

# مطالعه عددی اثر سرعت ورودی در فرایند سیلاب زنی مخازن نفت در مقیاس حفره برای سطوح با ترشوندگی مختلف

کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران،  
hosseinnasiri@ut.ac.ir

حسین نصیری

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران، arjalali@ut.ac.ir

علیرضا جلالی\*

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران،  
fatemi\_sm@mecheng.iust.ac.ir

سیدمحمد فاطمی

## چکیده

هرساله تعداد مخازن نفت بیشتری به افت فشار و کاهش نرخ تولید دچار می‌شوند. فرایند سیلاب زنی یکی از این روش‌های مرسوم برای افزایش میزان تولید نفت است. سرعت سیال تزریقی به داخل محیط متخلخل در شرایط مختلف فیزیکی می‌تواند مقدار نفت متفاوتی را از حفرات خارج کند. با توجه به هندسه فضایی و ترکیب قرارگیری حفرات، سرعت سیال وارده به هر حفره محدوده گسترده‌ای دارد. در این پژوهش به بررسی اثر سرعت سیال در سه حالت حفره با سطوح آب-دوست، آب‌گریز و ترشوندگی خنثی پرداخته شده‌است. این کار با استفاده از شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار Ansys-Fluent و در مقیاس یک حفره ۱ میلی‌متری حاوی نفت با لزجت متوسط انجام شده‌است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که برای حفره با یک خروجی در حالت آب‌دوست و ترشوندگی خنثی، همه نفت در تمام سرعت‌ها از حفره خارج می‌شود. اما برای حفره با دو خروجی، تنها در حالتی که سطح حفره آب‌دوست باشد تمام نفت از آن خارج می‌شود و برای حفره با ترشوندگی خنثی ۷۸ درصد از حجم نفت خارج می‌شود. برای حفره با سطح آب‌گریز نیز با افزایش سرعت سیال ورودی نفت کمتری از حفره خارج شد و ضریب بازیابی بین ۶۳٪ و ۹۸٪ حاصل شد.

واژه‌های کلیدی: سیلاب‌زنی؛ نانوذرات؛ سورفاکتنت؛ مقیاس حفره؛ شبیه سازی عددی؛ سرعت سیال.

## Numerical Study of the effect of inlet velocity on oil reservoirs water flooding process at pore scale for different surface wettability

H. Nasiri  
A. R. Jalali  
S. M. Fatemi

Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran  
School of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran  
Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

## Abstract

Every year, more oil reservoirs experience pressure drop and production rate decreases. The water flooding process is one of these conventional methods to increase oil production. The velocity of the injected fluid into the porous medium under different physical conditions can extract different amounts of oil from the pores. Due to the spatial geometry and composition of the pores, the velocity of the fluid entering each pore has a wide range. In this study, the effect of fluid velocity in three pores with hydrophilic, hydrophobic and neutral wettability surfaces has been investigated. This was done using numerical simulation with ANSYS-Fluent software at the scale of a 1 mm pore containing medium viscosity oil. The results of this study show that for a pore with single output in the state of hydrophilic cavity and neutral wettability, all oil is removed from the pore at all speeds. But for a pore with two outlets, only if the surface of the hole is hydrophilic, all the oil is removed, and for the pore with neutral wettability, 78% of the oil volume is removed. For the pore with hydrophobic surface, less oil was removed from the pore by increasing the velocity of the inlet fluid and the recovery coefficient was achieved between 63.7% and 98.5%.

**Keywords :** water-flooding , nano particles , surfactant , pore scale , numerical simulation , fluid velocity.

## ۱- مقدمه

اندازه‌گیری زاویه تماس نفت محاسبه می‌شود. کاهش کشش بین سطحی و تغییر ترشوندگی سطح مخزن به سمت آب‌دوستی باعث تسهیل در حرکت نفت شده و بازدهی را افزایش می‌دهد [۳-۵]. نانوذرات و سورفاکتنت‌ها از پرکاربردترین مواد در کاهش تنش سطحی و زاویه تماس نفت با سطح مخزن هستند [۳، ۴، ۶-۱۰].

کشش سطحی معیاری است که میزان نیرو دافعه بین دو سیال را در مرز مشترک تعیین می‌کند. هرچه مقدار کشش سطحی کمتر باشد، دو سیال تمایل بیشتری برای حل شدن در یکدیگر دارند. در عوض اگر مقدار کشش سطحی بالا باشد، فشار لازم برای حرکت دادن نفت بیشتر می‌شود [۱۱، ۱۲].

یکی از مشکلات موجود در صنعت نفت، کاهش بهره‌وری برداشت نفت به علت کاهش فشار مخازن است. در چاه‌هایی که نرخ تولید آنها طی سال‌ها برداشت افت کرده، می‌توان با تزریق آب به مخزن نفتی این کمبود تولید را جبران کرد. این روش با حرکت دادن نفت به سمت خروجی چاه تاحدی باعث افزایش برداشت می‌شود. برای افزایش بازدهی موادی به آب تزریقی اضافه می‌شوند که خواص فیزیکی و شیمیایی آن را تغییر می‌دهند [۲۰۱]. در فرایند تزریق سیال در محیط متخلخل نفتی، مهم‌ترین پارامترها فشار موینگی ناشی از کشش سطحی و ترشوندگی دو فاز نسبت به یکدیگر هستند. ترشوندگی با

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: arjalali@ut.ac.ir

هر کدام از این مواد به علت خواص فیزیکی و یا شیمیایی مختص به خود باعث تغییراتی در کشش سطحی و ترشوندگی بین آب و نفت می‌شوند. بطور مثال کاهش شوری آب باعث کاهش زاویه تماس قطرات نفت می‌شود [۱۳]. مواد مختلفی در فرایند ازدیاد برداشت نفت برای افزایش میزان بهره‌وری استفاده می‌شوند. سه دسته ناوذرات، سورفاکتنت‌ها و پلیمرها از پرکاربردترین این مواد هستند. در ادامه به مطالعات برخی محققین درباره این مواد اشاره خواهد شد. استفاده از ناوذرات با مکانیزم‌های مختلفی مانند تغییر ترشوندگی، تغییر لزجت نفت و سیال تزریق شده و کاهش کشش سطحی آب و نفت باعث افزایش بهره‌وری فرایند ازدیاد برداشت نفت می‌شود. نویدی و همکاران برای غلظت‌های مختلف ناوذرات دی‌اکسید زیرکونیوم و اکسید نیکل زاویه تماس را اندازه‌گیری کرده و مشاهده کردند دی-اکسید زیرکونیوم تاثیر بیشتری بر کاهش زاویه تماس دارد. [۱۴]. رضوانی و همکاران نیز برای ناوذرات دی‌اکسید زیرکونیوم تغییرات کشش سطحی و زاویه تماس را در غلظت‌های مختلف اندازه‌گیری کردند [۱۵]. لو و همکاران با استفاده از یک تجهیز آزمایشگاهی به بررسی اثر ناوذرات در فرایند سیلاب‌زنی در یک محیط با نفوذپذیری پایین پرداختند. نتایج نشان داد استفاده از ناوذرات سیلیسیم دی-اکسید تا غلظت ۱۰ ppm ضریب بازیابی نفت را تا ۱۰/۳٪ افزایش می‌دهد. اما غلظت‌های بالاتر ناوذرات می‌تواند باعث مسدود شدن جریان شود [۱۶].

