Applied Research in Chemical - Polymer Engineering

Vol. 5, No.4
page 3-13 ,winter 2022

Simulation of Hydrogel Injection Process in Micro-Model for Enhanced Oil Recovery: Investigation on Effective Parameters and Determination of Recovery Factor

Seyed Hosein Hayatolgheibi, Forough Ameli*

Tehran, Iran University of Science and Technology, School of Chemical, Petroleum and Gas Engineering, Petroleum Engineering Group, Postal Code: 13114-16846.

Abstract

Research Subject: Global energy demand is increasing, so enhanced oil recovery techniques have incorporated in production processes. Water flooding is a common technique in oil recovery processes. One of the major challenges in this technique is heterogeneity of the reservoir structure which results in increased water production and reduction of oil recovery factor. Moreover, long-term water flooding or using chemicals in this process may lead to the increased horizontal and vertical heterogeneities in the reservoir. Selective blocking of high permeability areas and consequently improved production from low permeability regions is important for increasing oil production from reservoir. In recent years, using hydrogels in injection processes, has been associated with various field successes, indicating the ability of these materials for selectively blocking the areas of high permeability and fractures. Hydrogels are injected after water or polymer flooding to conduct the injected fluid to low permeability areas.

Research Approach: In this paper, hydrogel injection process was simulated in glass micromodels using Comsol Multiphysics software. Hydrogels functionality was studied in low permeability areas in the reservoir. Moreover, water flooding process which is performed before gel injection was studied and optimized conditions of this process were obtained based on the effective parameters on this process. For this purpose, after model validation, sensitivity analysis was performed on the effective parameters on oil recovery factor and a mathematical model was presented to predict the oil recovery factor.

Main Results: Oil recovery factors obtained from experimental and simulation studies, were in good agreement with each other with absolute error values of 2.29% and 4.06%, for water injection and gel flooding, respectively. Effects of multiple parameters were studied in water flooding process, including injection rate, contact angle, and viscosity. Using ANOVA analysis, statistical models for calculating the oil recovery factor were proposed, which were in good agreement with the modeling results. The model parameters for hydrogel injection process were also reported.

key words

Enhance Oil Recovery

Phase-Field Method

Hydrogel

Simulation

Comsol Multiphysics

*To whom correspondence should be addressed:
Ameli@iust.ac.ir

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-07-03]

پژوهش‌های کاربردی
مهندسی شیمی - پلیمر

فصلنامه علمی - پژوهشی بین رشته ای
سال پنجم، شماره ۴، نسخه ۱
زمستان ۱۴۰۰ ، صفحه ۱۳-۳

شبیه‌سازی فرایند تزریق هیدروژل در میکرومدل به‌منظور ازدیاد برداشت نفت: بررسی پارامترهای موثر و پیش‌بینی ضریب بازیافت

سیدحسین حیات الغیبی، فروغ عاملی*

تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، گروه نفت، کد پستی ۱۶۸۴۶-۱۳۱۱۴

چکیـــده

موضـــوع تحقیـــق: تقاضـای جهانـی انـرژی رو بـه افزایـش اسـت، از ایـن رو، روش‌هـای ازدیـاد برداشـت در فرایندهـای تولیـد وارد شـده اسـت. یکـی از سـاده‌ترین و ارزان‌تریـن روش‌هـای بهبـود تولیـد، سـیلاب‌زنی اسـت. از جملـه چالش‌هـای مهـم در ایـن فراینـد، ناهمگونـی در سـاختار مخـزن اسـت کـه موجـب افزایـش تولیـد آب و کاهـش بازیافـت نفـت می‌شـود. عـلاوه بـر ایـن، سـیلاب‌زنی بلندمـدت آب یـا مـواد شـیمیایی در طـول فرآینـد، ممکـن اسـت بـه ناهمگونی‌هـای افقـی و عمـودی بیشـتر در مخـزن منجـر شـود. بـرای افزایـش بـازده در فرایندهـای ازدیـاد برداشـت، مسدودسـازی انتخابـی مناطـق بـا نفوذپذیـری بـالا و در نتیجـه بهبـود بهـره‌وری جـاروب در مناطـق بـا نفوذپذیـری کـم اهمیـت دارد. اسـتفاده از هیـدروژل در کنترل جریـان تزریقـی بـه ویـژه در سـال‌های اخیـر، بـا موفقیت‌هـای میدانـی مختلفـی همـراه بـوده اسـت کـه نشـان‌دهنده کارایـی بـالای ایـن روش اسـت. هیـدروژل بعـد از تزریـق آب یـا پلیمـر مـورد اسـتفاده قـرار می‌گیـرد و موجـب هدایـت سـیال تزریقـی بـه سـمت مناطـق کم‌تـراوا می‌شـود.

