی با عنوان استفاده از

\* نویسنده‌ی عهد‌دار مکاتبات (fadaei.petroleum@gmail.com)

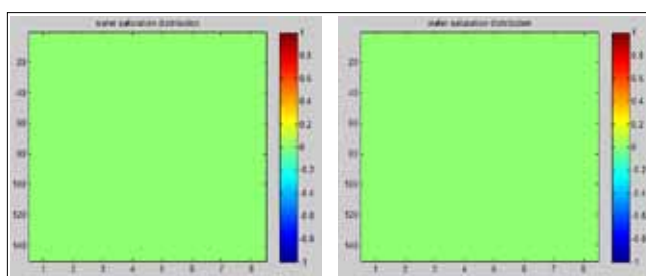
که قابلیت گذردهی بین دبلوک  $i$  و  $K_{ij}$ ، تراوایی بین دبلوک  $i$  و  $A_{ij}$ ، سطح مقطع بین دبلوک  $i$  و  $z$  و  $h_{ij}$  طول بین مرکزهای دبلوک مجاور می‌باشد. پارامتر شعاع موثر چاه با استفاده از رابطه-۲ که در سال ۱۹۹۴ توسط پیسمن [۵] ارائه شده، محاسبه گردید.

$$r_o = 0.28 * \frac{(dx^2 * (\frac{K_y}{K_x})^{0.5} + dy^{0.5} * (\frac{K_x}{K_y})^{0.5})^{0.5}}{(\frac{K_y}{K_x})^{0.25} + (\frac{K_x}{K_y})^{0.25}} \quad (2)$$

که در آن،  $dx$  طول بلوک در جهت  $x$ ،  $dy$  طول بلوک در جهت  $y$ ،  $K_x$  تراوایی بلوک در جهت  $x$  می‌باشد. شعاع چاه برابر با ۰٫۱ در نظر گرفته شد.  $K$  متوسط هندسی تراوایی در جهات  $x$  و  $y$  می‌باشد که در رابطه-۳ جهت تعیین پارامتر ضریب اتصال مورد استفاده قرار می‌گیرد. ضریب اتصال<sup>۳</sup> طبق رابطه (۳) محاسبه گردید [۵].

$$C_F = \frac{0.00127 * 2 * \pi * K * dz}{\log(\frac{r_o}{r_w}) + S} \quad (3)$$

که در آن،  $S$  ضریب پوسته چاه تولیدی می‌باشد. پس از تعریف فلاکس‌های جرمی برای بلوک‌های مجاور هم و تعیین بالادست و پایین دست هر بلوک، ماتریس‌های  $g$  و ژاکوبین به صورت زیر تعریف می‌شوند: تعداد سطرهای ماتریس  $g$ ، دوبرابر تعداد بلوک‌های فعال و دارای یک ستون می‌باشد. تعداد سطر و ستون ماتریس ژاکوبین در حالت فشار ته‌چاهی ثابت، ۲ برابر تعداد بلوک‌های فعال است. فشار تزریق چاه‌های تزریقی برابر با ۷۰۰۰ psi و فشار چاه تولیدی برابر با ۵۰۰۰ psi در نظر گرفته شد. آرایش چاه‌های تولیدی و تزریقی به صورت ۵ نقطه<sup>۴</sup> در نظر گرفته شد. ضرایب حجمی و ویسکوزیته نفت و آب در فشارهای مختلف داده شد و برای تعیین ضریب حجمی نفت به منظور کاربرد در کد متلب نوشته شد. بهترین منحنی عبوری از این نقاط گذرانده شد و در فشار مورد نظر مقدار ضریب حجمی نفت درون‌یابی گردید. تراوایی نسبی نفت و آب نیز تابع اشباع آب و نفت بوده و به صورت روابط-۴ و ۵ تعیین می‌شوند.