سورفاکتنت‌ها یا مواد فعال سطحی، موادی هستند که در غلظت پایین نیز کشش سطحی آب را تا حد زیادی کاهش می‌دهند. آلوآرز و همکاران در پژوهش خود نشان دادند که سورفاکتنت‌های آنیونی و غیر آنیونی باعث کاهش کشش سطحی و تغییر ترشوندگی سطوح به سمت آب‌دوستی می‌شوند. نتایج نشان داد سورفاکتنت‌های آنیونی تاثیر بیشتری بر دو خاصیت ذکر شده دارند و ضریب بازیابی نفت را بالاتر می‌برند [۱۷]. کاتل و همکاران نیز در پژوهشی جامع، هشت سورفاکتنت آنیونی و سه سورفاکتنت غیر آنیونی را بررسی کردند. سه مورد از سورفاکتنت‌های آنیونی بیشترین کاهش زاویه تماس را داشتند. همچنین با افزایش کشش سطحی ضریب بازیابی نیز افزایش پیدا کرد [۱۸].

شبیه‌سازی عددی نیز یک روش کم‌هزینه و مناسب برای بررسی رفتار نانوسیال و دیگر سیالات در فرایند سیلاب‌زنی است. پژوهشگران با استفاده از روش‌های مختلفی، اثر سیال تزریقی در مقیاس‌های متفاوت را بررسی کرده‌اند. در جدول ۱ خلاصه‌ای از پژوهش‌های انجام شده در این زمینه بیان شده است.

در این پژوهش یک حفره نفتی به شکل دایره به عنوان مدل مورد مطالعه انتخاب شده است. علت انتخاب این هندسه آن بوده است که بیشتر حفرات محیط متخلخل کروی شکل هستند. شبیه‌سازی عددی در مقیاس حفره با استفاده از روش کسر حجمی انجام شده است. به دلیل آنکه تست آزمایشگاهی فرایند سیلاب‌زنی و بررسی نتایج آن زمان‌بر بوده و نیاز به تجهیزات ابزار دقیق دارد، می‌توان از شبیه‌سازی عددی برای بررسی رفتار دو سیال در این مقیاس استفاده کرد. هدف این پژوهش بررسی اثر سرعت سیال ورودی بر تقابل دو سیال در مرز مشترک و میزان نفت خارج شده از حفره است. برای هر کدام از سرعت‌های ورودی سه شبیه‌سازی برای دیواره آب‌دوست و آب‌گریز و

ترشوندگی خنثی حفره انجام شده است. برای انجام حل عددی از نرم-افزار تجاری انسیس-فلوئنت استفاده شده است.

جدول ۱- پژوهش‌های انجام شده با شبیه‌سازی عددی

نام پژوهشگران	روش پژوهش	نتیجه‌گیری
جعفری و همکاران [۱۹]	شبیه‌سازی تزریق محلول بایوسورفاکتنت به میکرومدل متخلخل	افزایش سرعت سیال ورودی باعث کاهش ضریب بازیابی شد
رستمی و همکاران [۲۰]	تست آزمایشگاهی و شبیه‌سازی تاثیر ناوذرات سیلیکا در فرایند ازدیاد برداشت	تغییر ترشوندگی سطح به آب‌دوستی با افزودن ناوذرات باعث افزایش بازیابی شد
نانداوی و همکاران [۲۱]	شبیه‌سازی سه‌بعدی محیط متخلخل نفتی	کاهش کشش سطحی افزایش ضریب بازیابی را به دنبال خواهد داشت
ژاو و همکاران [۲۲]	شبیه‌سازی تزریق نانوسیال و سورفاکتنت به محیط متخلخل نفتی در مقیاس حفره	تغییر ترشوندگی سطح به آب‌دوستی باعث افزایش بازیابی شد
مهریان و همکاران [۲۳]	بررسی اثر اضافه شدن یون-های مختلف به آب بر کشش سطحی و زاویه تماس و شبیه‌سازی در حالات مختلف	نتایج شبیه‌سازی نشان داد ترشوندگی خنثی نسبت به ترشوندگی آب-دوست ضریب بازیابی را بالاتر می‌برد
همت اسفه و همکاران [۲۴، ۲۵]	با مدل کردن دو بعدی مخزن نفتی در مقیاس چند سانتی‌متر و با استفاده از معادلات دارسی اثر اضافه شدن ناوذرات را بررسی کردند	با افزودن ناوذرات به سیال تزریقی ضریب بازیابی نفت افزایش پیدا کرد
خسروی و همکاران [۲۶]	بررسی فرایند آشام خود-به خودی بلوک نخزن نفتی با نرم افزار متلب	نتایج نشان داد میزان تولید نفت در آشام همسو ۵۰ درصد بیشتر از آشام ناهمسو است

با وجود آنکه سرعت تزریق سیال در فرایند سیلاب‌زنی در صنعت در محدوده مشخصی قرار دارد (در حدود چند فوت در روز) اما پژوهش‌هایی آزمایشگاهی در رابطه با تاثیر سرعت تزریق انجام شده است. به عنوان نمونه مای و کانتزاس در بررسی فرایند سیلاب‌زنی به داخل مخازن حاوی نفت با لزجت بالا پی بردند که کاهش سرعت تزریق می‌تواند به بالا رفتن میزان نفت خارج شده بیانجامد [۲۷]. عرب و همکاران نیز برای نفت با لزجت‌های مختلف، سرعت‌های تزریق را از ۰٫۷ تا ۲۴٫۳ فوت در روز تغییر دادند و مشاهده کردند که سرعت تزریق بهینه به لزجت نفت وابسته است [۲۸]. هدف این پژوهش نیز بررسی اثر سرعت ورود سیال تزریقی به حفره حاوی نفت با لزجت متوسط است. سرعت ورودی به حفره با توجه به هندسه و موقعیت آن نسبت به دیگر حفرات مقادیر متفاوتی نسبت به سرعت تزریقی در مقیاس ماکرو خواهد داشت. در واقع به علت آنکه سطح مقطع ورودی هر روزنه می‌تواند متغیر باشد، سرعت سیال وارده به حفره نیز متغیر خواهد بود. نتایج این پژوهش می‌تواند به درک رفتار جریان دوقاز در محیط متخلخل در مقیاس کوچک کمک کند.

گرفتن نیروهای فوق، معادله مومنتوم برای مدل VOF شکل زیر را می‌گیرد:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u} \bar{u}) = \rho \bar{g} - \nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \bar{u} + \nabla \bar{u}^T)] - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot u \bar{u} + F_{CSF} \quad (5)$$

در این رابطه  $g$  شتاب جاذبه است که در این مسئله از آن صرف نظر شده است،  $p$  فشار و  $I$  تنسور همانی است. بنابراین، یک معادله مومنتوم در کل حوزه محاسباتی حل می‌شود و سرعت محاسبه شده بین فازها به اشتراک گذاشته می‌شود.

### ۳- مدل فیزیکی

در این بخش هندسه مورد استفاده در مسئله معرفی شده و سپس مشخصات فیزیک آب و نفت، کشش سطحی بین دو سیال و زاویه تماس سیال با سطح حفره بیان خواهد شد. سپس شرایط مرزی اعمال شده به نرم‌افزار که شامل پنج سرعت ورودی مختلف است، توضیح داده خواهد شد.

#### ۳-۱- هندسه حفره

در این پژوهش یک حفره دو بعدی که بخش کوچکی از یک محیط متخلخل نفتی است مورد بررسی قرار گرفته است. این حفره که ۱ میلی‌متر قطر دارد، دارای یک ورودی و خروجی به عرض ۰٫۱ میلی‌متر می‌باشد (شکل ۱). خاصیت ترشوندگی نیز در دیواره های این حفره نمود پیدا می‌کند. با توجه به اندازه کوچک حفره می‌توان از گرانش صرف نظر کرد.