روش تحقیـــق: در ایـن مقالـه، فراینـد آزمایشـگاهی تزریـق هیـدروژل در میکرومدل شیشـه‌ای بـا اسـتفاده از نرم‌افـزار کامسـول و معـادلات فازی-میدانـی شبیه‌سـازی شـده اسـت و عملکـرد هیـدروژل در بهبـود ضریـب بازیافـت نواحـی کم‌تـراوا مـورد بررسـی قـرار گرفـت. همچنیـن سـیلاب‌زنی قبـل از تزریـق هیـدروژل کـه معمـولاً بـا آب یـا پلیمـر انجـام می‌گیـرد، بررسـی شـد و بـا تعییـن پارامترهـای موثـر بـر ضریـب بازیافـت سـعی شـد شـرایط بهینـه ایـن فراینـد بررسـی شـود. بـه ایـن منظـور، پـس از صحت‌سـنجی مـدل تهیـه شـده، حساسیت‌سـنجی پارامترهـای موثـر بـر ایـن فراینـد روی ضریـب بازیافـت انجـام شـد و مـدل ریاضـی‌ای جهـت تعییـن آن ارائـه شـد.

یافته‌هـــای تحقیـــق: فاکتـور بازیافـت نفـت حاصـل از مطالعـات تجربـی و شبیه‌سـازی، به‌ترتیـب بـا مقادیـر خطـای مطلـق ۲/۲۹ و ۴/۰۶ درصـد در فراینـد تزریـق آب و هیـدروژل به‌دسـت آمـد. اثـر پارامترهـای نـرخ تزریـق، زاویـه تمـاس و گرانـروی در ایـن فراینـد مـورد مطالعـه قـرار گرفـت. بـا اسـتفاده از تجزیـه و تحلیـل ANOVA ، مدل‌هـای آمـاری بـرای محاسـبه ضریـب بازیافـت نفـت ارائـه شـد کـه بـا نتایـج حاصـل از مدل‌سـازی مطابقـت خوبـی داشـتند. ثوابـت مـدل در فرآینـد تزریـق هیـدروژل نیـز گـزارش شـدند.

کلمـات کلیـدی

ازدیاد برداشت

روش فازی-میدانی

هیدروژل

شبیه‌سازی

کامسول

***مسئول مکاتبات:**
Ameli@iust.ac.ir

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-07-03]

۱ مقدمه

روش های متفاوتی برای تولید نفت به جا مانده در مخزن وجود دارد که بسته به ویژگی‌های مخزن، تجهیزات، قیمت نفت و استانداردهای موجود مورد استفاده قرار می‌گیرند. یک گروه از روش‌های ازدیاد برداشت، سیلاب‌زنی است که برای کنترل پروفیل جابه‌جایی و مسدودسازی کانال‌های با نفوذپذیری بالا استفاده می‌شوند. ترکیبی از پلیمر و سورفکتانت معمولاً منجر به جاروب بیشتر و افزایش کارایی جابه‌جایی سیال تزریقی می‌شود. این مواد می‌توانند همراه با ژل نیز تزریق شده و بازده را افزایش دهند. برای این کار ابتدا ژل تزریق می‌شود و با نفوذ به مناطق با تراوایی بالا و شکاف‌ها و انسداد آن‌ها موجب بهبود جاروب در محیط متخلخل می‌شود. در مرحله بعد می‌توان از سورفکتانت برای جابه‌جایی نفت باقی‌مانده استفاده کرد. تزریق ژل بیشتر در مواقعی که مشکل میان‌شکنی و انگشتی شدن در اثر وجود کانال‌ها وجود داشته باشد، مورد توجه قرار می‌گیرد. هیدروژل‌ها شبکه‌های سه‌بعدی پلیمری هستند که می‌توانند تا هزار برابر وزن خود آب را در ساختار خود حفظ کنند، بدون این که در آب حل شوند[۱]. توانایی هیدروژل‌ها در جذب آب در ساختار سه‌بعدی آن‌ها وابسته به گروه‌های عاملی آب‌دوست در ساختار آن‌هاست و مقاومت آن‌ها در برابر انحلال وابسته به اتصال‌دهنده‌های این ساختار سه‌بعدی است. نوع دیگری از ژل‌ها که مورد استفاده قرار می‌گیرند، ذرات ژل پیش‌ساخته هستند. این ژل‌ها بر روی سطح زمین ساخته می‌شوند و می‌توانند بسیاری از معایب ژل‌های درجا را بهبود دهند. برای نفوذ مناسب و انجام مسدودسازی، اندازه و شکل این ذرات باید با توجه به اندازه حفرات طراحی شوند. علاوه بر این باید توانایی کنترل زمان و مکان متورم شدن ذرات هیدروژل وجود داشته باشد [۲]. اخیراً مطالعه‌ای در مورد هیدروژل‌ها با خواص خودچینش به منظور بهبود خواص آن‌ها انجام شده است[۳].