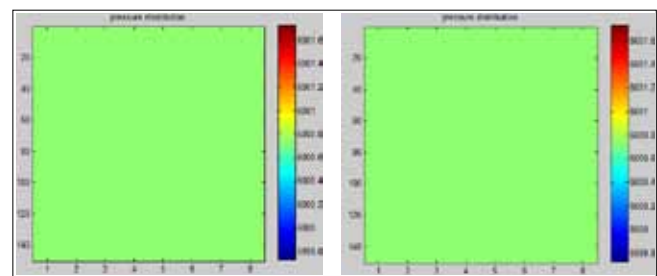
شکل ۲ | توزیع اشباع آب مخزن نفتی در حالت اولیه (A) و پس از اعمال آشفستگی و همگرا شدن چرخه نیوتن-رافسون (B)

برداشت با تزریق آب اشاره‌ای نشده است. در سال ۲۰۱۰ جعفرپور و همکاران [۳] یک شبیه‌ساز عددی دوبعدی برای فرایند ریزش ثقیل به کمک بخار براساس مدل پیشنهادی Coats و همکاران در محیط متلب تولید شد. در این مطالعه کاستی‌های پژوهش‌های انجام شده توسط کریمی فرد و همکاران [۱۱]، آرنس و همکاران [۲] و جعفرپور و همکاران [۳] از جمله عدم بررسی مخزن نفتی تحت فرایند ازدیاد برداشت تزریق آب در حالت همگن و ناهمگن شامل بلوک‌های غیرفعال یا تغییرات چینه‌شناسی یا وجود شکاف‌های همگن و ناهمگن (گسل‌های طویل) و اثر پوسته مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. حالت‌های مذکور با استفاده از نرم‌افزار متلب و اکلیپس مدل‌سازی شده و پس از بررسی نتایج حاصل، عملکرد کد جامع متلب ارائه شده برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی مخزن نفتی با نرم‌افزار اکلیپس سنجیده می‌شود.

### ۱- مواد و روش‌ها

در ابتدا کد تابع همسایگی در نرم‌افزار متلب نوشته شد. به این صورت که به هر بلوک یک شماره جهت تشخیص در نرم‌افزار متلب ارائه شد. با تعریف کلیه کدها به صورت توابع در متلب، می‌توان این توابع را به صورت کلی با ابعاد مختلف مخزن مورد استفاده قرار داد. در این مطالعه مخزن با ابعاد  $8 \times 150$  مورد بررسی قرار گرفت که ابعاد بلوک‌ها در راستای  $x$  و  $y$  برابر با ۱۰۰ می‌باشد. به منظور تعیین بالادست<sup>۲</sup> هر بلوک، مقادیر فشار در هر بلوک با بلوک‌های همسایه مقایسه گردید به طوری که بلوک با فشار بیشتر به عنوان بلوک بالادست در نظر گرفته شد. تخلخل مخزن در نواحی شکاف نخورده برابر با ۰٫۱۶، لحاظ گردید در حالی که برای نواحی شکافدار تخلخل ماتریکس متأثر از تخلخل شکاف نیز می‌باشد. قابلیت گذردهی هر بلوک با استفاده از رابطه-۱ تعیین شد [۴].

$$\tau_{ij} = K_{ij} \frac{A_{ij}}{h_{ij}} \quad (1)$$



شکل ۱ | توزیع فشار مخزن نفتی در حالت اولیه (A) و پس از اعمال آشفستگی و همگرا شدن چرخه نیوتن-رافسون (B)

آشفستگی<sup>۵</sup> ایجاد شود، به دلیل عدم حضور چاه‌های تولیدی و تزریقی و همگرا شدن جواب‌ها در چرخه نیوتن-رافسون مخزن به شرایط اولیه و متعادل برمی‌گردد به طوری که به دلیل عدم تولید و تزریق، اشباع آب در مخزن پس از اعمال آشفستگی، برابر با اشباع اولیه ۰/۲ می‌باشد [۶]. در شکل‌های ۱-۲، توزیع فشار و اشباع آب مخزن نفتی در حالت اولیه و پس از اعمال آشفستگی نشان داده شده است.

