

# مدل سازی عددی فرآیند آشام خودبخودی آب در یک بلوک مخزن شکافدار و بررسی اثر شرایط مرزی مختلف بر بازیافت نفت

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران، raziekhosravii123@gmail.com

استادیار، دانشکده مهندسی نفت و گاز، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران، chahardowli@sut.ac.ir

استادیار، دانشکده مهندسی نفت و گاز، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران، simjoo@sut.ac.ir

راضیه خسروی

محمد چهاردولی\*

محمد سیمجو

## چکیده

در این پژوهش، مدل ریاضی مورد اعتماد برای مدل سازی عددی فرآیند آشام خودبخودی هم سو و ناهم سو در حالت یک بعدی و دوبعدی با استفاده از نرم افزار MATLAB ارائه و اعتبارسنجی شده است. سپس مطالعات مختلفی بر روی تاثیر شرایط مرزی بر فرآیند آشام انجام گرفت. نتایج نشان می دهد که میزان تولید نفت پس از بیست روز در آشام هم سو بیش از ۱/۵ برابر آشام ناهم سو بود. همچنین نتایج نشان داد که در بلوک ها با ارتفاع مختلف، بازدهی نفت متفاوت می باشد. بررسی آشام خودبخودی ناهم سو در حالت دوبعدی در یک بلوک ماتریسی بزرگ در ناحیه تحت هجوم آب، بیانگر همکاری نیروی ثقلی در افزایش دو برابری بازیافت نفت پس از ۱۲۰ روز بود. همچنین کاهش سطح تماس آب و بلوک ماتریسی منجر به افت عملکرد فرآیند آشام در تولید نفت شد. به طوری که مقدار بازیافت نفت آشام ناهم سو از ۴۹ درصد (چهار وجه در تماس با آب) به ۳۰ درصد (یک وجه در تماس با آب) در ده روز کاهش پیدا کرد. نتایج نشان می دهد که افزایش مرزهای در تماس با آب باعث افزایش بازده فرآیند آشام خودبخودی می شود. **واژه های کلیدی:** مخازن شکافدار، فشار موینگی، آشام خودبخودی، آشام هم سو و ناهم سو.

## Numerical Modeling of Water Spontaneous Imbibition Process in a Fractured Reservoir Block and Investigating the Impact of Different Boundary Conditions on the Oil Recovery

R. Khosravi

M. Chahardowli

M. Simjoo

Petroleum Reservoir Engineering, Sahand University of Technology, Sahand, Iran

Faculty of Petroleum Engineering, Sahand University of Technology, Sahand, Iran

Faculty of Petroleum Engineering, Sahand University of Technology, Sahand, Iran

## Abstract

In this work, a reliable mathematical model for numerical modeling of co-current and counter-current spontaneous imbibition in 1D and 2D modes is presented using MATLAB software and validated. Then, several studies are conducted on the effect of boundary conditions on the imbibition process. Results show that the oil recovery in co-current imbibition was 1.5 times greater than counter-current imbibition after 20 days. The results also show that in blocks with different heights, oil recovery is different. Investigation of the counter-current spontaneous imbibition in 2D mode in a large matrix block fully immersed in water indicated the effect of the gravity force in doubling the oil recovery after 120 days. Moreover, reducing the matrix block-water contact results in a decrease in the performance of imbibition process in the oil production so that the amount of the counter-current imbibition oil recovery decreased from 49% (four faces in contact with water) to 30% (one face in contact with water) after 10 days. The results show the increase of the water-contacted boundaries improves the spontaneous imbibition process efficiency.

**Keywords:** Fractured Reservoirs, Capillary Force, Spontaneous Imbibition, Co/Counter-Current Imbibition

## ۱-مقدمه

فشار موینگی باعث ورود خودبخودی آب به محیط متخلخل و شروع فرآیند آشام خودبخودی می شود [۳ و ۴]. فرآیند آشام خودبخودی می تواند در بلوک های ماتریسی مخازن شکافدار با توجه به شرایط مرزی حاکم، به صورت هم سو<sup>۲</sup>، ناهم سو<sup>۳</sup> و یا ترکیبی از این دو اتفاق بیافتد [۵]. هنگامی که جهت جریان آب و نفت هم راستا نباشد، جریان آشام ناهم سو برقرار است؛ در این مورد با فرض جریان تراکم ناپذیر، گرادیان سرعت کل سیال برابر با صفر می باشد. این رخداد در سیستم های خطی به دلیل تبادل سیالات از مرز ورودی در حالیکه مرز دیگر بسته باشد، رخ می دهد [۶]. در این حالت، نیروهای موینگی باعث می

مخازن شکافدار سهم قابل توجهی از ذخایر نفت جهان را به خود اختصاص داده اند. تولید از مخازن شکافدار، وابسته به واکنش توده سنگ و شکاف است. یکی از مکانیسم های مهم تولیدی در مخازن شکافدار، آشام خودبخودی<sup>۱</sup> است [۱]. این فرآیند معمولاً در محیط آزمایشگاهی توسط یک بلوک تنها مورد مطالعه قرار گرفته و این امر می تواند فهم فرآیند آشام خودبخودی را تسهیل کند [۲]. آشام فرآیند جابه جایی است که در آن سیال ترکننده، سیال غیرترکننده را جابه جا نموده و خارج می کند. اگر این فرآیند در سنگ آبدوست اتفاق بیافتد

<sup>2</sup> Co-Current

<sup>3</sup> Counter-Current

<sup>1</sup> Spontaneous Imbibition

شوند آب از سیستم شکاف به بلوک ماتریسی مکیده شده و نفت را از طریق شکاف به چاه تولیدی هدایت کند [۷]. هنگامی که جهت حرکت آب و نفت در یک راستاست، آشام همسو اتفاق افتاده و آب از یک وجه وارد شده و نفت عمدتاً از وجهی که با نفت در تماس است، خارج می‌شود. زمانی که بلوک سنگی به‌صورت جزئی در آب غوطه‌ور باشد، فرآیند عمدتاً توسط آشام همسو کنترل می‌شود [۴]. گاهی در فرآیند همسو، با جریان ناهمسو سیال غیرکننده مواجه می‌شویم و جریان ناهمسو را در زمان‌هایی پس از شروع فرآیند خواهیم داشت [۹و۸]. علاوه بر نیروهای موئینگی، نیروهای ثقلی هم می‌تواند در بلوک‌های ماتریسی بزرگ مخازن شکافدار در فرآیند آشام خودبه‌خودی موثر باشند [۱۰]. میزان اهمیت و تاثیرگذاری نیروهای موئینگی و ثقلی توسط عدد بدون بعد باند ارزیابی می‌شود [۱۱]. اگرچه نیروهای موئینه و ثقلی عامل اصلی کنترل‌کننده آشام خودبه‌خودی است، شرایط مرزی نیز خروج نفت به‌وسیله آشام موئینه را کنترل می‌کند [۱۲-۱۴]. در آزمایشگاه شرایط مرزی اعمال شده بر روی سیستم می‌تواند بازیافت نفت از بلوک ماتریسی را تحت تاثیر قرار دهد. به طور کلی در مطالعات آزمایشگاهی بر روی مغزه‌های استوانه‌ای شکل می‌توان شرایط مرزی زیر را در نظر گرفت: ۱- تمامی وجه‌ها برای جابه‌جایی آب-نفت باز باشد<sup>۱</sup> ۲- تنها یک وجه برای جابه‌جایی آب-نفت باز باشد<sup>۲</sup> ۳- دو وجه برای جابه‌جایی آب-نفت باز باشد و کناره‌ها بسته باشد<sup>۳</sup> ۴- دو وجه بسته و کناره‌ها برای جابه‌جایی باز باشد<sup>۴</sup> [۱۵]. بوریو و کلیان (۱۹۹۰) آزمایش‌های آشام همسو و ناهمسو را در یک بلوک ماتریسی ماسه‌سنگی بسیار آب‌دوست انجام داده و نتایج را با مدل عددی هم مقایسه کردند. با توجه به نتایج، بازیافت نهایی نفت در آشام همسو کمی بیشتر از آشام ناهمسو بود. علیرغم اینکه ابعاد بلوک ماتریسی کوچک بود، ایشان اثر نیروی ثقلی در معادله‌های یک‌بعدی را نیز در نظر گرفتند [۳]. پولادی‌درویش و فیروزآبادی (۲۰۰۰) فرآیند آشام خودبه‌خودی را بر روی بلوک‌های ماتریسی آب‌دوست مدل‌سازی کردند. آن‌ها فرض کردند که اگر نمونه اشباع‌شده با نفت به‌طور کامل در آب غوطه‌ور باشد و یا تنها یک وجه برای جابه‌جایی آب-نفت باز باشد، آشام ناهمسو برقرار شده و اگر در بلوک ماتریسی وجهی که از آن نفت تولید می‌شود با نفت در تماس باشد، مکانیسم آشام همسو برقرار است. آن‌ها آشام خودبه‌خودی ناهمسو و همسو در یک‌بعد و دوبعد را مدل‌سازی نمودند؛ با توجه به نتایج کار آن‌ها، آشام همسو دارای زمان تولید نفت کمتر، سرعت بازیافت نفت بیشتر و پیشرفت بیشتر جبهه اشباع آب در زمان یکسان نسبت به آشام ناهمسو است [۴]. مارو و میسون (۲۰۱۳) مطالعات مروری در ارتباط با مکانیسم آشام خودبه‌خودی آب شامل هر دو جریان آشام ناهمسو و همسو انجام دادند. مطالعات آن‌ها شامل در نظر گرفتن رفتار آشام خودبه‌خودی در نمونه‌های آب‌دوست قوی با سطح مقطع متفاوت بود [۱۶]. نورالدین و بلانت (۲۰۱۶) راه حل نیمه تحلیلی برای جابه‌جایی آشام همسو با درجه‌ای از جریان ناهمسو با لزجت دلخواه ارائه کردند. آن‌ها همچنین