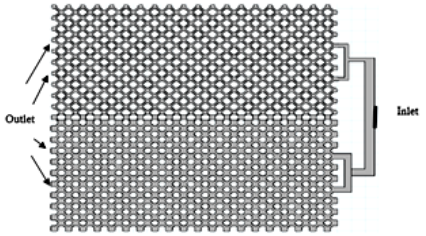
جهت بررسی خواص هیدروژل‌ها و همچنین یافتن شرایط تزریق و مخازن هدف می‌توان از مدل‌سازی این فرایند کمک گرفت. با استفاده از شبیه‌سازهای عددی می‌توان بدون توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی، تأثیر پارامترها را بر فرایند تزریق بررسی کرد و سپس شرایط بهینه به‌دست‌آمده را در فرایند تزریق اعمال کرد. امیری و حموده [۴] روش دسته سطوح و فازی-میدانی کان و هیلیارد را در نرم‌افزار کامسول در حالت چند فیزیکه برای یافتن مدل مناسب جریان دوفازی در محیط متخلخل مقایسه کردند. آن‌ها نشان دادند که پیش‌بینی‌های مدل فازی-میدانی با مقادیر تحلیلی و نتایج آزمایشگاهی تطابق کامل دارد. امیری و حموده [۵] از نرم‌افزار کامسول برای حل معادلات انتقال حرارت و مدل فازی-میدانی استفاده کردند و به‌وسیله آن فرآیندهای مختلف جابه‌جایی غیرهم‌دمای آب-نمک را در محیط متخلخل به هنگام ازدیاد برداشت نفت شبیه‌سازی کردند. وو و همکارن[۶] نتایج تزریق آزمایشگاهی هیدروژل را شبیه‌سازی کردند. مدل آن‌ها برمبنای کاهش تراوایی در اثر وجود هیدروژل‌ها در حفرات و جذب هیدروژل ها در سطح سنگ بود. طبق این مدل، لازمه ورود ذرات هیدروژل به گلوگاه‌ها، اعمال فشار آستانه‌ای است که بتواند موجب تغییر شکل در هیدروژل شود. از روش سطح تماس انتشاری، برای اولین بار به‌عنوان روشی عددی استفاده شد تا با معرفی یک یا چند متغیرفازی-میدانی پیوسته که تابعی از فضا و زمان بودند، مکان دقیق سطح تماس را ردیابی کنند. این روش به‌دلیل کارایی عددی و سازگاری فیزیکی، توجه بیشتری را به خود جلب کرد. اخیراً در معادله از روش دینامیک مولکولی برای شبیه‌سازی تزریق هیدروژل در محیط متخلخل استفاده شده است[۷]. همچنین رفتار نوع جدیدی از هیدروژل ها با خاصیت افزایش حجم به‌منظور مدیریت مخزن مورد بررسی قرار گرفته است و همچنین در این مطالعه در خصوص پارامترهای موثر در این فرایند بررسی‌هایی انجام شده است[۸]. فناوری‌های دیگری مبتنی بر انرژی سبز و بر پایه صمغ گواربه‌منظور سنتز هیدروژل‌ها در فرایند کنترل آب‌دهی مورد مطالعه قرار گرفته است[۹].