#### ۳-۲- خواص سیال

خواص سیال آب و نفت در این مسئله ثابت و بدون تغییر در زمان خواهد بود و با فرض هم‌دمایی هیچ انتقال حرارتی بین دو سیال و دیواره حفره وجود ندارد. مشخصات دو سیال در جدول ۲ گزارش شده است. مشخصات این نفت با توجه به نفت های موجود در ایران جزو نفت های با لزجت متوسط است. برای محاسبه میزان ترشوندگی سطح مخازن، از زاویه تماس قطره نفت با سطح جامد استفاده می‌شود. هرچه زاویه تماس قطره نفت کمتر باشد، سطح کمتری از آن با مخزن در تماس است و به اصطلاح سطح آب‌دوست‌تر خواهد بود (شکل ۲).

کاهش زاویه تماس از چسبندگی نفت به دیواره مخزن جلوگیری می‌کند. اما اگر کاهش آن بیش از حد باشد، باعث چسبندگی زیاد آب به دیواره مخزن شده و در روند حرکت آن اختلال ایجاد می‌کند [۵، ۲۹].

جدول ۲- مشخصات فیزیکی آب و نفت

لزجت (mPa.s)	چگالی (kg.m <sup>-3</sup> )	
۱	۹۹۸	آب

## ۲- روش حل عددی

در این بخش به معادلات و روش‌هایی که نرم‌افزار برای حل مسئله استفاده می‌کند پرداخته خواهد شد. برای حل مقادیر سرعت و فشار سیال در هر نقطه از معادله ناور استوکس و برای یافتن خواص فیزیکی و نیروهای بین دو سیال در مرز مشترک از معادلات کسر حجمی استفاده شده است.

### ۲-۱- معادلات حاکم

در این شبیه‌سازی، جریان دو سیال تراکم‌ناپذیر با استفاده از معادلات ناور-استوکس و پیوستگی مدل سازی شده است:

$$\frac{\partial}{\partial t} u + \rho \nabla \cdot (u u) = -\nabla p + \mu \nabla \cdot (\nabla u + \nabla u^T) + F + \rho g \quad (1)$$

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (2)$$

که در آن  $u$  بردار سرعت،  $\rho$  چگالی سیال،  $\mu$  لزجت سیال،  $p$  فشار استاتیکی،  $F$  بیانگر نیروهای حجمی وارده به سیال و  $g$  شتاب گرانشی بوده که در این مسئله قابل چشم‌پوشی است.  $u^T$  نیز ترانهاده ماتریس سرعت می‌باشد.

### ۲-۲- روش کسر حجمی (VOF)

روش‌های مختلفی برای شبیه‌سازی جریان‌های چندفازی استفاده می‌شود. برای دو و یا چند سیالی که نسبت به هم غیر قابل امتزاج هستند، یکی از معادلات پرکاربرد معادله کسر حجمی می‌باشد. با استفاده از این معادله می‌توان وضعیت دو سیال را در سطح مشترک آنها مشخص کرد:

$$\frac{\partial(\alpha_i \rho_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i u_i) = \rho_i S_{\alpha i} \quad (3)$$

که در آن  $S_{\alpha i}$  عبارت منبع جرم،  $\rho_i$  چگالی سیال  $i$  ام و  $u_i$  سرعت سیال  $i$  ام است.  $\alpha_i$  نیز بیانگر کسر حجمی است که بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha_i = 0 \quad \text{سیال } i \text{ ام در سلول وجود ندارد}$$

$$0 < \alpha_i < 1 \quad \text{سلول در مرز مشترک قرار دارد}$$

$$\alpha_i = 1 \quad \text{سلول کاملاً از سیال } i \text{ ام پر است}$$

$$\rho = \sum \alpha_i \rho_i \quad \mu = \sum \alpha_i \mu_i$$

خواص سیال در سطح مشترک نیز با روابط میانگین حجمی خواص هر سیال در یک محاسبه می‌شوند. این دو رابطه میانگین حجمی خواص هر سیال در یک سلول را محاسبه می‌کند. در این مسئله از مدل نیروی سطحی پیوسته (CSF<sup>۱</sup>) برای محاسبه انحنای سطح مشترک (زاویه تماس) و کشش سطحی بین دو سیال استفاده شده است. به منظور بررسی تأثیر کشش سطحی در طول رابط بین دو فاز، مدل نیروی سطح پیوسته (CSF) به معادله حرکت اضافه شده است:

$$F_{CSF} = 2\sigma \frac{\alpha_1 \rho_1 C_2 \Delta \alpha_2 + \alpha_2 \rho_2 C_1 \Delta \alpha_1}{\rho_1 + \rho_2} \quad (4)$$

که  $\sigma$  ضریب کشش سطحی و  $C$  خمیدگی سطح است. با در نظر

<sup>1</sup> Volume Of Fluid

<sup>2</sup> Continuum surface force

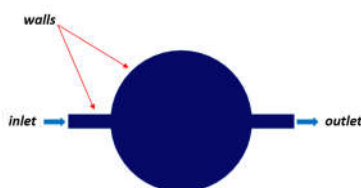
متر بر ثانیه به عنوان شرط سرعت ورودی در حل عددی استفاده خواهد شد. بازه مقادیر سرعت مطابق با پژوهش‌های دیگر انتخاب شده است [۲۹ و ۲۷].

#### ۴- نتایج و تحلیل

در این بخش در ابتدا نحوه شبکه‌بندی هندسه، تعداد سلول‌ها و بهترین شبکه برای شبیه‌سازی بررسی می‌شود. سپس نتایج حل مسئله برای هر سه حالت زاویه تماس با تفسیر پدیده رخ داده در هر کدام بیان خواهد شد.

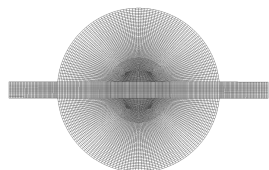
##### ۴-۱- استقلال از شبکه و اعتبارسنجی

به منظور حل دقیق‌تر در شبیه‌سازی این مسئله، از سلول‌های چهارگوش استفاده شده است. برای شبکه‌بندی همگن، دایره هندسه به چهار قسمت حلقوی و یک دایره کوچک‌تر تقسیم شد (شکل ۴). این کار منجر به کنترل بهتر روی شبکه‌بندی و تعداد المان‌ها در هر ضلع می‌شود.



شکل ۳- شماتیکی از شرایط مرزی مسئله

برای ارزیابی کیفیت تراکم شبکه که با استفاده از نرم‌افزار شبکه‌بندی Ansys به دست آمده است، فشار مویینگی در ابتدای تزریق آب به حفره (شکل ۴) در حل عددی محاسبه شده است.

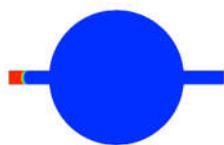


شکل ۴- شبکه‌بندی هندسه مسئله

مقدار فشار مویینگی در یک کانال دو بعدی براساس رابطه (۶) بدست می‌آید [۳۱]:

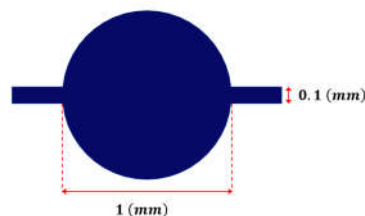
$$P_c = \frac{2\sigma \cos \alpha}{h/2} \quad (6)$$

که در آن  $\sigma$  کشش سطحی برحسب  $(N/m)$ ،  $\alpha$  زاویه تماس و  $h$  عرض کانال است.