یک راه‌حل تخمینی با استفاده از روش آشفتگی که در محدوده وسیعی از شرایط جریان حاکم بود، ارائه کردند [۶]. دنگ و کینگ (۲۰۱۹) آشام خودبخودی آزاد دو سر باز را برای سیستم‌هایی با طول بی‌نهایت و حالت ناپایدار توسعه داده و با مدل عددی اعتبارسنجی کردند. آن‌ها جریان را به‌صورت خالص همسو و ناهمسو فرض کردند که برای تفسیر داده‌های آزمایشگاهی مناسب است [۸].

در مطالعه پیش‌رو، به‌منظور بررسی تاثیر برخی پارامترهای مهم بر فرآیند آشام خودبه‌خودی، مدل‌سازی عددی فرآیند آشام خودبه‌خودی ناهمسو و همسو به‌همراه آنالیز استقلال از مش و آنالیز پایداری با روش فشارضمنی-اشباع صریح انجام شده است. برای اطمینان از صحت مدل آماده شده، از فرضیات و داده‌های اعمال شده در دو مقاله معتبر استفاده گردید. نتایج به‌دست آمده منطبق بر نتایج گزارش شده در هر دو مقاله بود؛ بنابراین اعتبار مدل مورد تایید قرار گرفت. در ادامه مطالعات مختلفی بر روی پدیده آشام انجام گرفته و تاثیر شرایط مختلف بر آشام بررسی شد. تاثیر شرایط مختلف مرزی و نیز حضور نیروهای ثقلی بر بازیافت با روش آشام خودبه‌خودی مورد بررسی قرار گرفت. تلاش شده است که شرایط مرزی در مطالعه حاضر مبتنی بر اعمال شرایط مرزی ای باشد که در بلوک‌های ماتریسی و در مقیاس مخزن اتفاق می‌افتد. به عنوان مثال اگر بلوک ماتریسی توسط شکاف‌های پر از آب، یا توسط شکاف‌های حاوی آب و نفت و یا با مرزهای ناتراوا یا کم تراوا احاطه شده باشد، با اعمال شرط مرزی متناسب می‌توان نتایج مطالعات آزمایشگاهی را بازتولید و بررسی نمود. لازم به ذکر است که نرم افزارهای تجاری به دلیل کد بسته بودن، انعطاف عمل لازم برای اعمال برخی شرایط یا فیزیک‌هایی که در آزمایشگاه دیده می‌شود را ندارد. بنابراین به منظور مطالعه عمیق تر آشام، و مدل‌سازی نتایج آزمایشگاهی، یک کد برنامه عددی بر مبنای روش اختلاف محدود نوشته شد. این برنامه با اندکی تغییرات امکان توصیف بهتر فرایندی ارتقای آشام با کمک مواد نانو، سورفکتانت‌ها و حلال‌ها را دارد

## ۲- مبانی و روش‌ها

### ۲-۱- روش مدل‌سازی عددی

به‌منظور مدل‌سازی فرآیند آشام خودبه‌خودی در محیط متخلخل، معادلات بقای جرم برای سیال‌های آب و نفت به صورت تراکم ناپذیر - نوشته شد. با ترکیب معادلات حاصل شده با روابط دارسی، معادلات دیفرانسیل پاره‌ای که توصیف‌کننده جابه‌جایی آب و نفت در محیط متخلخل می‌باشند به‌دست آمد. متغیرهای وابسته در این مقاله، فشار و اشباع آب می‌باشند.

$$\nabla \cdot (k\lambda_o (\nabla p_o - \gamma_o \nabla Z)) = \frac{\partial}{\partial t} (\phi \frac{S_o}{B_o}) \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (k\lambda_w (\nabla p_w - \gamma_w \nabla Z)) = \frac{\partial}{\partial t} (\phi \frac{S_w}{B_w}) \quad (2)$$

در این معادلات چگالی فازها ثابت در نظر گرفته شده است.  $p_{w/o}$  فشار فاز آب یا نفت،  $\gamma$  گرادیان سیال و  $Z$  ارتفاع نسبت به حالت مبنا است.  $B_{w/o}$  ( $m^3/m^3$ ) ضریب حجمی فازهای آب و نفت می‌باشد.  $S_{w/o}$  اشباع فاز آب / نفت.  $\lambda_L$  نسبت تحرک‌پذیری فاز آب و فاز نفت می‌باشد که به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۱۷و۱۸]:

<sup>1</sup> All Faces Open (AFO)

<sup>2</sup> One End Open (OEO)

<sup>3</sup> Two Ends Open (TEO)

<sup>4</sup> Two Ends Closed (TEC)

نقطه، از شرط پایداری زیر برای محاسبه اندازه گام زمانی در روش فشارضمنی-اشباع صریح، استفاده شد [۱۷]:

$$\Delta t < \frac{1}{2} \Delta x^2 \min_i \left( \frac{\phi_i}{k_i} \right) \frac{1}{\max(P_c)} \min_{i \in S_w} \left( \frac{\mu_o}{k_{ro}} + \frac{\mu_w}{k_{rw}} \right) \quad (11)$$

گام زمانی به دست آمده از معادله (۱۱) برابر با ۱۰ ثانیه می باشد؛ شکل ۱-ب نتایج استقلال از شبکه را برای یک سیستم دوبعدی نشان می دهد. در این شکل نمودار بازیافت نفت بر حسب زمان و برای شبکه های با اندازه مختلف نمایش داده شده است. نتایج نشان می دهد که در شبکه های با ابعاد ۵۰×۵۰ و بزرگتر نتایج حاصله مستقل از تعداد نقاط شبکه می باشد. (نتایج برای ابعاد ۳۰×۳۰ و ۵۰×۵۰ بسیار نزدیک است به همین دلیل در این مطالعه به دلیل زمان اجرای طولانی ناشی از ابعاد ۵۰×۵۰، بعضی از نتایج در حالت دوبعدی با ابعاد ۳۰×۳۰ گرفته شد) با استفاده از رابطه (۱۱) گام زمانی ۵۰ ثانیه و کوچکتر به عنوان شرط پایداری به دست آمده و مورد استفاده قرار گرفته است.

## ۲-۲- روابط مورد نیاز برای حل مسئله

برای محاسبه تراوایی نسبی فازها از مدل کوری استفاده شده است:

$$k_{rL} = k_{rL}^0 (S_{nL})^{n_L}, \quad L = o, w \quad (12)$$

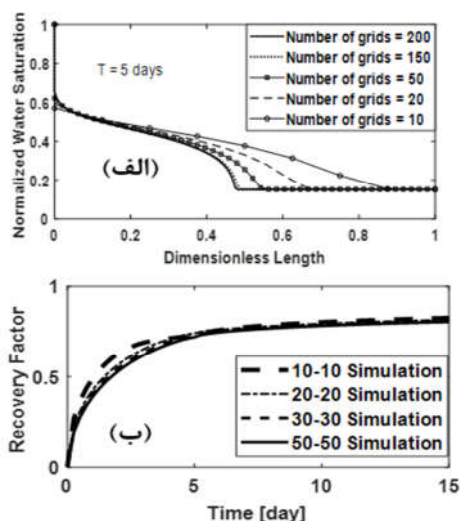
اشباع آب استفاده شده در معادله (۱۲)، اشباع آب نرمال شده است که به صورت زیر تعریف می شود [۲]:

$$S_{nw} = \frac{S_w - S_{wc}}{1 - S_{or} - S_{wc}} \quad (13)$$

در این مقاله اشباع آب نرمال اولیه برابر با (۰/۰۰۱) مطابق با کار پولادی درویش و فیروزآبادی در نظر گرفته شده است. برای محاسبه فشار موینه مربوط به آشام خودبه خودی از رابطه زیر استفاده می شود [۴]:

$$P_{Cov}(S_n) = -B \ln(S_n) \quad (14)$$

در این رابطه، B یک مقدار ثابت است که در جدول ۱ گزارش شده است.