در این مقاله، فرایند تزریق هیدروژل در میکرومدل‌های شیشه‌ای که قبلاً توسط جمالی و همکاران [۱۰] به‌طور آزمایشگاهی انجام گرفته بود، با استفاده از نرم افزار کامسول و با استفاده از معادلات فازی-میدانی شبیه‌سازی شد و عملکرد هیدروژل در بهبود ضریب بازیافت نواحی کم‌تراوا مورد بررسی قرار گرفت. همچنین سیلاب‌زنی قبل از تزریق هیدروژل نیز به‌صورت دقیق مورد بررسی قرار گرفته و پارامترهای موثر بر این فرایند تعیین شد. به این منظور پس از صحت‌سنجی مدل تهیه‌شده، حساسیت‌سنجی پارامترهای موثر بر این فرایند روی ضریب بازیافت انجام شده و مدلی ریاضی برای پیش‌بینی ضریب بازیافت ارائه شد.

۲ فرایند آزمایشگاهی تزریق هیدروژل به میکرومدل

میکرومدل‌های شیشه‌ای به‌عنوان شبیه‌ساز محیط متخلخل به‌منظور درک بهتر فرایند جابه‌جایی در سیلاب‌زنی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مطالعه، از نتایج آزمایشگاهی جمالی و همکاران[۱۰] در تزریق هیدروژل به میکرومدل استفاده شده است. طرح‌واره میکرومدل به‌کاررفته در آزمایش‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. سایر جزئیات در کار چاپ شده توسط جمالی و همکاران ارائه شده است[۱۰].

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-07-03]



شکل ۱ طرح‌واره میکرومدل به‌کاررفته در فرایند تزریق هیدروژل توسط جمالی و همکاران[۱۰]
Figure 1. Schematic representation of micromodel used in hydrogel injection process by Jamali et al [10]

۳ مدل‌سازی فرایند تزریق

فرایند مدل‌سازی شامل دو بخش است. مرحله اول قبل از آغاز تزریق ذرات هیدروژل است که سطح تماس سیالات توسط سطوح فازی-میدانی دوفازی ردیابی می‌شود. مرحله دوم بعد از شروع فرایند تزریق ذرات هیدروژل است که سطح تماس بین فازها (آب تزریقی، نفت و ذرات هیدروژل) توسط مدل فازی-میدانی سه فازی مدل‌سازی می‌شود. در طول این فرایند جریان سیال آرام بوده و با استفاده از معادله نویر-استوکس مدل‌سازی می‌شود. نرم‌افزار مورد استفاده در فرایند شبیه‌سازی، کامسول است. در ادامه توضیحات مربوط به قسمت‌های مختلف مدل‌سازی ارائه شده است.

۳-۱ سطح تماس سیال-سیال

دو نظریه برای بررسی سطح جدایش دو سیال وجود دارد که عبارتند از مدل سطح تماس تیز(Sharp interface model) و مدل سطح تماس انتشاری(Diffuse interface model). یانگ، لاپلاس و گوس در اوایل قرن نوزدهم، سطح تماس بین دو سیال را به‌عنوان سطحی هندسی با ضخامت صفر در نظر گرفتند. بر اساس این نظریه به جای اینکه خواص سیالات با ناپیوستگی و جهش در سطح تماس همراه باشد، به‌صورت سریع ولی هموار در طول سطح تماس تغییر می‌کند[۱۱].