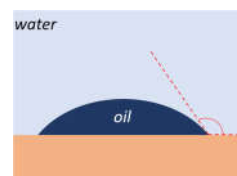


شکل ۵- کانتور کسر حجمی آب و نفت ابتدای تزریق آب

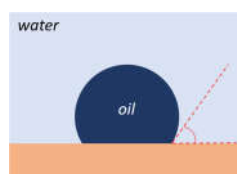
در ابتدای فرایند سیلاب‌زنی به مدل هندسی مسئله، به علت آنکه ورودی به حفره به شکل کانال است می‌توان از فشار مویینگی دوفاز در



شکل ۱- هندسه حفره نفتی



آب گریز و نفت دوست



آب دوست و نفت گریز

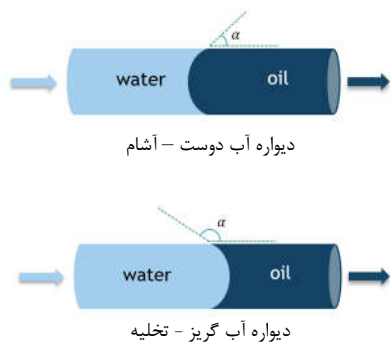
شکل ۲- طرحواره قطره نفت روی دیواره آب‌گریز و آب‌دوست

کشش سطحی آب و نفت در حالت عادی در حدود  $(mN/m)$  ۲۵ است که سورفاکتنت‌ها می‌توانند آنرا تا زیر  $(mN/m)$  ۱ نیز کاهش دهند [۳۰]. در این مسئله کشش سطحی بین آب و نفت  $(mN/m)$  ۱ بوده که با اضافه شدن سورفاکتنت‌ها به آب قابل دستیابی خواهد بود. همانطور که بیان شد میزان ترشوندگی دیواره حفره با اندازه زاویه تماس قطره نفت بدست می‌آید. با توجه به شکل ۲، نوع ترشوندگی برحسب زاویه تماس به سه حالت تقسیم می‌شود [۳۱]:

زاویه تماس کمتر از ۷۵ درجه: آب دوست و نفت گریز  
زاویه تماس بین ۷۵ و ۱۰۵ درجه: ترشوندگی خنثی  
زاویه تماس بیش از ۱۰۵ درجه: آب گریز و نفت دوست

##### ۳-۳- شرایط اولیه و شرایط مرزی

فرض پایه در تمام شبیه‌سازی‌ها، اشباع بودن کامل حفره از نفت است. این شبیه‌سازی‌ها به سه دسته تقسیم می‌شوند. در دسته اول سطح دیواره حفره آب دوست بوده و میزان ترشوندگی آن به اندازه‌ای است که قطره نفت با سطح حفره زاویه تماس ۳۰ درجه می‌سازد. دسته دوم نیز حفره آب‌گریز بوده و قطره نفت با دیواره زاویه تماس ۱۵۰ درجه می‌سازد. در دسته سوم سطح حفره ترشوندگی خنثی داشته و زاویه تماس ۹۰ درجه خواهد بود. شکل ۳ طرحواره‌ای از شرایط مرزی مسئله را نشان می‌دهد. دیواره سمت چپ شرط مرزی سرعت ورودی و دیواره سمت راست شرط فشار خروجی با مقدار فشار نسبی صفر خواهد بود. در هر کدام از سه حالت آب‌دوست، آب‌گریز و ترشوندگی طبیعی پنج سرعت  $5 \cdot 10^{-5}$ ،  $1 \cdot 10^{-4}$ ،  $5 \cdot 10^{-4}$ ،  $1 \cdot 10^{-3}$  و  $5 \cdot 10^{-3}$



شکل ۶- فرایند تخلیه و آشام در لوله موئین

به علت آنکه نیروی موئینگی در مجراهای کوچک غیر قابل صرف نظر است، افت فشار در حرکت سیال متفاوت خواهد بود. در این حالت وجود نیروی موئینگی عبارت دیگری را به رابطه فشار اضافه می‌کند و اختلاف فشار جدید از رابطه (۸) بدست می‌آید.  $\sigma$  کشش سطحی بین دو سیال و  $\alpha$  زاویه تماس در محل برخورد دوسیال با سطح لوله است. این رابطه نشان می‌دهد اگر سطح لوله ترشوندگی مطابق با سیال ورودی داشته باشد، اختلاف فشار کمتری برای سرعت یکسان سیال ورودی نیاز است. با توجه به رابطه (۸) و شکل ۶ اگر سیال با فاز تر وارد شود (زاویه  $\alpha$  حاده)  $\Delta p$  کاهش یافته و اگر سیال با فاز غیرتر وارد شود (زاویه  $\alpha$  منفرجه)  $\Delta p$  افزایش می‌یابد.

$$\Delta p = \frac{8\mu LV}{r^2} - \frac{2\sigma \cos \alpha}{r} \quad (8)$$

با استفاده از رابطه فوق اثبات می‌شود که هرچه ترشوندگی سطح به آب‌دوست نزدیک‌تر باشد، فشار کمتری برای حرکت سیال با سرعت یکسان نیاز است.

در بخش‌های بعدی اثر سرعت ورودی سیال در فرایند سیلاب‌زنی برای سه حالت زیر مورد بررسی قرار خواهند گرفت:

- مخزن آب‌دوست: زاویه تماس ۳۰ درجه
- مخزن آب‌گریز: زاویه تماس ۱۵۰ درجه
- مخزن با ترشوندگی خنثی: زاویه تماس ۹۰ درجه

در هرکدام از این حالات برای سرعت ورودی  $10^{-3}$  متر بر ثانیه، مسیر حرکت آب از ورود به حفره تا خارج شدن از آن در شش زمان نمایش داده شده و سپس نمودار نفت جاروب شده برای هر سرعت ورودی گزارش شده‌است.

#### ۴-۲- تاثیر سرعت ورودی در حفره آب‌دوست

در این بخش نحوه اثرگذاری مقدار سرعت ورودی در حفره آب-دوست با زاویه تماس ۳۰ درجه، درحالی‌که حفره کاملاً از نفت پر بوده مدل‌سازی شده‌است. همانطور که بیان شد، معمولاً زاویه تماس قطره نفت بیش از ۹۰ درجه بوده که می‌توان با استفاده از نانوذرات مقدار آن را کاهش داد.

این قسمت برای اعتبارسنجی حل عددی استفاده کرد. برای دیواره آب-دوست، مقادیر فشار موئینگی بدست آمده از چهار شبکه بندی با تراکم مختلف و مقدار بدست آمده از رابطه (۶) در جدول ۳ گزارش شده است.

به علت آنکه سرعت سیال در لحظات مختلف متغیر است، از تنظیمات انطباقی برای تعیین گام زمانی استفاده شد؛ به‌گونه‌ای که عدد کورانت پایین‌تر از ۰/۵ باشد. با توجه به جدول ۳ مشخص می‌شود که تعداد سلول ۱۴۷۰۰ نتیجه قابل قبولی را داشته و این تراکم شبکه برای ادامه شبیه‌سازی کافی خواهد بود.