### ۲-۲- مقایسه نتایج حاصل از متلب با اکلیپس برای اشباع نفت مخزن نفتی تحت تزریق آب

در شکل ۳- فشار ته‌چاهی چاه تولیدی شماره ۱ نسبت به زمان به دست آمده با اکلیپس و متلب نشان داده شده است. با توجه به جدول ۱- که نشان‌دهنده مقادیر متناظر با شکل ۳- می‌باشد، مقدار اختلاف متوسط بین فشار چاه شماره ۱ حاصل از اکلیپس و متلب کمتر از ۲ می‌باشد.

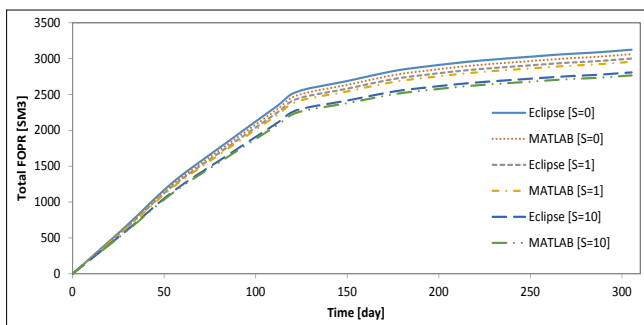
مقادیر متناظر با شکل ۳- در جدول ۱- نشان داده شده است.

در شکل ۴- مقدار کل تولید نفت از چاه‌های تولیدی برحسب زمان نشان داده شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، با افزایش ضریب پوسته چاه‌های تولیدی و تزریقی، مقدار کل نفت تولیدی از مخزن کاهش می‌یابد. در جدول ۲- مقادیر متناظر با شکل ۴- نشان داده شده است. با توجه به مقادیر نشان داده شده در جدول ۲- دیده می‌شود که میزان متوسط خطا بین نتایج حاصل از اکلیپس و متلب با توجه به شکل ۴- کمتر از ۳ درصد می‌باشد.

با توجه به شکل‌های ۳- و ۴ مشاهده می‌شود که مقدار متوسط اختلاف بین نتایج حاصل از اکلیپس و متلب از جمله مقدار کل نفت تولیدی از مخزن و فشار ته‌چاهی چاه تولیدی شماره ۱، به ترتیب کمتر از ۳ و ۲ درصد می‌باشد.

### ۲-۳- مقایسه زمان اجرای کد متلب ارائه شده با اکلیپس

در جدول ۳-، زمان اجرای کد متلب ارائه شده برای مدل‌سازی مخزن



شکل ۴ | نمودار مقدار کل نفت تولیدی از مخزن با اکلیپس و متلب نسبت به زمان

$$Kr_o = (1 - S_w)^3 \quad (4)$$

که  $Kr_o$  تراوایی نسبی نفت و  $S_w$  اشباع آب می‌باشد.

$$Kr_w = S_w^3 \quad (5)$$

که  $Kr_w$  تراوایی نسبی آب و  $S_w$  اشباع آب است. در این مطالعه ضریب حجمی نفت با فشار به صورت رابطه ۶- تغییر می‌کند.

$$Bo = 4e-10 * p \quad (6)$$

و ضریب حجمی آب با فشار تغییری نمی‌کند. تغییرات چگالی نفت با فشار به صورت رابطه ۷- می‌باشد.