۳-۲ معادلات فازی- میدانی

علاوه بر معادلات بقای جرم، اندازه حرکت، در سال‌های اخیر استفاده از معادلات فازی-میدانی برای شبیه‌سازی جریان‌های چندفازی غیرقابل‌امتزاج مورد توجه قرار گرفته است. ایده‌ی اصلی این مدل معرفی پارامتری است که در طول سطح تماس به‌طور پیوسته تغییر کند، اما در محیط فازها ثابت باشد. معادله کان-هیلیارد شناخته‌شده‌ترین معادله‌ی فازی-میدانی است که در سامانه‌های دو و سه‌بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این معادله، تشکیل، تبدیل و انحلال در سطح تماس را مدل‌سازی می‌کند[۱۲]. این معادله یک راه‌حل وابسته به انحنا دارد (اثر گیبس-توماس) که استفاده از آن را برای شبیه‌سازی فرایندهای هسته‌زایی، تبخیر و بزرگ شوندگی (مانند آنچه در ژل بر اثر جذب آب رخ می‌دهد) کاربردی می‌کند. تجزیه‌وتحلیل دقت محاسبات مدل میدانی- فازی به این دلیل پیچیده است که همگرایی توسط سه عامل انجام می‌شود: اندازه مش، ضخامت سطح رابط و تحرک‌پذیری.

۳-۳-۱معادلات جریان سه‌فازی

این مدل برای دنبال کردن سطح تماس میان سه فاز غیرقابل‌امتزاج و تراکم‌ناپذیر استفاده می‌شود. در این مدل معادله نویر-استوکس برای بقای حرکت و معادله پیوستگی برای بقای جرم حل می‌شوند. سطح تماس سیالات با حل چهار معادله دیگر ردیابی می‌شود: دو معادله برای پوشش دادن معادلات فازی-میدانی و دو معادله برای پتانسیل شیمیایی. حرکت سطح تماس مایع-مایع بر مبنای حداقل‌سازی انرژی آزاد صورت می‌گیرد. معادله نویر استوکس به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\rho\frac{\partial u}{\partial t}+\rho(u.\nabla)u=\nabla.(-P+\mu(\nabla u+\nabla u^{T})-\frac{2}{3}\mu(\nabla.u))+F_{st}+F \qquad (۱)$$

برای دنبال کردن سطح تماس سه فاز غیرقابل‌امتزاج از مدل فازی-میدانی سه‌فازی بر مبنای مطالعات بویر و همکاران استفاده شده است. این مدل برای حل معادلات کان-هیلیارد به‌کار می‌رود

$$\frac{\partial\phi_i}{\partial t}+\nabla.(u\phi_i)=\nabla.(\frac{M_0}{\Sigma i}\nabla\eta_i) \qquad (۲)$$

$$\eta_i=\frac{4\Sigma T}{\varepsilon}\sum_{j\neq i}(\frac{1}{\Sigma j}(\frac{\partial F}{\partial\phi i}-\frac{\partial F}{\partial\phi i}))-\frac{3}{4}\varepsilon\sum_j\nabla^2\phi_i \qquad (۳)$$

۳-۳-۲ پیاده‌سازی مدل

به‌منظور مدل‌سازی، میکرومدلی که توسط جمالی و همکاران[۱۰] مورد استفاده قرار گرفت، در نرم افزار Corel Draw طراحی و به‌عنوان ورودی در نرم افزار کامسول استفاده شد. اطلاعات حفرات و گلوگاه‌های دو قسمت میکرومدل در جدول ۱ آورده شده است.

در هر تزریق ابتدا میکرومدل با فاز نفت آغشته می شود. سپس آب با دبی ۰/۰۰۰۵ ml/min از سمت راست به محیط متخلخل تزریق می شود. سطح ماتریکس از نظر ترشوندگی مشخص است. شرط مرز ورودی میکرومدل برای جریان آرام دبی سیال است که برابر با ۰/۰۰۰۵ ml/min است که تقریباً با دبی حرکت سیال در مخزن برابر است[۱۲]. برای شبیه‌سازی تزریق ژل ابتدا باید ژل‌ها در ورودی میکرومدل قرار بگیرند و

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-07-03]

جدول ۱ اطلاعات میکرومدل استفاده‌شده در آزمایش
Table 1. Information about micromodel used in the experiment

micromodel	dimension(cm)	porosity (%)	pores approximate diameter (μm)	Throat approximate diameter (μm)
high porosity layer	1*2	62	700	200
low porosity layer	1*2	50	480	150