جدول ۳- مقادیر فشار در تراکم‌های مختلف شبکه بندی

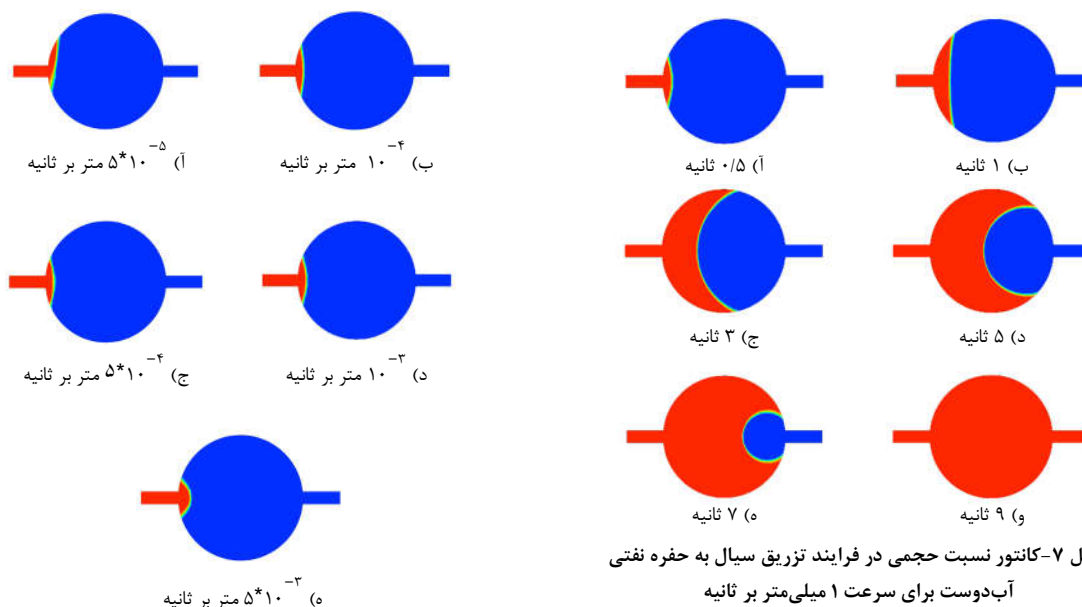
تعداد سلول‌ها	فشار موئینگی حل عددی (Pa)	فشار موئینگی محاسبه شده (Pa)
۷۲۰۰	۳۲/۴۲	۳۴/۶۴
۱۰۸۰۰	۳۴/۱	۳۴/۶۴
۱۴۷۰۰	۳۴/۷	۳۴/۶۴
۱۸۲۰۰	۳۴/۷۶	۳۴/۶۴

به جهت بررسی بیشتر، مقدار فشار موئینگی بدست آمده از رابطه (۶) برای پژوهش ژاؤ و همکاران [۲۲] نیز بدست آمد. مقدار محاسبه از رابطه مذکور ۱۸۰۱۰ پاسکال و مقدار گزارش شده توسط ژاؤ که از حل عددی بدست آمده، ۱۹۰۰۰ پاسکال است. این نشان می‌دهد که استفاده از رابطه (۶) برای اعتبارسنجی حل عددی مناسب بوده‌است. علت مقدار بالای فشار موئینگی پژوهش مذکور نیز عرض کمتر ورودی حفره است.

مطابق رابطه (۷) اختلاف فشار لازم برای حرکت سیال در یک لوله تابعی از ابعاد هندسی، خواص سیال و مقدار سرعت جریان خواهد بود.

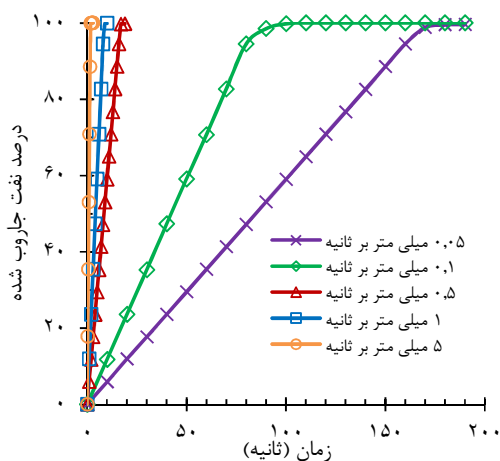
$$\Delta p = \frac{8\mu LV}{r^2} \quad (7)$$

در این رابطه  $\mu$  لزجت سیال ورودی،  $V$  سرعت آن،  $L$  طول لوله و  $r$  شعاع لوله است. اما چنانچه قطر لوله کم باشد (میلی‌متر و کمتر)، اثرات نیروی موئینگی قابل ملاحظه خواهد بود. در شکل ۶ شماتیکی از فرایند تزریق آب به لوله موئین حاوی نفت نشان داده شده‌است. در شکل بالا دیواره لوله ترشوندگی آب و در شکل پایین دیواره لوله ترشوندگی نفت می‌باشد. در حالت آب دوست، نیروی موئینگی آب را به سمت دیواره لوله می‌کشاند. به این فرایند که فاز تر وارد لوله حاوی فاز غیر تر شده، آشام (imbibition) گفته می‌شود. در این حالت زاویه  $\alpha$  حاده است. به همین طریق در حالت نفت‌دوست زاویه  $\alpha$  منفرجه می‌باشد و این حالت که فاز غیر تر وارد لوله محتوی فاز تر شده، تخلیه (drainage) نام دارد.



شکل ۷- کانتور نسبت حجمی در فرایند تزریق سیال به حفره نفتی آب دوست برای سرعت ۱ میلی متر بر ثانیه

شکل ۸- کانتور نسبت حجمی لحظه ورود آب به حفره آب دوست در سرعت های مختلف



شکل ۹- نمودار درصد نفت جاروب شده برای حالت حفره نفتی آب دوست

در شکل ۹ برای هر پنج سرعت ورودی نمودار نفت جاروب شده بر حسب زمان گزارش شده است. رابطه (۹) نحوه محاسبه این متغیر را نشان می دهد. وجه مشترک در همه حالات شیب ثابت نمودار و مقدار نهایی میزان نفت جاروب شده ۱۰۰٪ است.

$$Recovery Factor = \left(1 - \frac{\text{remained oil volume}}{\text{total volume}}\right) \quad (9)$$

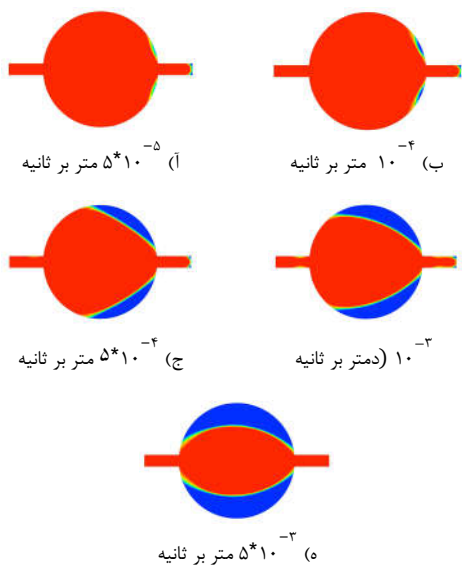
### ۳-۴- تاثیر سرعت ورودی در حفره آب گریز

اگر در فرایند سیلاب زنی از نانوذرات استفاده نشده باشد، محتمل است که دیواره مخزن نفتی آب گریز باشد. شکل ۱۰ ورود آب به حفره را برای سرعت  $10^{-3}$  متر بر ثانیه نشان می دهد. در این حالت سیال

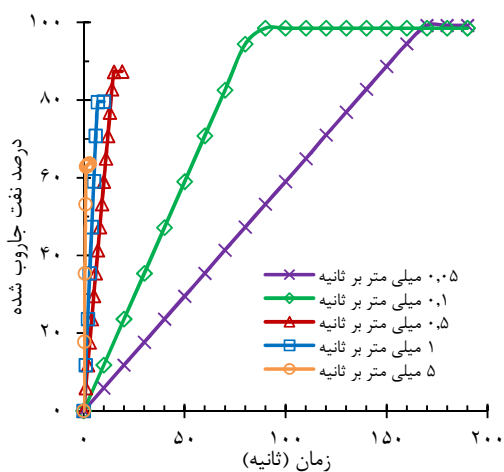
مقدار سرعت ورودی برای هر مخزن نفتی با استفاده از مقاومت هیدرولیکی مجموعه و توان پمپاژ مشخص می شود؛ در نتیجه با تغییر توان پمپاژ می توان به سرعت های ورودی مختلف دست یافت. پنج مقدار مختلف با مراتب بزرگی متفاوت به عنوان سرعت ورودی در نظر گرفته شده است که عبارت اند از  $5 \times 10^{-5}$ ،  $1 \times 10^{-4}$ ،  $5 \times 10^{-4}$ ،  $1 \times 10^{-3}$  و  $5 \times 10^{-3}$  متر بر ثانیه. در واقع هدف این بوده که اثر سرعت ورودی برای دامنه وسیعی در مقیاس یک حفره بررسی شود. معیار ارزیابی در هر حالت مقدار نفت خارج شده از حفره است که آنرا با ضریب بازیابی نفت (بر حسب درصد) بیان می کنند. با توجه به مقدار سرعت ورودی در هر حالت مدت زمان متفاوتی طول می کشد تا آب از ورودی تا خروجی حفره را طی کند. در شکل ۷ تزریق آب در حفره را برای سرعت  $1 \times 10^{-3}$  متر بر ثانیه نشان می دهد.