شکل ۱- آنالیز پایداری تعداد نقطه بر توزیع اشباع آشام نهم سو یک- بعدی (a) و بازیافت نفت آشام هم سو دوبعدی (b)

$$\lambda_L = \frac{k_{rL}}{\mu_L B_L} \quad (3)$$

معادله های کمکی (۴) و (۵)، برای تکمیل سیستم معادلات جابه جایی دوفازی آب و نفت استفاده می گردد:

$$S_o + S_w = 1 \quad (4)$$

$$P_{cow} = P_o - P_w \quad (5)$$

در معادله (۵)  $P_{cow}$  (Pa) فشار موینه بین فاز آب و نفت است. برای به دست آوردن توزیع متغیرهای وابسته در زمان های مختلف، معادلات استفاده از روش اختلاف محدود گسسته سازی شدند؛ سپس معادلات حاصل شده باهم ترکیب شده و با فرض اینکه پارامترهای وابسته به اشباع به صورت صریح در نظر گرفته می شود، معادله فشار به صورت ضمنی حل گردید؛ سپس از داده های محاسبه شده فشار استفاده شده و اشباع به صورت صریح محاسبه شد. خاصیت عبورپذیری فاز آب یا نفت که در دو جهت  $x$  و  $y$  محاسبه می شود، از دو بخش دینامیک و استاتیک تشکیل یافته است؛ خاصیت دینامیک تابع اشباع و فشار است و خاصیت استاتیک، تابع خواص سنگ (اندازه بلوک و تراوایی بلوک های همسایه) می باشد (رابطه ۶). تراوایی مطلق یک خاصیت استاتیک است و به صورت سری مطابق معادله (۷) متوسط گیری می شود.

$$T_{Lxi+1/2,j} = \frac{2}{Ax_i (\Delta x_{i+1} + \Delta x_i)} \left( \frac{kkr}{\mu B} \right)_{i+1/2,j} = \quad (6)$$

$$\frac{2}{Ax_i (\Delta x_{i+1} + \Delta x_i)} k_{xi+1/2,j} \lambda_{i+1/2,j} \quad (7)$$

به منظور محاسبه بخش دینامیک تحرک پذیری در هر فاز و در جهت های مختلف، از روش بالادستی استفاده می کنیم [۱۹].

$$\lambda_{Lxi+1/2,j} = \begin{cases} \lambda_{Lxi+1,j} & P_{Lxi+1,j} \geq P_{Lxi,j} \\ \lambda_{Lxi,j} & P_{Lxi+1,j} < P_{Lxi,j} \end{cases}, \quad (8)$$

$$\lambda_{Lxi+1/2,j} = \begin{cases} \lambda_{Lxi+1,j} & P_{Lxi+1,j} \geq P_{Lxi,j} \\ \lambda_{Lxi,j} & P_{Lxi+1,j} < P_{Lxi,j} \end{cases}$$

برای فاز آب و نفت گسسته سازی سمت چپ معادله های (۱) و (۲) در جهت  $x$  و  $y$ ، به صورت زیر است [۱۹]:

$$\left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{k_x k_{rL}}{\mu_L B_L} \left( \frac{\partial P}{\partial x} - \gamma_L \frac{\partial Z}{\partial x} \right) \right) \right]_{i,j} = \quad (9)$$

$$T_{Lxi+1/2,j} ((P_{Lxi+1,j} - P_{Lxi,j}) - \gamma_{Lxi+1/2,j} (Z_{Lxi+1,j} - Z_{Lxi,j})) - T_{Lxi+1/2,j} ((P_{Lxi,j} - P_{Lxi-1,j}) - \gamma_{Lxi+1/2,j} (Z_{Lxi,j} - Z_{Lxi-1,j}))$$

$$\left[ \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{k_y k_{rL}}{\mu_L B_L} \left( \frac{\partial P}{\partial y} - \gamma_L \frac{\partial Z}{\partial y} \right) \right) \right]_{i,j} = \quad (10)$$

$$T_{Lxi+1/2,j} ((P_{Lxi+1,j} - P_{Lxi,j}) - \gamma_{Lxi+1/2,j} (Z_{Lxi+1,j} - Z_{Lxi,j})) - T_{Lxi+1/2,j} ((P_{Lxi,j} - P_{Lxi-1,j}) - \gamma_{Lxi+1/2,j} (Z_{Lxi,j} - Z_{Lxi-1,j}))$$

به منظور بررسی استقلال نتایج از اندازه شبکه، شبکه های با ابعاد مختلف در نظر گرفته شده و نتایج شبیه سازی با هم مقایسه شد. شکل ۱-الف مقایسه بین توزیع اشباع بر حسب طول بدون بعد در زمان ۵ روز از شروع فرآیند را برای شبکه با ابعاد مختلف نشان می دهد. مطابق نتایج به دست آمده شبکه با تعداد ۱۵۰ نقطه و بالاتر، نتایج مشابهی را ارائه کرده است. علاوه بر این، با در نظر گرفتن شبکه های با ابعاد ۱۵۰

جدول ۱- خصوصیات نمونه، سیال و مقادیر عددی برای رسم منحنی تراوایی نسبی و فشار موینه 4,3

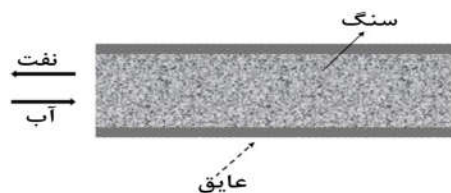
| پارامتر                        | مقدار                    | پارامتر                        | مقدار |
|--------------------------------|--------------------------|--------------------------------|-------|
| طول سیستم (m)                  | ۰/۲۰                     | چگالی آب (kg/m <sup>3</sup> )  | ۱۰۰۰  |
| تراوایی مطلق (m <sup>2</sup> ) | ۱/۹۷ × ۱۰ <sup>-۱۴</sup> | چگالی نفت (kg/m <sup>3</sup> ) | ۷۰۰   |
| لزجت آب (Pa.s)                 | ۰/۰۰۱                    | n <sub>w</sub>                 | ۴     |
| لزجت نفت (Pa.s)                | ۰/۰۰۱                    | n <sub>o</sub>                 | ۴     |
| تخلخل                          | ۰/۳                      | k <sub>rw</sub> <sup>0</sup>   | ۰/۲   |
| (Pa) B                         | ۱۰۰۰۰                    | k <sub>ro</sub> <sup>0</sup>   | ۰/۷۵  |

در ادامه، هندسه مدل یک بعدی و دو بعدی مورد استفاده در این مطالعه، به همراه شرایط اولیه و مرزی برای فرایندهای آشام خودبه خودی هم سو و ناهم سو توصیف می شود.

### ۳-۲- توصیف هندسه مدل یک بعدی و شرایط اولیه و مرزی

شکل ۲ تصویر مقطع یک مغزه استوانه ای افقی (مقارن) را نشان می دهد که به دلیل اینکه طول به اندازه کافی از قطر بزرگ تر است، فرض شده است که جابه جایی به صورت یک بعدی برقرار است. فرض شده است که این مغزه آب دوست است. یک انتهای مغزه (مرز سمت چپ) برای ورود آب و خروج نفت باز بوده و بقیه مرزها عایق می باشند؛ بنابراین فیزیک حاکم بر این جابه جایی، آشام خودبه خودی ناهم سو یک بعدی است. برای این مغزه شرایط اولیه و مرزی به شرح زیر توصیف می شود:

متغیر اشباع آب: در شرایط اولیه در کل قلمرو، اشباع برابر با اشباع آب کاهش نیافتنی می باشد؛ بنابراین فشار موینه اولیه در کل قلمرو یکسان و برابر با بیشینه مقدار فشار موینه است. در مرز باز، اشباع آب برابر با بیشینه مقدار آن (1-S<sub>or</sub>) در نظر گرفته شده است که در این اشباع، فشار موینی صفر می باشد. مرز سمت راست به عنوان مرز بدون جریان در نظر گرفته شده که در آن گرادیان اشباع نسبت به فاصله صفر است.



شکل ۲- شرایط مرزی برای آشام ناهم سو یک بعدی [۲۰]

متغیر فشار آب: در شرایط اولیه فشار نفت در کل قلمرو صفر در نظر گرفته شده، بنابراین فشار اولیه آب در کل قلمرو منفی و برابر با فشار موینه با علامت منفی می باشد. در مرز باز فشار آب برابر با صفر در نظر گرفته می شود؛ بنابراین به دلیل اختلاف فشار بین مرز و نقاط داخل قلمرو، آب به داخل آشام شده و نفت از مرز باز و در خلاف جهت حرکت آب خارج می شود. وقتی فاز ترکنده وارد بلوک ماتریسی می -

شود، فشار هر دو فاز داخل بلوک ماتریسی افزایش می یابد. در مرز بسته هم گرادیان فشار برابر با صفر در نظر گرفته شده است. شرایط اولیه و مرزی به صورت زیر خلاصه شده است [۴]:

$$S_w = S_{wi}, t = 0, 0 \leq x \leq L \quad (15)$$

$$P_w = -P_{C(S_{wi})}, t = 0, 0 \leq x \leq L \quad (16)$$

$$S_w = 1 - S_{or}, t = 0^+, x = 0 \quad (17)$$

$$P_w = 0, t = 0^+, x = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial S_w}{\partial x} = 0, t = 0^+, x = L \quad (19)$$

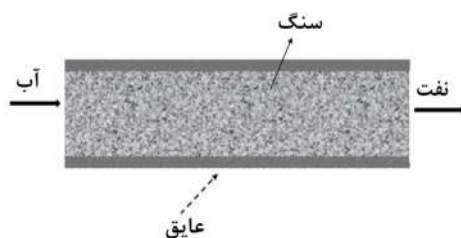
$$\frac{\partial P_w}{\partial x} = 0, t = 0^+, x = L \quad (20)$$

شکل ۳ یک مغزه را نشان می دهد که هردو مرز آن برای جابجایی آب-نفت باز در نظر گرفته شده است. مغزه از مرز سمت چپ با آب و از مرز سمت راست با نفت در تماس می باشد؛ در این شرایط بخش زیادی از نفت از مرزی که با نفت در تماس است تولید می شود.