سپس تزریق آب ادامه یابد. شرط مرزی خروجی برای جریان آرام مرز فشاری است. شرط مرزی خروجی برای معادلات فازی-میدانی امکان خروج تمامی فازها از خروجی سامانه است. دیواره‌ها به‌صورت سطوح جامد غیرقابل نفوذ است. در ابتدا کل محیط با نفت اشباع شده که شرط اولیه فیزیک فازی میدانی است. به این دلیل که سطح تماس در معادلات فازی-میدانی با یک ناحیه انتقالی نازک جایگزین می‌شود، میزان وضوح شبکه‌بندی باید به گونه‌ای باشد که امکان مطالعه فیزیک بر روی این لایه نازک مهیا باشد. مش‌بندی لایه مرزی(Boundary layer)در اینجا مورد استفاده قرار گرفت و در مدل سه‌فازی از مش‌بندی مثلثی استفاده شد. به‌منظور حل معادلات جریانی، شرایط مرزی و اولیه به شرح زیر است:

*** شرط مرزی ورودی**

شرط مرز ورودی میکرومدل برای جریان آرام، دبی سیال است که برابر با ۰/۰۰۰۵ ml/min است. جهت مدل‌سازی لازم است عمق حکاکی حفرات بر روی شیشه نیز به‌عنوان ورودی به نرم‌افزار کامسول داده شود تا سرعت حرکت سیال محاسبه شود. در این مطالعه، عمق حفرات در حدود ۱۶۰ میکرومتر است. سرعت ایجادشده در این نرخ تزریق تقریباً برابر با سرعت حرکت سیال در محیط مخزن است. برای روابط میدان فازی، فاز سیالی که وارد می‌شود به‌عنوان شرط ورودی تعریف می‌شود. پس از پایان فرایند تزریق آب لازم است با تعریف فیزیک جدید، نوع جریان به جریان سه‌فازی تغییر پیدا کرده و سپس ذرات هیدروژل در ورودی میکرومدل رسم شوند.

*** شرط مرزی خروجی**

شرط مرزی خروجی برای جریان آرام مرز فشاری است که برابر با ۱۰۵Pa در نظر گرفته شده است. شرط مرزی خروجی برای معادلات میدان فازی امکان خروج تمامی فازها از خروجی سامانه است. محل مرز خروجی در شکل ۱ نشان داده شده است.

*** دیواره‌ها**

دیواره‌ها به‌صورت سطوح جامد غیرقابل نفوذ و بی‌اثر خواهند بود. بنابراین سرعت سیال بر روی دیواره به‌صورت بدون لغزش و بدون نفوذ خواهد بود. شرط مرزی بدون لغزش به‌معنی برابری سرعت سیال در تماس با دیواره و دیواره‌های میکرومدل است. از آنجا که دیواره‌ها ثابت هستند، سرعت سیال در کنار دیواره‌ها نیز برابر با صفر خواهد بود ($u_f t^{\cdot}=0$). همچنین از آنجا که دیواره‌ها نفوذپذیری ندارند، سیال اجازه عبور از دیواره‌ها را نخواهد داشت. شرط غیرقابل‌نفوذ بودن دیواره‌ها نیز به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$n^{\cdot}=0.\ u_f \qquad (۴)$$

که n ˙بردار نرمال سطح است. همچنین در سطح تماس دوسیال، سرعت سیالات با همدیگر برابر است .($u_{f۱}=u_{f۲}$)

*** شرایط اولیه**

دمای اولیه سیال برابر با دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) در نظر گرفته شده است. فشار اولیه سیال نیز برابر با فشار محیط است. همچنین سیال در ابتدای کار در هیچ جهتی حرکت نمی‌کند. در ابتدا کل محیط با نفت اشباع شده که شرط اولیه فیزیک میدان فازی خواهد بود.

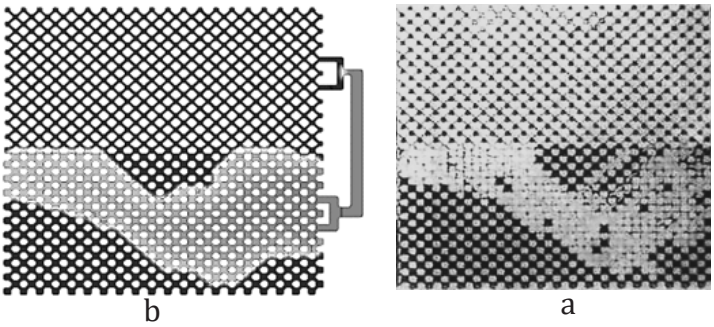
۴ بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه جابه‌جایی نفت توسط آب فرایندی با فیزیک فازی_میدانی دوفازی شبیه‌سازی شده است. سپس نتایج آن به‌عنوان ورودی شرایط اولیه شبیه‌سازی سه‌فازی (شامل سه فاز آب، نفت و ذرات هیدروژل) مورد استفاده قرار گرفته است. بعد از بررسی تطبیق نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی، تأثیر پارامترهای مختلف سیال و میکرومدل بر ضریب بازیافت مورد مطالعه قرار گرفته و میزان ضریب بازیافت در مرحله تزریق آب پیش‌بینی شده است.