$$\rho_o = 2 * 1.8e-9p + 2.31 * e-5 \quad (7)$$

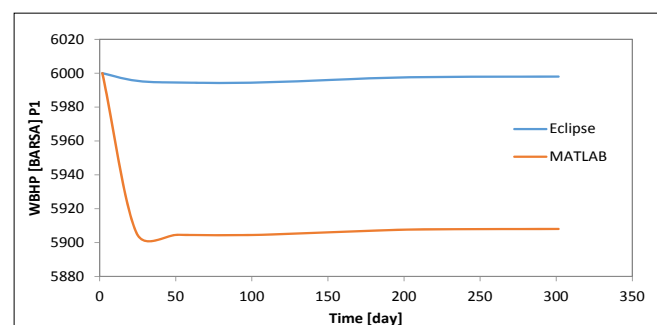
و تغییرات چگالی آب با تغییرات فشار ناچیز در نظر گرفته می‌شود. همه شرایط در نظر گرفته شده برای کد متلب در نرم‌افزار اکلیپس نیز اعمال می‌شود و کلیه نتایج با همدیگر مورد مقایسه و بحث قرار می‌گیرد.

### ۲- نتایج و بحث

#### ۲-۱- آنالیز پایداری

به منظور بررسی صحت کد نوشته شده در نرم‌افزار متلب از آنالیز پایداری استفاده می‌شود [۶]. آنالیز پایداری به این صورت است که در صورت عدم وجود چاه تولیدی و تزریقی در مدل در نظر گرفته شده، در صورتی که با استفاده از تغییرات فشار در مدل

زمان [day]	فشار ته‌چاهی (متلب)	فشار ته‌چاهی (اکلیپس)
۰	۶۰۰۰	۶۰۰۰
۵۰	۵۹۰۴٫۶	۵۹۹۴٫۵
۱۰۰	۵۹۰۴٫۵	۵۹۹۴٫۴
۱۵۰	۵۹۰۶	۵۹۹۶
۲۰۰	۵۹۰۷٫۶	۵۹۹۷٫۶
۲۵۰	۵۹۰۷٫۹	۵۹۹۷٫۹
۳۰۰	۵۹۰۸	۵۹۹۸



شکل ۳ | نمودار فشار ته‌چاهی چاه تولیدی شماره ۱ حاصل از اکلیپس و متلب نسبت به زمان

می‌شود. مخزن نفتی شکافدار بوده و انتقال پذیری در جهات عمودی و افقی برای لایه‌هایی از مخزن به دلیل تغییرات چینه‌ای متفاوت می‌باشد. چاه‌های تولیدی و تزریقی با استفاده از آرایش ۵ نقطه (چهار چاه تولیدی و یک چاه تزریقی) قرار داده شدند. صحت کد نوشته شده با استفاده از آنالیز پایداری بررسی شد. با توجه اینکه مخزن نفتی شبیه‌سازی شده، شکافدار می‌باشد، با مقایسه نتایج حاصل از کد متلب و اکلیپس مشاهده گردید که اختلاف متوسط بین فشار چاه‌های تولیدی در طول عملیات ازدیاد برداشت با تزریق آب کمتر از ۳٪ می‌باشد که نشان‌دهنده قابلیت بالای کد متلب ارائه شده برای شبیه‌سازی مخازن شکافدار می‌باشد. با مقایسه زمان اجرای کد متلب ارائه شده برای شبیه‌سازی مخزن نفتی بنگستان با زمان اجرای نرم‌افزار اکلیپس، مشاهده می‌شود که کد ارائه شده منجر به کاهش ۳۱ درصدی زمان اجرای شبیه‌سازی می‌شود. با توجه به اینکه در کد متلب ارائه شده برای هر بلوک فلاکس‌های جرمی در نظر گرفته می‌شود، کد متلب ارائه شده قادر خواهد بود که مخازن نفتی ناهمگن تحت تاثیر سفره آب فعال را نیز با دقت بالا شبیه‌سازی کند. از قابلیت‌های دیگر کد متلب ارائه شده جهت شبیه‌سازی و مدل‌سازی مخازن هیدروکربوری می‌توان به امکان تعیین نمودن پارامترهای موثر سنگ و سیال و تغییرات آنها با فشار اشاره نمود؛ به این شکلی که می‌توان پارامترهای ضریب حجمی نفت و آب، چگالی نفت و آب و خواص سنگ را به شکلی که در واقعیت تغییر می‌کند، به صورت تابعی از فشار مخزن بیان نمود. از دستاوردهای این پژوهش می‌توان به بررسی عملکردی نرم‌افزار متلب برای شبیه‌سازی و مدل‌سازی مخازن نفتی و گازی همگن و ناهمگن تحت فرایندهای مختلف ازدیاد برداشت و همچنین توسعه نرم‌افزارهای شبیه‌ساز مخزن اشاره کرد. ■