متغیر اشباع آب: اشباع اولیه آب و شرط مرزی در سمت چپ به ترتیب مشابه حالت قبل (روابط ۱۵ و ۱۷) می باشد. متغیر فشار آب: شرط اولیه و شرط مرزی در مرز باز سمت چپ به ترتیب مشابه حالت آشام ناهم سو (روابط ۱۶ و ۱۸) در نظر گرفته می شود. شرایط مرزی در مرز باز سمت راست متفاوت با حالت آشام خودبه خودی ناهم سو و به صورت زیر خلاصه می شود [۴]:

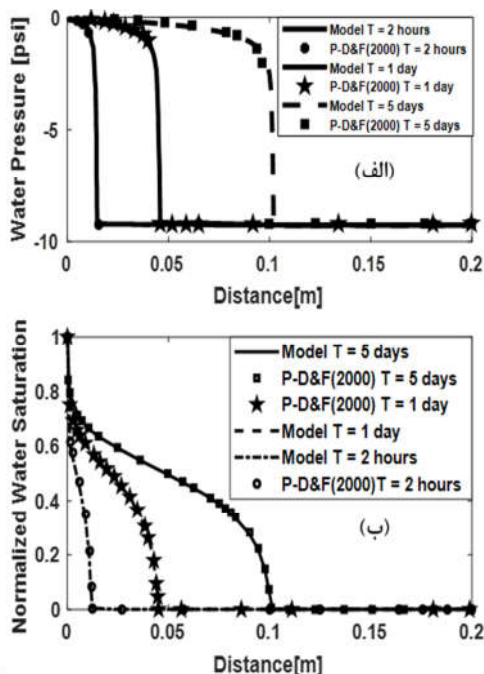
$$P_w = -P_{C(S_{wi})}, t = 0^+, x = L \quad (21)$$

$$S_w = S_{wi}, t = 0^+, x = L \quad (22)$$



شکل ۳- شرایط مرزی برای آشام هم سو یک بعدی [۲۰]

۴-۲- توصیف هندسه مدل دوبعدی و شرایط اولیه و مرزی  
برای بررسی آشام یک بلوک مکعب مقارن در نظر گرفته شد که با شکافها احاطه شده است. به منظور تسهیل فرآیند محاسبات و بدون کاستن دقت نتایج می توان سیستم را به صورت مقارن دانست؛ بدین ترتیب می توان هندسه سیستم را به صورت یک مستطیل یا مربع افقی و یا عمودی در نظر گرفت. در بیشتر مطالعات انجام گرفته در این مقاله، سیستم دوبعدی به صورت افقی در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی آشام ناهم سو در حالت دوبعدی، توسط یک سیستم مربعی شکل (افقی) که دو مرز بالا و سمت چپ باز و دو مرز دیگر بسته می باشد، توصیف می شود. مشابه فرآیند آشام خودبه خودی ناهم سو یک بعدی، شرایط اولیه و مرزی در مرزهای باز و بسته با روابط (۲۰ تا ۲۵) توصیف می - شود. در آشام هم سو دوبعدی، مرزهای بالا و چپ در تماس با آب و مرزهای پایین و راست در تماس با نفت قرار می گیرد [۴]. شرایط مرزی مربوط به فشار و اشباع آب، همانند روش یک بعدی (روابط ۱۵ تا ۱۸ و ۲۱ و ۲۲) است.

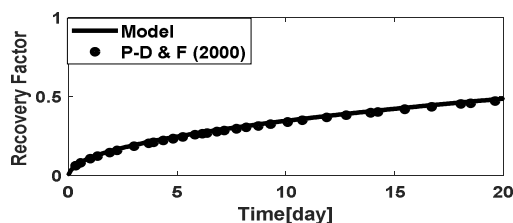


شکل

۴- اعتبارسنجی نمودار فشار آب (الف) و اشباع آب (ب) با کار پولادی درویش در آشام ناهم سو یک بعدی برای پنج روز [۴]

اعتبارسنجی توزیع فشار آب (شکل ۶-الف) و توزیع اشباع آب (شکل ۶-ب) در آشام هم سو یک بعدی با کار پولادی درویش و فیروزآبادی (مرجع ۴) صورت گرفته است. نمودار توزیع اشباع آب پس از ۴۰ روز در آشام خودبه خودی هم سو، بیانگر این است که پس از میان روی آب در بلوک- ماتریسی، وجه سمت راست نیز در تماس با آب قرار گرفته و شرایط آشام خودبه خودی ناهم سو برقرار می گردد. به عبارتی، جریان ناهم سو را در زمان هایی پس از شروع فرآیند آشام هم سو خواهیم داشت. همچنین شکل ۷ نیز بیانگر تطابق کامل بین نتایج حاصل از مدل سازی و نتایج گزارش شده توسط مرجع ۴ است.

همچنانکه اشاره شد، شبیه سازی ارائه شده توسط مرجع ۴ بدون در نظر گرفتن نیروهای ثقلی انجام شده است. برای بررسی اعتبار مدل در حضور نیروهای ثقلی، نتایج مدل ارائه شده در این مقاله با نتایج گزارش شده برای فرآیند آشام خودبه خودی ناهم سو یک بعدی ارائه شده توسط مرجع ۳ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج در شکل ۸ نشان داده شده است که نشان می دهد نتایج با هم مطابقت کامل داشته و بنابراین مدل ارائه شده در این مقاله، برای بررسی فرآیند آشام در حضور نیروهای ثقلی هم مناسب است.



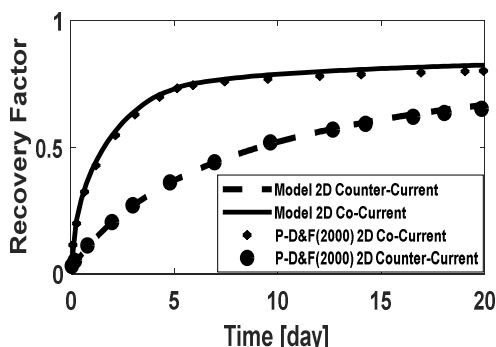
شکل ۵- اعتبارسنجی نمودار بازیافت نفت با کار پولادی درویش برای آشام ناهم سو تا ۲۰ روز [۴]

### ۳- نتایج

در این بخش، فرآیند آشام خودبه خودی ناهم سو و هم سو در یک بلوک ماتریسی به صورت تفصیلی در یک بعد و دوبعد مورد مطالعه مدل سازی قرار گرفته و نتایج گزارش شده است. برای اعتبارسنجی مدلی که در این مقاله ارائه شده است، از داده های ورودی توصیف شده در مرجع شماره (۴) استفاده شد. با توجه به اینکه در این مرجع از نیروهای ثقلی صرف نظر شده است، برای اعتبارسنجی مدل در حضور این نیروها، مدل سازی با استفاده از داده های ورودی مرجع شماره (۳) صورت گرفته و اعتبار مدل مورد بررسی قرار گرفت. مطالعات حالت دوبعدی شامل بررسی اثر آشام خودبه خودی در رژیم های مختلف جریان که فشار مویینه و یا نیروی ثقلی غلبه دارد و تاثیر شرایط مرزی متفاوت بر بازیافت نفت است؛ به طوریکه بلوک ماتریسی توسط شکاف های پر از آب، شکاف های حاوی آب و نفت و یا مرزهای بدون جریان احاطه شده که امکان بازتولید نتایج در مقیاس آزمایشگاهی را فراهم می نماید.

#### ۳-۱- اعتبارسنجی نتایج آشام خودبه خودی یک بعدی

شکل ۴ نمودار توزیع فشار آب (۴-الف) و نمودار توزیع اشباع آب (۴-ب) را در طول فرآیند آشام خودبه خودی ناهم سو یک بعدی نشان می دهد. خط ها نشان دهنده نتایج این مقاله و نقاط نشان دهنده نتایج مقاله پولادی درویش و فیروزآبادی (۲۰۰۰) می باشد که همخوانی بسیار خوبی را نشان می دهد. طبق شرایط اولیه در نظر گرفته شده، فشار آب در داخل نمونه منفی است؛ با گذر زمان به دلیل آنکه در مرز باز فشار آب برابر با صفر است، فشار در درون سیستم هم افزایش پیدا می کند؛ فرآیند تا جایی ادامه پیدا می کند که فشار آب به صفر و اشباع آب در همه جا به  $S_{or} = 1$  برسد. از آنجا که توزیع اشباع آب در طول زمان تعیین کننده بازیافت نفت است، مطابقت بین توزیع اشباع در زمان های مختلف منجر به تطابق کامل نمودار بازیافت نفت می شود که در شکل ۵ نشان داده شده است.