۴-۱ اعتبارسنجی مدل دوفازی

نتیجه آزمایشگاهی فرایند سیلاب‌زنی در میکرومدل که توسط جمالی و همکاران [۱۳] انجام شده ، در شکل ۲-الف نشان داده شده است. میان‌شکنی آب به‌عنوان زمان پایان تزریق در نظر گرفته شده است. نتیجه این مدل‌سازی در شکل ۲-ب آورده شده است. همان‌طور که در این دو شکل مشخص است، تطابق بسیار خوبی بین نتایج مدل‌سازی و مطالعه آزمایشگاهی وجود دارد. ضخامت سطح تماس در این مدل‌سازی معادل $h_{max}/۵$ به‌دست آمده است که h_{max} طول بزرگ‌ترین مش در دامنه مدل‌سازی و مقدار آن ۲۳۰ میکرومتر است. پارامتر تنظیم‌کننده انتقال‌پذیری بین فازها نیز مقدار

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-07-03]



شکل ۲ نتایج سیلاب‌زنی در میکرومدل a) آزمایشگاهی[۱۳] و b) مدل‌سازی
Figure 2. Results of water flooding in micromodel[13] (a) experimental and modeling (b)

پیش‌فرض نرم‌افزار (برابر با یک) در نظر گرفته شده که برای گستره وسیعی از مدل‌ها مناسب است.
ضریب بازیافت آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی در جدول ۲ ارائه شده است. درصد خطای حاصل ٪ ۲/۲۹ است. همان‌طور که مشخص است در فرایند جابه‌جایی توسط آب، از آنجا که اندازه حفرات و گلوگاه‌های قسمت پایین میکرومدل بزرگ‌تر است، نیروی موئینگی کمتر مرزی با اندازه مش متوسط است. هرچه اندازه شبکه‌بندی ریزتر شود، مدت زمان اجرای مدل و دقت نتایج افزایش می‌یابد. از یک اندازه مش به بعد میزان افزایش دقت مدل در برابر زمان اجرای آن قابل چشم‌پوشی است. در جدول ۳ نتایج شبیه‌سازی با اندازه مختلف شبکه‌بندی به همراه درصد خطای هر یک نسبت به نتایج آزمایشگاهی ارائه شده است.

جدول ۲ مقایسه نتایج مدل‌سازی دوفازی و تزریق آزمایشگاهی
Table 2. Comparison of results of two phase modeling and experimental injection

	high permeability layer	low permeability layer	total
Experimental recovery factor (%)	51.46	0	31.84
Simulation recovery factor (%)	52.63	0	32.57
Error %	2.29	0	2.29

بوده و سیال تزریقی تمایل بیشتری به حرکت از این ناحیه دارد. بعد از پدیده میان‌شکنی تزریق آب متوقف شده و ذرات هیدروژل تزریق می‌شوند که نتایج آن در ادامه آورده شده است.

۴-۲ استقلال نتایج از شبکه‌بندی

شبکه‌بندی استفاده‌شده در مدل ساخته‌شده با نرم افزار کامسول برای مدل دوفازی به‌صورت لایه‌های

۴-۳ بررسی تأثیر عوامل مختلف بر ضریب بازیافت

در ادامه تأثیر پارامترهای مختلف بر ضریب بازیافت نفت بررسی می‌شود و تلاش می‌شود که شرایط بهینه برای سیلاب‌زنی قبل از تزریق هیدروژل، مشخص شود.