رنگ قرمز مربوط به آب ورودی و رنگ آبی مربوط به نفت است. در ابتدای ورود آب به حفره در زمان ۰٫۵ ثانیه، به واسطه سرعت بالای آب، خط مشترک آب و نفت را به شکل مقعر در آورده است؛ اما به علت تمایل سطح حفره به کشش آب، این خط در ادامه حرکت آب به شکل محدب در آمده است.

این پدیده در سرعت های تزریق مختلف به شکل های مختلف اتفاق می افتد. در شکل ۸ کانتور نسبت حجمی آب و نفت در لحظه ورود آب به داخل حفره نشان داده شده است. مطابق با این شکل هر چه سرعت تزریق بیشتر باشد سطح مشترک آب و نفت بیشتر شکل مقعر به خود خواهد گرفت؛ چراکه با افزایش سرعت سیال ورودی نیروی اینرسی آن به نیروی موینگی غلبه پیدا می کند.



شکل ۱۱- کانتور نهایی نسبت حجمی حفره آب‌گریز در سرعت‌های مختلف

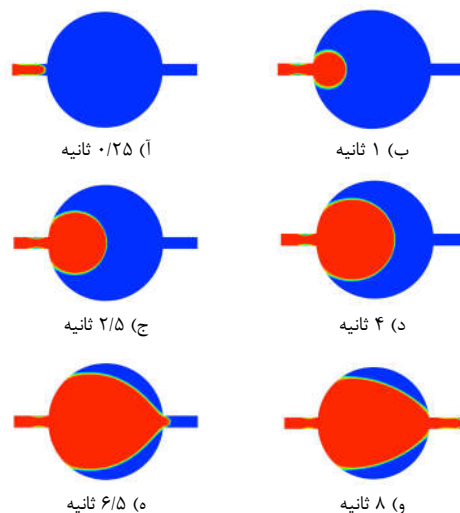


شکل ۱۲- نمودار درصد نفت جاروب شده برای حالت حفره نفتی آب-گریز

مطابق با این نمودار هرچه سرعت سیال ورودی بیشتر باشد، سیال زودتر به انتهای مسیر رسیده و نفت کمتری در نهایت از آن خارج می‌شود. بطور مثال برای سرعت ۵ میلی‌متر بر ثانیه، آب در مدت ۳ ثانیه، ۶۳٪ از نفت داخل حفره را خارج می‌کند؛ درحالی‌که برای سرعت ۰/۵ میلی‌متر بر ثانیه بیش از ۹۹٪ نفت در مدت زمان ۱۸۰ ثانیه از حفره خارج می‌شود. البته این بدان معنا نیست که در تزریق آب به مخزن آب‌گریز با سرعت ۰/۰۵ میلی‌متر بر ثانیه این مقدار از نفت استحصال خواهد شد؛ چراکه نحوه قرارگیری حفره‌ها و هندسه فضایی مخزن در مسیر حرکت آب بسیار تعیین‌کننده است. اما پیشنهاد می‌شود در سیلاب‌زنی مخازن آب‌گریز تا جایی که امکان دارد سرعت تزریق پایین آورده شود؛ زیرا در این نوع مخازن سرعت بالای تزریق، آب را بدون

ورودی با فاصله گرفتن از سطح حفره وارد آن شود.

شکل کروی آب در ابتدای ورود به حفره و فاصله گرفتن از سطح آن گواهی بر آب‌گریز بودن حفره است. در زمان ۶،۵ ثانیه سیال آب به روزنه خروجی حفره وارد می‌شود و مقداری نفت به دلیل ترشوندگی دیواره نسبت به نفت باقی می‌ماند. این مقدار نفت در زمان‌های بعدی نیز درون حفره باقی مانده و دیگر از آن خارج نمی‌شود.



شکل ۱۰- کانتور نسبت حجمی در فرایند تزریق آب به حفره نفتی آب‌گریز

تأثیر سرعت ورودی در شرایط آب‌گریز در شکل ۱۱ نشان داده شده‌است. این شکل کانتور نهایی نسبت حجمی را برای سرعت‌های مختلف نشان می‌دهد. نکته مهم آن است که در سرعت‌های پایین تقریباً تمام نفت از حفره خارج شده است و هرچه سرعت بالاتر باشد نفت باقی مانده در حفره افزایش می‌یابد.

در توجیه این پدیده می‌توان گفت با توجه به عدم تمایل آب به نزدیک شدن به دیواره حفره، هرچه سرعت ورودی بیشتر باشد سیال سریع‌تر راه خود را به انتهای حفره می‌یابد. در عوض هنگامی که سرعت سیال ورودی پایین باشد، توان کمتری برای ادامه حرکت در میانه مسیر دارد و در نتیجه آب به طرفین حفره حرکت کرده و نفت را از این مناطق خارج می‌کند.

در شکل ۱۲ نمودار درصد نفت جاروب شده برای این حالت نمایش داده شده است. نکته قابل توجه این است که شیب اولیه نمودار برای هر سرعت، در دو حالت آب‌دوست و آب‌گریز یکسان است. این بدین معناست که نوع ترشوندگی حفره تأثیری در مقدار سیال ورودی در ابتدای تزریق ندارد.

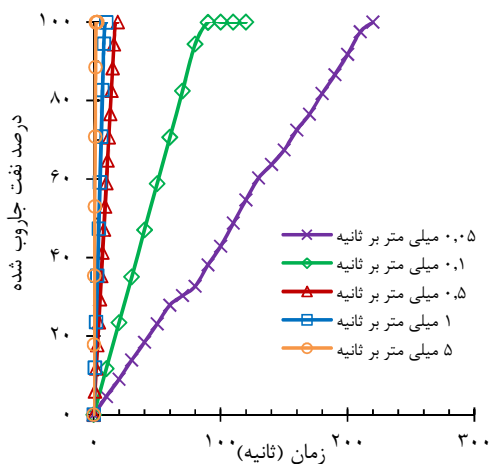
خارج کردن مقدار قابل توجهی نفت به خروجی می‌رساند و بازدهی را پایین می‌آورد.