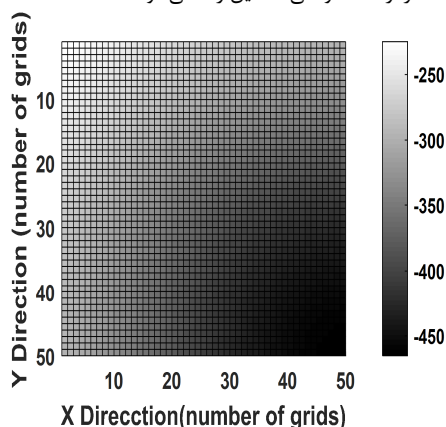


شکل ۹- اعتبارسنجی بازیافت نفت مدل آشام ناهم سو و هم سو دو- بعدی به دست آمده با کار پولادی درویش بعد از ۲۰ روز [۴]

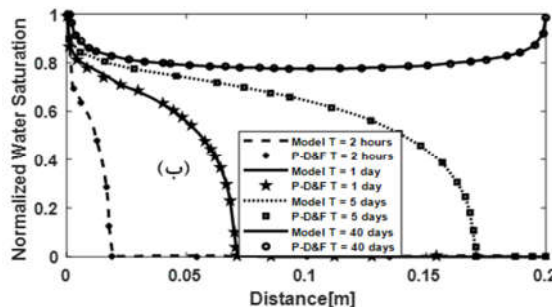
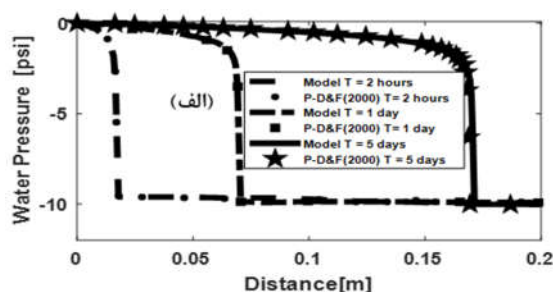
### ۳-۳- بررسی فرآیند آشام خودبه خودی در دوبعد

در این بخش ابتدا توزیع فشار و اشباع آب در جریان ناهم سو و هم سو در مربعی به ابعاد بیست در بیست سانتی متر مطابق با شرایط ارائه شده در مرجع ۴ (داده های ورودی جدول ۱) ارائه می شود، سپس اثر نیروی ثقلی و شرایط مرزی مختلف بر آشام ناهم سو دوبعدی بررسی می گردد.

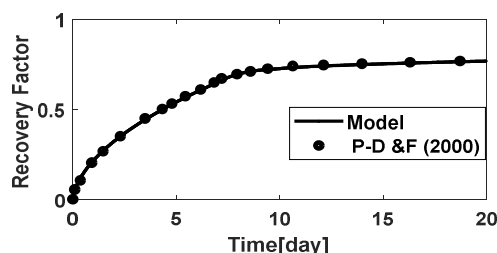
شکل ۱۰ نمودار توزیع فشار آب پس از ۳۰ روز از شروع آشام خودبه خودی ناهم سو را نشان می دهد. به دلیل وارد شدن آب از وجه های در تماس با آب و خروج نفت به صورت ناهم سو، نواحی که در تماس با آب است دارای فشار آب بیشتری نسبت به نواحی نزدیک به مرز عایق است. شکل ۱۱ نشان دهنده تغییرات توزیع اشباع آب در آشام هم سو می باشد. دو نمودار بالایی زمان های قبل از میان شکنی آب در بلوک ماتریسی را نشان می دهد که تولید نفت از طریق آشام هم سو صورت می گیرد. پس از میان شکنی، هر چهار وجه در تماس با آب قرار گرفته و آشام به صورت ناهم سو برقرار می باشد (دو نمودار پایینی). به طور کلی سرعت بازیافت نفت با آشام هم سو بیشتر از سرعت بازیافت نفت با آشام ناهم سو است. بنابراین باید دقت شود که در محاسبات، شرط مرزی مناسب اعمال شود چرا که با فرض جریان ناهم سو به جای هم سو، بازیافتی کمتر از حالت واقعی تخمین زده می شود.



شکل ۱۰- نمودار توزیع فشار آب پس از ۳۰ روز از شروع آشام خودبه خودی ناهم سو در یک هندسه دوبعدی



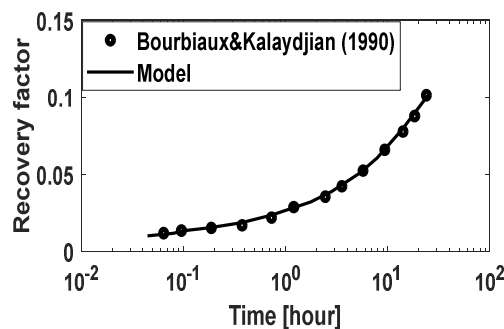
شکل ۶- اعتبارسنجی نمودار فشار آب (الف) و اشباع آب (ب) با کار پولادی درویش در آشام خودبه خودی هم سو یک بعدی [۴]



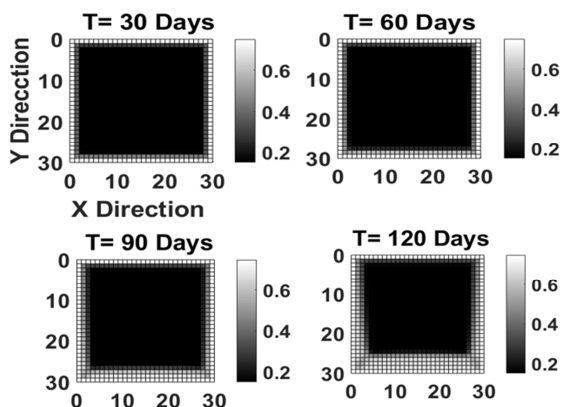
شکل ۷- اعتبارسنجی بازیافت نفت مدل به دست آمده برای آشام هم سو یک بعدی با کار پولادی درویش برای ۲۰ روز [۳]

### ۳-۲- اعتبارسنجی آشام خودبه خودی دوبعدی

نمودار بازیافت نفت بر حسب زمان حاصل از مدل ارائه شده در این مقاله، با نتایج ارائه شده توسط پولادی درویش و فیروزآبادی برای دو حالت آشام خودبه خودی هم سو و ناهم سو دوبعدی مقایسه و انطباق بسیار خوبی بین نتایج دیده می شود که در شکل ۹ نشان داده شده است.

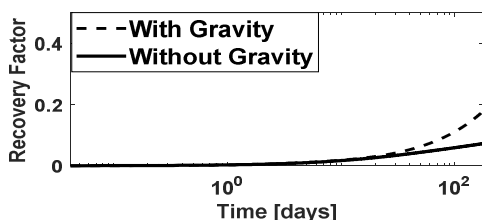


شکل ۸- اعتبارسنجی نمودار بازیافت نفت مدل در حضور نیروی ثقلی و مقاله بوربویو و کلیان بعد از ۳۰ ساعت در مختصات نیمه لگاریتمی [۳]



شکل ۱۲- نمودار توزیع اشباع آب در آشام خودبه‌خودی ناهم‌سو با شرایط مرزی تمام وجه باز (نیروی ثقلی غالب)

شکل ۱۳ باز یافت نفت در اثر مکانیسم آشام خودبه‌خودی ناهم‌سو را برای بلوک عمودی بزرگ با ابعاد (۲۵×۲۵) متر با بلوک عمودی کوچک با ابعاد با ابعاد (۲۰×۲۰) سانتی‌متر در طول ۱۲۰ روز مقایسه می‌کند. با توجه به شکل، پس از ۱۲۰ روز باز یافت نفت در بلوک کوچک ۸ درصد نفت در جای اولیه بلوک کوچک، و باز یافت نفت در بلوک بزرگ ۱۸ درصد نفت در جای اولیه بلوک بزرگ بوده که نشان دهنده افزایش ۱۱ درصدی باز یافت می‌باشد. با توجه به ابعاد متفاوت بلوک‌ها حجم زیادی از نفت توسط نیروی ثقلی تولید می‌شود. علاوه بر این، نمودارهای شکل ۱۳ پس از حدود ۵۰ روز از هم جدا می‌شوند.