نفتی شکافدار بنگستان با زمان اجرای برنامه اکلیپس مقایسه شده است. با توجه به جدول ۳- دیده می‌شود که کد متلب ارائه شده به‌منظور شبیه‌سازی مخزن نفتی شکافدار بنگستان، زمان اجرای شبیه‌سازی را ۳۱ درصد کاهش داده است.

### نتیجه‌گیری

به‌منظور بررسی عملکرد کد متلب ارائه شده جهت شبیه‌سازی مخازن نفتی شکافدار واقعی و مقایسه عملکردی آن با نرم‌افزار اکلیپس، مخزن نفتی بنگستان به‌صورت یک مخزن نفتی مستطیل شکل با ابعاد ۵۰×۱۸۰ بلوک مربعی با طول و عرض برابر با ۱۰۰ متر در نظر گرفته

۲ | مقادیر متناظر با شکل-۴

Total FOPR [SM3]						
Eclipse			MATLAB			Time [day]
S=0	S=1	S=10	S=0	S=1	S=10	
0	0	0	0	0	0	0
1275	1224.5	1145.8	1249.5	1206.1	1128.6	50
2325	2232.9	2089.5	2278.5	2199.4	2058.1	100
2687.5	2581	2514.2	2633.7	2542.3	2379	150
2887.5	2773.2	2594.9	2829.7	2731.5	2556	200
3025	2905.2	2718.5	2964.5	2861.6	2677.7	250
3125	3001.2	2808.4	3062.5	2956.2	2766.3	300

۳ | مقایسه زمان اجرای کد متلب ارائه شده با زمان اجرای برنامه اکلیپس

MATLAB	Eclipse	Eclipse
19.51	28.26	Run time [seconds]

### پانویس‌ها

1. Stability Analysis
2. Up wind
3. Connection factor
4. Five spot
5. perturbation
6. Stability Analysis

### منابع

[1] Karimi-Fard, Mohammad, and Abbas Firoozabadi. "Numerical simulation of water injection in 2D fractured media using discrete-fracture model." SPE annual technical conference and exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2001

[2] Aarnes, Jørg E., Tore Gimse, and Knut-Andreas Lie. "An introduction to the numerics of flow in porous media using Matlab." Geometric modelling, numerical simulation, and optimization. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007. 265306-

[۳] جعفریور مهشید، پیشوایی سیدمحمودرضا، and بزرگمهری بوذرجمهری رامین. "ساخت شبیه‌ساز و مطالعات شبیه‌سازی فرایند ازدیاد برداشت ریزش ثقلی به کمک بخار (SAGD)." ۴۹-۵۹.

[4] Cordazzo, Jonas, Clovis Raimundo Maliska, and A. F. C. Silva. "Inter block transmissibility calculation analysis for petroleum reservoir simulation." Proceedings from the 2nd Meeting on Reservoir Simulation. Vol. 5. No. 6. 2002.

[5] Peaceman, Donald W. "Interpretation of well block pressures in numerical reservoir simulation: Part 3-off-center and multiple wells within a well block." (1994).

[6] Watts, J. W., and Arthur Moncorgé. "Analysis of the Stability of Explicit Reservoir Simulation Calculations." SPE Reservoir Simulation Symposium. Society of Petroleum Engineers, 2013.