#### ۴-۴- تاثیر سرعت ورودی در حفره با ترشوندگی خنثی

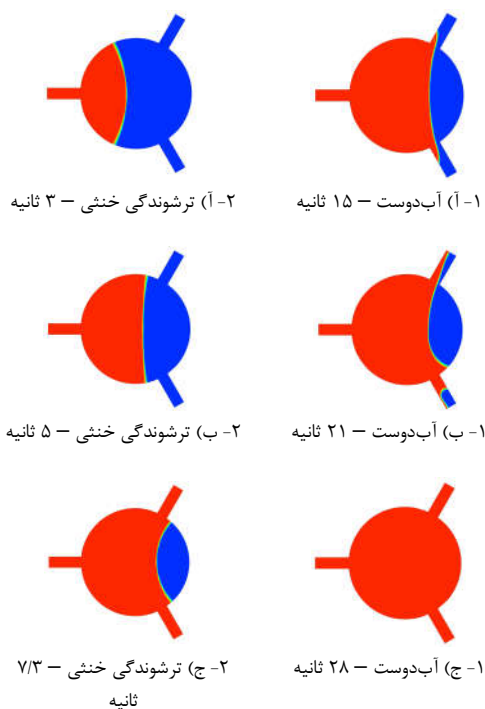
در دو حالت، ترشوندگی مخزن نفتی برای آب و نفت در حالت خنثی است ( زاویه تماس بین ۷۵ و ۱۰۵). یکی آنکه خاصیت سنگ مخزن به گونه‌ای است که نسبت به آب و نفت میزان ترشوندگی تقریباً یکسانی دارد و دیگر آنکه سطح مخزن در ابتدا آب‌گریز بوده و با اضافه شدن نانوذرات به آب ورودی، ترشوندگی خنثی حاصل شود. فرایند سیلاب‌زنی در این حالت نیز با استفاده از شبیه‌سازی عددی بررسی شده است.

شکل ۱۳ ورود آب به حفره را برای سرعت  $10^{-3}$  متر بر ثانیه نشان می‌دهد. در این قسمت زاویه تماس آب و نفت ۹۰ درجه در نظر گرفته شده است. هنگام ورود آب به روزنه ورودی حفره، خط مشترک دو سیال به هیچ سمتی منحرف نشده است که نشان از ترشوندگی خنثی سطح دارد. نکته قابل توجه در تمام این حالات آن است که خط مشترک دو سیال با خط مماس بر سطح حفره متعامد باقی می‌ماند (زاویه تماس ۹۰ درجه) و در نهایت نیز تمام نفت از حفره خارج شده است.

هنگام تزریق آب به حفره در حالت ترشوندگی خنثی، ۹۶ درصد از نفت از حفره نفتی با کشش سطحی  $0.052 (mN/m)$  خارج شد [۲۲].

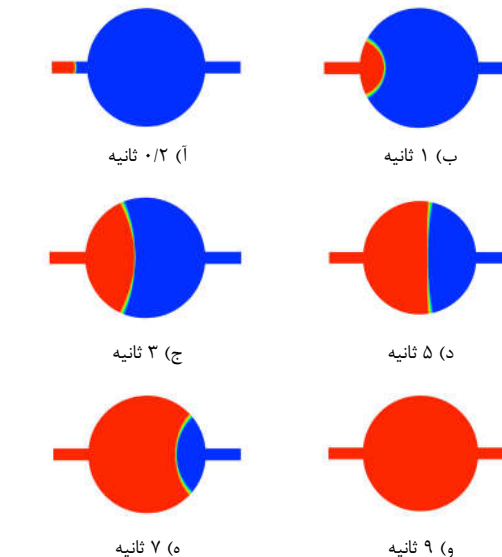


شکل ۱۴- نمودار درصد نفت جاروب شده برای حالت ترشوندگی خنثی



شکل ۱۵. مراحل حرکت آب در حفره آب‌دوست و ترشوندگی خنثی با دو خروجی

با وجود آنکه فرایند سیلاب‌زنی در دو حالت آب‌دوست و ترشوندگی خنثی نتایج تقریباً یکسانی داشتند، با توجه به پژوهش‌های گذشته کاهش زاویه تماس به سمت آب‌دوستی بر مقدار بازدهی فرایند سیلاب‌زنی اثبات شده است. لذا برای بررسی دقیق‌تر تفاوت بین حفره با سطوح آب‌دوست و ترشوندگی خنثی، یک حفره با هندسه متفاوت نیز بررسی شد. مشخصات این حفره همان هندسه اصلی مسئله بوده؛ با



شکل ۱۳- کانتور نسبت حجمی در فرایند تزریق سیال به حفره نفتی با ترشوندگی خنثی برای سرعت ۱ میلی‌متر بر ثانیه

شکل ۱۴ نمودار درصد نفت جاروب شده را برحسب زمان برای سرعت‌های ورودی مختلف نشان می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد در بقیه حالات تمام نفت حفره خارج می‌شود و تنها در زمان تخلیه با هم تفاوت دارند. برای سرعت تزریق  $0.5$  میلی‌متر بر ثانیه نمودار از حالت خطی خارج شده است. به نظر می‌رسد در این حالت تقابل نیروهای اینرسی و موینگی باعث کاهش پیشروی آب در حفره شده باشد. در پژوهش ژاو و همکاران که حفره کوچک‌تری را با استفاده از حل عددی شبیه‌سازی کردند نیز چنین نتیجه‌ای حاصل شد. در پژوهش مذکور



- Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 583, p. 124008, 2019.
- [4] Hendrainigrat L., Li S., and Torsæter O., A coreflood investigation of nanofluid enhanced oil recovery, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 111, pp. 128-138, 2013.
- [5] Kazemzadeh Y., Shojaei S., Riazi M., and Sharifi M., Review on application of nanoparticles for EOR purposes: A critical review of the opportunities and challenges, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol. 27, no. 2, pp. 237-246, 2019.
- [6] Armstrong R. T. and Wildenschild D., Investigating the pore-scale mechanisms of microbial enhanced oil recovery, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 94, pp. 155-164, 2012.
- [7] Hirasaki G. J., Miller C. A., and Puerto M., Recent advances in surfactant EOR, in *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Society of Petroleum Engineers, 2008.
- [8] Aoudia M., Al-Shibli M. N., Al-Kasimi L. H., Al-Maamari R., and Al-bemani A., Novel surfactants for ultralow interfacial tension in a wide range of surfactant concentration and temperature, *Journal of surfactants and detergents*, vol. 9, no. 3, pp. 287-293, 2006.
- [9] Li S., Torsæter O., Lau H. C., Hadia N. J., and Stubbs L. P., The impact of nanoparticle adsorption on transport and wettability alteration in water-wet Berea sandstone: an experimental study, *Frontiers in Physics*, vol. 7, p. 74, 2019.
- [10] Karnanda W., Benzagouta M. S., AlQuraishi A., and Amro M. M., Effect of temperature, pressure, salinity, and surfactant concentration on IFT for surfactant flooding optimization, *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 6, no. 9, pp. 3535-3544, 2013/09/01 2013.
- [11] Lu J. *et al.*, Enhanced oil recovery from high-temperature, high-salinity naturally fractured carbonate reservoirs by surfactant flood, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 124, pp. 122-131, 2014.
- [12] Pordel Shahri M., Shadizadeh S., and Jamialahmadi M., A new type of surfactant for enhanced oil recovery, *Petroleum science and technology*, vol. 30, no. 6, pp. 585-593, 2012.
- [13] Teklu T. W., Alameri W., H. Kazemi H., and Graves R. M., Contact angle measurements on conventional and unconventional reservoir cores, in *Unconventional Resources Technology Conference, San Antonio, Texas*, pp. 2297-2311: Society of Exploration Geophysicists, American Association of Petroleum , 2015.
- [14] Nwidae L. N., Al-Ansari S., Barifcani A., Sarmadivaleh M., Lebedev M., and Iglauer S., Nanoparticles influence on wetting behaviour of fractured limestone formation, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 149, pp. 782-788, 2017.
- [15] Rezvani H., Khalilnezhad A., Ganji, and P. Kazemzadeh Y., How ZrO<sub>2</sub> nanoparticles improve the oil recovery by affecting the interfacial phenomena in the reservoir conditions, *Journal of Molecular Liquids*, vol. 252, pp. 158-168, 2018.
- [16] Lu T., Li Z., Zhou Y., and Zhang C., Enhanced Oil Recovery of Low-Permeability Cores by SiO<sub>2</sub> Nanofluid, *Energy & Fuels*, vol. 31, no. 5, pp. 5612-5621 2017.
- [17] Alvarez J. O. and Schechter D. S., Wettability alteration and spontaneous imbibition in unconventional liquid reservoirs by surfactant additives, *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, vol. 20, no. 01, pp. 107-117, 2017.
- [18] Kathel P. and Mohanty K. K., EOR in tight oil reservoirs through wettability alteration, in *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Society of Petroleum Engineers, 2013