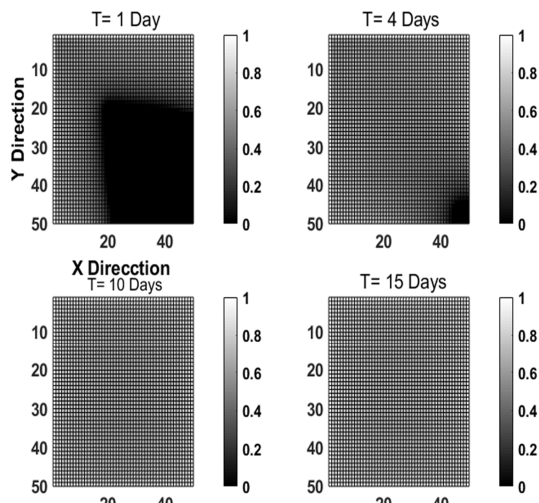


شکل ۱۳- مقایسه باز یافت نفت در یک سیستم دو بعدی در حضور نیروی ثقلی و در غیاب نیروی ثقلی پس از ۱۲۰ روز

از آنجا که عکس العمل نیروی موینگی خیلی سریع می‌باشد، عمده فرآیند تولید تا این زمان ناشی از عکس العمل نیروی موینگی می‌باشد. با این حال، نیروی ثقلی کندتر عمل کرده و بنابراین تاثیر عملکرد این نیرو پس از ۵۰ روز مشخص می‌شود که در آن، نمودار باز یافت نفت از بلوک بزرگ از باز یافت نفت در بلوک کوچک سبقت می‌گیرد. می‌توان نتیجه گرفت که در مخازن شکافدار با بلوک‌های نسبتاً بزرگ، حضور نیروهای ثقلی باعث تقویت آشام شده و باعث باز یافت سریع‌تر و بیشتر نفت در ناحیه تحت هجوم آب می‌شود.

### ۳-۳-۲- بررسی تاثیر شرایط مرزی مختلف بر آشام خودبه‌خودی ناهم‌سو

در فرآیند آشام خودبه‌خودی در مخازن نفتی، شرایط مرزی تاثیر بسیار مهمی بر باز یافت نفت داشته و نوع شرط مرزی باعث رخدادن این

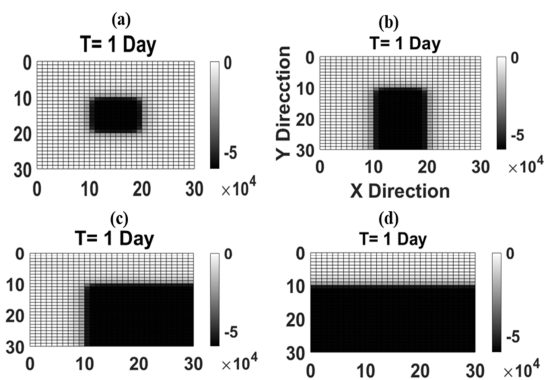


شکل ۱۱- تغییرات توزیع اشباع آب برای آشام خودبه‌خودی هم‌سو دوبعدی

### ۳-۳-۱- بررسی تاثیر نیروی ثقلی بر باز یافت نفت در آشام خودبه‌خودی ناهم‌سو

در مخازن شکافدار که شبکه شکاف ارتباط مناسبی دارد، به دلیل افت فشار لزج ناچیز در شکاف، از نیروی لزج می‌توان صرف نظر کرد. در حالتی که بلوک ماتریسی به‌صورت کامل در آب غوطه‌ور باشد (ناحیه تحت هجوم آب)، نیروی موینگی و ثقلی هر دو می‌توانند در جابه‌جایی نفت نقش داشته باشند. میزان اهمیت و تاثیرگذاری نیروهای موینگی یا ثقلی توسط عدد بدون بعد باند ارزیابی می‌شود. در مقادیر پایین عکس عدد باند (مقادیر کمتر از یک)، نیروی ثقلی بر نیروی موینگی غلبه کرده و فرآیند آشام خودبه‌خودی ناهم‌سو توسط نیروی ثقلی کنترل می‌شود [۱۱]. برای مطالعه تاثیر نیروی ثقلی بر آشام خودبه‌خودی دوبعدی، یک بلوک عمودی با ابعاد (۲۵×۲۵) متر در نظر گرفته شده که در طول ۱۲۰ روز از هر چهار طرف در تماس با آب قرار گرفته است. همین مطالعه برای یک بلوک عمودی با ابعاد (۲۰×۲۰) سانتی‌متر در نظر گرفته شد و نتایج باهم مقایسه گردید. در این حالت که ابعاد بلوک ماتریسی بزرگ در نظر گرفته شده است، مقدار عکس عدد باند ۰/۸۵ است که نشان‌دهنده این است که در جهت Z نیروی ثقلی بر نیروی موینگی غلبه دارد.

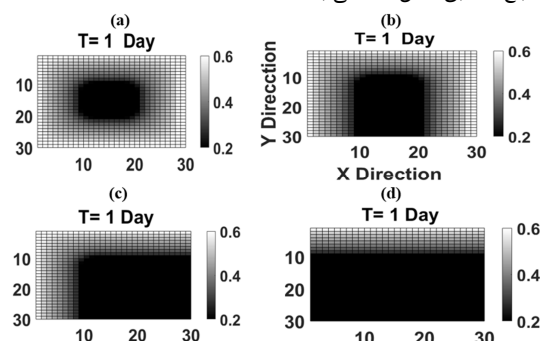
نمودار توزیع اشباع آب در مربع عمودی با ابعاد (۲۵×۲۵) متر در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل، اشباع آب در وجه پایینی نسبت به طرفین سریع‌تر افزایش یافته ولی از وجه بالا کندتر از سایر وجه‌ها خارج می‌شود. این امر نشان دهنده تاثیر مثبت نیروی ثقلی در کنار نیروی موینگی در سیستم می‌باشد. لازم به ذکر است که در مقیاس بزرگ مخزنی، اندازه بلوک‌ها می‌تواند به اندازه کافی بزرگ باشد که نیروهای ثقلی نقش مهمی در جابه‌جایی داشته باشد.



شکل ۱۵- نمودار توزیع فشار آب (pa) در آشام خودبه‌خودی ناهم‌سو با شرایط مرزی مختلف چهار وجه در تماس با آب (a)، سه وجه در تماس با آب (b)، دو وجه در تماس با آب (c) و یک وجه در تماس با آب (d) بعد از یک روز

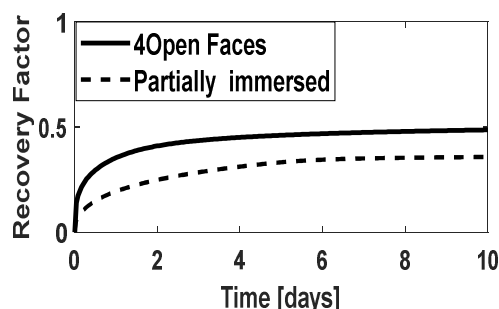
لازم به ذکر است که فشار نفت در سیستم ثابت در نظر گرفته شده و تغییر نمی‌کند. دلیل مشابهت روند تغییرات فشار و اشباع به این صورت توضیح داده می‌شود که آشام خودبه‌خودی فرآیندی است که توسط نیروهای موئینه کنترل می‌شود. فشار موئینه از یک طرف تابع اشباع بوده و از طرف دیگر بیانگر اختلاف فشار بین دو فاز آب و نفت است. بنابراین تغییرات توزیع در دو پارامتر یک روند مشابه را طی می‌کند. در شکل ۱۶ باز یافت نفت فرآیند آشام خودبه‌خودی ناهم‌سو در شرایط مرزی متفاوت نشان داده شده است. همچنانکه در ابتدای این بخش توضیح داده شد، در شرایطی که تمام مرزها به آشام خودبه‌خودی باز باشد، باز یافت نفت سریع‌تر تکمیل شده و نفت قابل باز یافت سریع‌تر تولید می‌شود. پس از ۱۰ روز از آغاز فرآیند، نفت باز یافت شده در حالتی که تمام مرزها باز است، برابر با ۴۹ درصد است؛ در حالتی که سه مرز به جریان باز است، در روزهای ابتدایی سرعت باز یافت کمتر از حالت قبل بوده اما در نهایت پس از ۱۰ روز به مقدار ۴۹ درصد میل می‌کند. برای حالت‌هایی که دو مرز و یک مرز باز است، باز یافت نفت پس از ۱۰ روز به ترتیب ۴۱ درصد و ۳۰ درصد بوده و سرعت باز یافت نفت نیز با کاهش مرزهای جریانی (باز) کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در یک سنگ آب‌دوست با کاهش تعداد مرزهای در تماس با آب مقدار باز یافت نفت و سرعت آن کاهش می‌یابد. این نکته حائز اهمیت است که بازده نهایی در زمان بی نهایت (در یک زمان به اندازه کافی طولانی) مستقل از شرایط مرزی می‌باشد، به عبارتی دیگر، باز یافت نهایی در یک زمان طولانی برای تمامی شرایط مرزی یکسان می‌باشد. با این حال به دلیل اهمیت زمان در بعد اقتصادی تولید نفت از مخازن، لازم است مطالعات مناسب برای باز یافت سریع‌تر و بیشتر نفت تحت شرایط مرزی حاکم بر مخزن انجام گیرد.

فرآیند به صورت فرایند آشام ناهم‌سو و یا هم‌سو می‌شود. در آشام نرخ تولید نفت وابسته به هندسه ماتریس ها، توزیع شکاف ها و البته شرایط مرزی حاکم بر سیستم است. بلوک‌ها بر اساس محل قرار گرفتن در نواحی مختلف یک مخزن نفتی شکاف دار شرایط مرزی متفاوتی دارند علاوه بر این اثر ناهمگنی و محاط بودن آن با شکاف باعث ایجاد یک مخزن با دو سیستم کم تراوا یا پرتراوا ایجاد می‌کنند. علاوه بر این به دلیل اینکه لیتولوژی سنگ یکنواخت نیست در برخی نواحی مخزن ماتریس ممکن است از سنگ ناتراوا یا کم تراوا (مانند شیل) تشکیل یافته باشد که باعث ایجاد مرز بدون جریان می شود، که می تواند در مدلسازی مورد بررسی قرار گیرد. لازم به ذکر است در بخشی از مرز بلوک هایی که به صورت جزئی توسط آب احاطه شده اند شرط مرزی دیریکله و در بخشی دیگر شرط مرزی نیومن حاکم است. [۱۲]. میزان باز یافت نفت با افزایش تعداد وجه‌های موجود برای آشام در یک زمان مشخص، افزایش می‌یابد [۱۴]. برای بررسی تاثیر شرایط مرزی متفاوت بر آشام خودبه‌خودی ناهم‌سو، یک بلوک مربعی شکل افقی به ابعاد (۲۰×۲۰) سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در این بخش از مطالعه، نیروهای ثقلی نادیده گرفته شده و نتایج آشام خودبه‌خودی ناهم‌سو در حضور شرایط مرزی متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. در همین راستا، مرزهای یک بلوک ماتریسی در حالت‌های مختلف جریانی در نظر گرفته شد. چهار شرط مرزی رایج برای مغزه‌ها در آزمایش‌های آشام بررسی شد؛ ابتدا فرض شد که بلوک توسط شکاف‌های پر از آب احاطه شده، سپس به ترتیب یک وجه، دو وجه و نهایتاً سه وجه به‌صورت مرز غیرجریانی (بسته) در نظر گرفته شده و باز یافت نفت در حالت‌های مختلف، مقایسه شد. شکل ۱۴ تغییرات اشباع آب را پس از یک روز از آغاز فرآیند آشام نشان می‌دهد. همچنانکه در شکل دیده می‌شود، با کاهش سطح تماس بلوک با آب، فرآیند تخلیه نفت در اثر آشام خودبه‌خودی کندتر رخ داده و سرعت باز یافت نفت کاهش می‌یابد. فرآیند آشام خودبه‌خودی ماهیت انتشاری داشته و توسط ضریب نفوذ موئینیگی کنترل می‌شود؛ بنابراین افزایش مرزهای در تماس با آب منجر به افزایش نفوذ آب به بلوک و افزایش میزان و سرعت باز یافت نفت می‌شود. شکل ۱۵ نشان‌دهنده تغییرات فشار آب در شرایط مرزی متفاوت می‌باشد؛ روند تغییرات توزیع فشار مشابه روند تغییرات توزیع اشباع (مطابق شکل ۱۴) می باشد.



شکل ۱۶- نمودار توزیع اشباع آب در آشام خودبه‌خودی ناهم‌سو با شرایط مرزی مختلف چهار وجه در تماس با آب (a)، سه وجه در تماس با آب (b)، دو وجه در تماس با آب (c) و یک وجه در تماس با آب (d) بعد از یک روز





شکل ۱۸- بازیافت نفت زمانی که بلوک ماتریسی کامل و جزئی در آب غوطه‌ور باشد بعد از ۱۰ روز

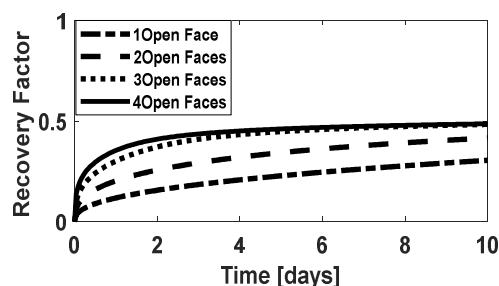
مطابق با نتیجه‌ای که در بخش قبلی گرفته شد، هرچه سطح تماس آب و نفت بیشتر باشد، سرعت بازیافت نفت و مقدار آن در زمان‌های کوتاه بیشتر می‌شود؛ به عبارتی مساحت وجه در تماس با آب تأثیر بسیار بیشتری در افزایش نرخ تولید نفت نسبت به وجه در تماس با نفت دارد. با توجه به شکل ۱۸، میزان بازیافت نفت پس از ده روز برای بلوک کاملاً غوطه‌ور (ناحیه تحت هجوم آب) و بلوکی که به صورت جزئی غوطه‌ور شده (مرز بین ناحیه نفتی و تحت هجوم آب)، به ترتیب ۴۹ و ۳۶ درصد می‌باشد. به نظر می‌رسد که بهترین نوع بازیافت نفت از یک بلوک تنها در مخازن شکافدار هنگامی اتفاق می‌افتد که بلوک ماتریسی کاملاً توسط آب محاط شود؛ در این صورت بیشترین میزان بازفت در زمان کوتاه‌تری اتفاق می‌افتد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

این مقاله نتایج مدلسازی عددی دوبعدی فرآیند آشام خودبه‌خودی آب در یک بلوک ماتریسی منفرد که با شکاف احاطه شده است را در دو حالت آشام ناهم‌سو و هم‌سو ارائه کرده است. مدل عددی از طریق بازتولید نتایج ارائه شده در مطالعات قبلی اعتبارسنجی شد. با استفاده از این مدل می‌توان فرآیندهای جابجایی آب-نفت توسط آشام خودبه‌خودی در یک بلوک ماتریسی از یک مخزن شکافدار را در شرایط مرزی بحث شده مورد مطالعه قرار داد و نتیجه آزمایش‌های مختلف را با این مدل تفسیر کرد. اگرچه جریان سیالات در مغزه به صورت سه بعدی می‌باشد اما با توجه به آنکه معمولاً مغزه‌ها همگن و متقارن در نظر گرفته می‌شود، می‌توان آن را در دو بعد نیز بررسی نمود. در این مطالعه اثر شرایط مرزی حاکم بر فرآیند آشام ناهم‌سو و هم‌سو به‌طور تفصیلی بررسی شده است. نتایج به‌دست آمده به شرح زیر است:

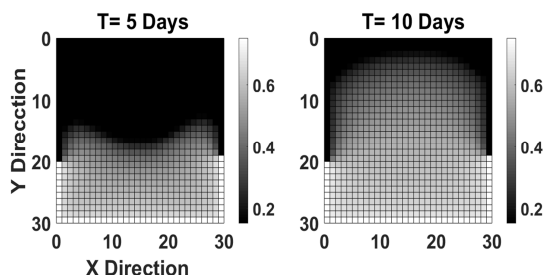
۱- آشام هم‌سو یک‌بعدی به دلیل دارا بودن دو وجه باز برای جابه‌جایی آب و نفت نسبت به آشام ناهم‌سو که تنها دارای یک وجه باز است، دارای پیشرفت جبهه اشباع آب، سرعت بازیافت نفت و همچنین میزان بازیافت نهایی نفت بیشتری (۷۷ درصد) نسبت به آشام ناهم‌سو (۴۹ درصد) پس از ۲۰ روز بود. در حالت دوبعدی مقادیر بازیافت نفت در آشام ناهم‌سو و هم‌سو به ترتیب ۶۷ و ۸۲ درصد بود. علت بالاتر بودن مقادیر بازیافت نفت در حالت دوبعدی را می‌توان به تماس بیشتر بلوک ماتریسی با آب نسبت به حالت یک‌بعدی نسبت داد.

۲- در بلوک‌ها با ابعاد مختلف، بازدهی نفت متفاوتی طی فرآیند آشام ناهم‌سو حاصل می‌شود. در حالت دوبعدی مشاهدات در این کار نشان



شکل ۱۶- تأثیر شرایط مرزی مختلف بر بازیافت نفت آشام خودبه‌خودی ناهم‌سو دوبعدی پس از ۱۰ روز

در فرآیند آشام خودبخوری در مقیاس مخزنی، معمولاً ترکیبی از شرایط مرزی بر روی سیستم مورد بررسی حاکم است. با شروع تولید از این مخزن شکافدار، نواحی مختلفی پدیدار می‌شود؛ در ناحیه تهاجم یافته با آب، بلوک‌هایی که در تماس با یک شکاف هستند در بخش بالایی توسط نفت و در بخش پایینی توسط آب احاطه می‌شوند [۱۲]. در بلوک‌های آب‌دوست در ناحیه تهاجم یافته با آب، ورود آب به ماتریس و تولید نفت، تحت تأثیر نیروی موینگی کنترل می‌شود. برای بررسی این حالت، بلوک ماتریسی اشباع از نفت در نظر گرفته شده که به‌صورت جزئی در آب غوطه‌ور است. بدین ترتیب فرض شد یک‌سوم پایینی بلوک ماتریسی در تماس با آب و دوسوم بالایی در تماس با نفت قرار گرفته است. ابعاد بلوک (۲۰×۲۰) سانتی‌متر در نظر گرفته شده و از نیروهای ثقلی صرف نظر شده است. شکل ۱۷ توزیع اشباع آب را پس از ۵ و ۱۰ روز از آغاز فرآیند آشام نمایش می‌دهد.