این تفاوت که دو مجرای با عرض ۰/۱ میلی متری به عنوان خروجی نفت از حفره در نظر گرفته شده‌اند. شکل ۱۵ مراحل تزریق آب را برای این حفره نشان می‌دهد. سرعت تزریق آب نیز ۱ میلی متر بر ثانیه بوده‌است. مطابق با این شکل در تزریق آب به حفره آب‌دوست تمام نفت در مدت زمان ۲۸ ثانیه و برای حفره با ترشوندگی خنثی نیز ۷۸ درصد از نفت طی مدت ۷/۳ ثانیه خارج شده‌است. در حالت آب‌دوست، آب در مدت زمان ۸ ثانیه از بالا و پایین حفره به نزدیکی روزنه خروجی می‌رسد ولی به علت نیروی چسبندگی زیاد بین آب و سطح حفره حدود ۷ ثانیه دیگر زمان لازم است تا آب وارد روزنه‌های خروجی شود. در واقع نتایج نشان می‌دهد چینش حفرات نسبت به هم و تعداد ورودی و خروجی و موقعیت آنها در میزان نفت خارج شده از هر حفره بسیار تعیین کننده است.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی اثر سرعت ورودی سیال در فرایند سیلاب‌زنی در مقیاس حفره در سه حالت آب‌دوست و آب‌گریز و ترشوندگی خنثی برای سرعت‌های ورودی مختلف با استفاده از شبیه‌سازی عددی پرداخته شد. در حالت آب‌دوست زاویه تماس ۳۰ درجه و در حالت آب‌گریز ۱۵۰ درجه بوده و کشش سطحی بین آب و نفت  $(mN/m)$  فرض شده‌است.

نتایج نشان داد در حالت آب‌دوست برای تمام سرعت‌ها نفت بطور کامل از حفره خارج می‌شود اما زمان رسیدن به شرایط پایا در هر کدام بسته به سرعت متفاوت است. در حالت آب‌گریز نتایج وابستگی زیادی به سرعت داشتند. در تزریق آب با سرعت پایین زمان بیشتری نیاز است تا آب به خروجی حفره برسد اما بیشتر نفت را از آن خارج می‌کند. درحالی‌که هرچه سرعت بالاتر باشد، آب‌گریز بودن سطح حفره باعث می‌شود آب کمتر به دیواره حفره نزدیک شود و متعاقباً نفت کمتری از حفره خارج شود.

با توجه به نتایج این پژوهش می‌توان انتظار داشت در فرایند سیلاب‌زنی یک حفره نفتی با یک خروجی، چنانچه سطح حفره دارای ترشوندگی خنثی و یا آب‌دوست باشد، تمام نفت از آن خارج می‌شود ولی چنانچه حفره دارای خروجی‌های متعدد باشد، کاهش زاویه تماس تا ۹۰ درجه (ترشوندگی خنثی) برای خارج کردن تمام نفت مناسب نخواهد بود و در حالتی که حفره دو خروجی داشت، ۷۸ درصد از نفت خارج شد. برای انتخاب سرعت مناسب در حالت آب‌گریز نیز باید حالتی بهینه بین زمان فرایند و مقدار ضریب بازایی نفت انتخاب کرد.

## ۶- مراجع

- [1] Taber J. and Seright R., Horizontal injection and production wells for EOR or waterflooding, in *Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference*, Society of Petroleum Engineers, 1992.
- [2] Han M., Xiang W., Zhang J., Jiang W., and Sun F., Application of EOR technology by means of polymer flooding in Bohai Oilfields, in *International oil & gas conference and exhibition in China*, Society of Petroleum Engineers, 2006.
- [3] Keykhosravi A. and Simjoo M., Insights into stability of silica nanofluids in brine solution coupled with rock wettability alteration: An enhanced oil recovery study in oil-wet carbonates, *Colloids and Surfaces A:*

- [19] Jafari A., Pour S. E. F., and Gharibshahi R., CFD simulation of biosurfactant flooding into a micromodel for enhancing the oil recovery, *Int J Chem Eng Appl (IJCEA)*, 2016.
- [20] Rostami P., Sharifi M., Aminshahidy B., and Fahimpour J., The effect of nanoparticles on wettability alteration for enhanced oil recovery: micromodel experimental studies and CFD simulation, *Petroleum Science*, vol. 16, no. 4, pp. 859-873, 2019.
- [21] Nandwani S. K., Chakraborty M., and Gupta S., Chemical flooding with ionic liquid and nonionic surfactant mixture in artificially prepared carbonate cores: A diffusion controlled CFD simulation, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 173, pp. 835-843, 2019.
- [22] Zhao J. and Wen D., Pore-scale simulation of wettability and interfacial tension effects on flooding process for enhanced oil recovery, *RSC advances*, vol. 7, no. 66, pp. 41391-41398, 2017.
- [23] Mehraban M. F., Rostami P., Afzali S., Ahmadi Z., Sharifi M., and Ayatollahi S., Brine composition effect on the oil recovery in carbonate oil reservoirs: A comprehensive experimental and CFD simulation study, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 191, p. 107149, 2020/08/01/ 2020.
- [24] Hemmat Esfe M., Esfandeh S., and Hosseinizadeh E., Nanofluid flooding in a randomized heterogeneous porous media and investigating the effect of capillary pressure and diffusion on oil recovery factor, *Journal of Molecular Liquids*, vol. 320, p. 113646, 2020/12/15/ 2020.
- [25] Hemmat Esfe M., Esfandeh S., and Hosseinizadeh E., Nanofluid flooding for enhanced oil recovery in a heterogeneous two-dimensional anticline geometry, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 118, p. 104810, 2020/11/01/ 2020.
- [26] خسروی ر، چهاردولی م، سیمجو م، مدل سازی عددی فرآیند آشام خودبخودی آب در یک بلوک مخزن شکافتار و بررسی اثر شرایط مرزی مختلف بر بازیافت نفت، مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، دوره ۵۱، شماره ۴
- [27] Mai A. and Kantzas A., Heavy oil waterflooding: effects of flow rate and oil viscosity, *Journal of Canadian Petroleum Technology*, vol. 48, no. 03, pp. 42-51, 2009.
- [28] Arab D., Kantzas A., and Bryant S. L., Effects of oil viscosity and injection velocity on imbibition displacement in sandstones, in *SPE Canada Heavy Oil Conference*, 2020
- [29] Golabi E., SEYEDIN A. F., and AYAT E. S., Chemical induced wettability alteration of carbonate reservoir rocks, 2009.
- [30] Manshad A. K., Rezaei M., Moradi S., Nowrouzi I., and Mohammadi A. H., Wettability alteration and interfacial tension (IFT) reduction in enhanced oil recovery (EOR) process by ionic liquid flooding, *Journal of Molecular Liquids*, vol. 248, pp. 153-162, 2017/12/01/ 2017.
- [31] Treiber L. and Owens W., A laboratory evaluation of the wettability of fifty oil-producing reservoirs, *Society of petroleum engineers journal*, vol. 12, no. 06, pp. 531-540, 1972.
- [32] van der Wijngaart W., Capillary pumps with constant flow rate, *Microfluidics and nanofluidics*, vol. 16, no. 5, pp. 829-837, 2014.