شکل ۱۷- نمودار توزیع اشباع آب برای حالتی که بلوک ماتریسی به صورت جزئی با آب در تماس باشد پس از ۱۰ روز

در بخشی از مرز که به جریان آب باز است، اختلاف فشار آب در داخل محیط متخلخل و مرز، باعث آشام خودبه‌خودی آب به داخل سیستم و بازیافت ناهم‌سو نفت از همان مرز می‌شود؛ بنابراین ابتدا در نواحی اطراف مرز باز اشباع آب زیاد تغییر کرده و با پیش روی آب در مرکز بلوک باعث جابه‌جایی نفت از این نواحی می‌شود. بازیافت نفت زمانی که به‌صورت کامل در آب غوطه‌ور شده و تمام مرزها برای ورود آب باز است، و حالتی که بلوک به‌صورت جزئی در آب غوطه‌ور شده است در شکل ۱۸ نشان داده شده است.

- [5] Foley A.Y., Nooruddin H.A. and Blunt M.J., The Impact of Capillary Back Pressure on Spontaneous Counter-Current Imbibition in Porous Media. *Advances in Water Resources*, Vol.107, pp. 405-420, 2017.
- [6] Nooruddin H.A. and Blunt M.J., Analytical and Numerical Investigations of Spontaneous Imbibition in Porous Media. *Water Resources Research*, Vol. 52, No.9, pp. 7284-7310, 2016.
- [7] Standnes D.C. and Andersen P.O., Analysis of the Impact of Fluid Viscosities on the Rate of Countercurrent Spontaneous Imbibition. *Energy & fuels*, Vol.31, No.7, pp. 6928-6940, 2017.
- [8] Deng L. and King M.J., Theoretical Investigation of Two-Ends-Open Free Spontaneous Imbibition. In *16th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery*, European Association of Geoscientists & Engineers, 2018.
- [9] Chahardowli M., Farajzadeh R., Masalmeh S.K., Mahani H. and Bruining H., A novel enhanced oil recovery technology using dimethyl ether/brine: Spontaneous imbibition in sandstone and carbonate rocks. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Society of Petroleum Engineers, 2016.
- [10] Chahardowli M., Zhodybayeva A., Farajzadeh R. and Bruining H., Solvent-enhanced spontaneous imbibition in fractured reservoirs. In *EAGE Annual Conference & Exhibition incorporating Spe Europec*. Society of Petroleum Engineers, 2013.
- [11] Schechter D.S., Zhou D. and Orr Jr F.M., Low IFT Drainage and Imbibition. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 11, No.4, pp. 283-300, 1994.
- [12] Van Golf-Racht, T.D., *Fundamentals of fractured reservoir engineering*. Elsevier, 1982.
- [13] Salimi H. and Bruining J., The Influence of Heterogeneity, Wetting, and Viscosity Ratio on Oil Recovery from Vertically Fractured Reservoirs. *Spe Journal*, Vol.16, No.2, pp. 411-428, 2011.
- [14] Abd A.S. and Alyafei N., Numerical Investigation on the Effect of Boundary Conditions on the Scaling of Spontaneous Imbibition. *Oil & Gas Science and Technology-Revue d'IFP Energies nouvelles*, Vol.73, pp. 71, 2018.
- [15] Fischer H. and Morrow N.R., Spontaneous imbibition with matched liquid viscosities. In *Spe annual technical conference and exhibition*. Society of Petroleum Engineers, 2005.
- [16] Mason G. and Morrow N.R., Developments in Spontaneous Imbibition and Possibilities for Future Work. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol.110, pp. 268-293, 2013.
- [17] Abou-Kassem, J.H., Farouq-Ali, S.M. and Islam, M.R., *Petroleum Reservoir Simulations*. Elsevier, 2013.
- [18] El-Amin M.F., Kou J., Sun S. and Salama A., An Iterative Implicit Scheme for Nanoparticles Transport with Two-Phase Flow in Porous Media. *Procedia Computer Science*, Vol.80, pp. 1344-1353, 2016.
- [19] Ertekin T., Abou-Kassem J.H. and King G.R., *Basic applied reservoir simulation*, 2001.
- [20] Kalaei M.H., Green D.W. and Willhite G.P., Numerical modeling of the water imbibition process in water-wet laboratory cores. In *Spe Western Regional Meeting*. Society of Petroleum Engineers, 2010.

داد که افزایش ارتفاع بلوک (از ۲۰ سانتی متر به ۲۵ متر) باعث افزایش بازیافت نفت از ۸ درصد به ۱۸ درصد بعد از ۱۲۰ روز شد. نتیجه به-دست آمده تایید کننده آن است که در مخازن شکافدار با بلوک‌های نسبتاً بزرگ و در ناحیه تحت هجوم آب، حضور نیروهای ثقلی باعث تقویت آشام و بازیافت سریع‌تر و بیشتر نفت می‌شود.

۳- شرایط مرزی اعمال شده بر بلوک ماتریسی، تاثیر بسزایی در بازیافت نفت حاصل از آشام ناهم‌سو دوبعدی دارد. بسته به محل قرار گرفتن بلوک در نواحی مختلف مخزن شکافدار، شرایط مرزی در آشام تغییر می‌کند و بالطبع بازیافت نفت متفاوت است. با کاهش سطح تماس آب و نفت در نتیجه تاثیر شکاف‌های بسته، بازیافت نفت در آشام خودبه‌خودی ناهم‌سو از ۴۹ درصد (چهار وجه در تماس با آب) به ۳۰ درصد (یک وجه در تماس با آب) در ده روز کاهش پیدا کرد. مقدار بازده نهایی برای شرایط مرزی ارائه شده به یک مقدار نزدیک می‌شود اما سرعت بازیافت نفت با افزایش مرزهایی تحت تماس با آب، بیشتر است. همچنین در حالتی که بلوک ماتریسی به‌صورت جزئی با آب در تماس است، بازیافت نفت پس از ده روز از شروع فرآیند، همواره کمتر (۴۶ درصد) از حالتی است که بلوک ماتریسی از چهار وجه در تماس با شکاف پر از آب قرار داشت (۴۹ درصد). بنابراین بیشترین میزان بازیافت نفت در زمان کوتاه‌تر از یک بلوک ماتریسی منفرد در مخازن شکافدار، هنگامی اتفاق می‌افتد که بلوک ماتریسی کاملاً توسط آب محاط شود.

## ۵- علائم و نشانه‌ها

### علائم انگلیسی

|          |                                     |         |                                    |
|----------|-------------------------------------|---------|------------------------------------|
| $P_c$    | فشار موینه بین فاز آب و نفت (Pa)    | $B_L$   | ضریب حجمی سیال ( $m^3_{res}/m^3$ ) |
| $S_n$    | اشباع آب نرمال شده                  | $k$     | تراوایی مطلق ( $m^2$ )             |
| $S_{or}$ | اشباع نفت باقی مانده ( $m^3/m^3$ )  | $k_r$   | تراوایی نسبی                       |
| $S_{wc}$ | اشباع آب کاهش نیافتنی ( $m^3/m^3$ ) | $k_r^0$ | تراوایی نسبی در نقطه انتهایی       |
| $Z$      | ارتفاع نسبت به حالت مبنا (m)        | $n_L$   | شاخص توانی در رابطه کوری           |
|          |                                     | $P$     | فشار فاز آب (Pa)                   |

### علائم یونانی

|       |             |            |                       |
|-------|-------------|------------|-----------------------|
| $\mu$ | لزجت (Pa.s) | $\gamma_L$ | وزن مخصوص سیال (Pa/m) |
|       |             | $\phi$     | تخلخل ( $m^3/m^3$ )   |

## ۶- مراجع

- [1] Barenblatt G.I., Patzek T.W. and Silin D.B., The Mathematical Model of Nonequilibrium Effects in Water-Oil Displacement. *Spe journal*, Vol. 8, No.4, pp. 409-416, 2003.
- [2] Abd A.S., Elhafyan E., Siddiqui A.R., Alnoush W., Blunt M.J. and Alyafei N., A Review of the Phenomenon of Counter-Current Spontaneous Imbibition: Analysis and Data Interpretation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 180, pp. 456-470, 2019.
- [3] Bourbiaux B.J. and Kalaydjian F.J., Experimental Study of Cocurrent and Countercurrent Flows in Natural Porous Media. *Spe Reservoir Engineering*, Vol. 5, No.3, pp. 361-368, 1990.
- [4] Pooladi-Darvish M. and Firoozabadi A., Cocurrent and Countercurrent Imbibition in a Water-Wet Matrix Block. *Spe Journal*, Vol.5, No.1, pp. 3-11, 2000.