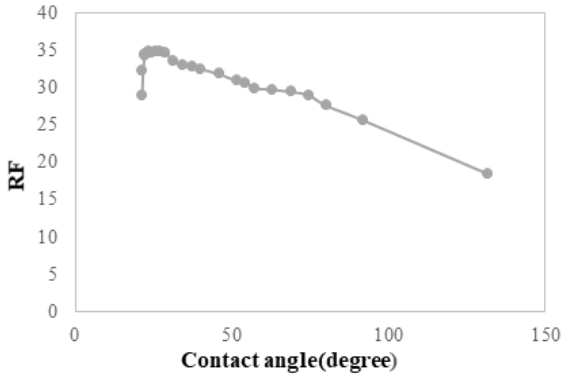
۴-۳-۱ زاویه تماس

ترشوندگی با کمیت زاویه تماس تعریف می‌شود که از

جدول ۳) تأثیر اندازه مش در نتیجه مدل‌سازی
Table 3. Effect of mesh size on the modeling results

t/t_{Normal}	Error %	So @ break throat time	mesh density	Mesh size
57..0	8.52	34.55	94184	Coarser
0.66	5.15	33.48	107866	Coarse
1	2.29	32.57	122420	Normal
1.36	1.51	33.32	150549	Fine
1.79	1.16	32.21	174938	Finer

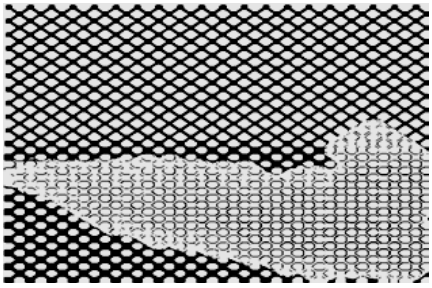
[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-07-03]



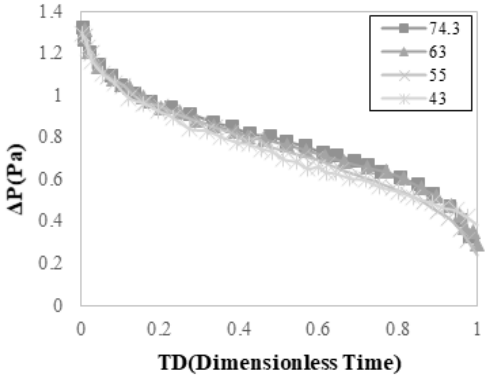
شکل ۳ ضریب بازیافت در زاویه تماس‌های مختلف
Figure 3.Oil recovery factor at different contact angles

میان فاز چگال‌تر اندازه‌گیری می‌شود. شکل ۳ ضریب بازیافت نفت را در زاویه‌های تماس مختلف در زمان میان‌شکنی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، در زاویه تماس ۲۵/۷ مقدار برداشت نفت ٪ ۳۴/۹ خواهد بود که مقدار بهینه بازیافت نفت است. شکل ۴ الگوی جاروب را در این زاویه تماس نشان می‌دهد. با فاصله گرفتن از این زاویه بهینه، میزان ضریب بازیافت کاهش می‌یابد. در حالتی که مدل بسیار آب‌دوست باشد، آب تزریقی تمایل بالایی به حرکت از روی دیواره‌ها خواهد داشت. این عملکرد در محیط متخلخل باعث می‌شود که نفت در داخل حفرات بزرگ تشکیل قطرات غیرپیوسته‌ای را بدهد که قابلیت بازیافت ندارند. با افزایش زاویه تماس تا ۲۵ درجه، آب تزریقی بیشتر وارد فضای درونی حفرات می‌شود و نفت را جابه‌جا می‌کند و بیشترین میزان نفت بازیافتی در این زاویه تماس اتفاق می‌افتد.

با افزایش زاویه تماس، آب تمایل خود برای جابه‌جا کردن نفت در نزدیکی سطح میکرومدل را از دست می‌دهد که موجب کاهش تعداد حفرات جاروب شده توسط آب و در نتیجه کاهش ضریب بازیافت می‌شود. مدل‌های آب‌دوست بازده بهتری نسبت به سنگ‌های با ترشوندگی متوسط و نفت‌دوست را از خود نشان می‌دهند. شکل ۵ تغییرات اختلاف فشار تزریق در طول میکرومدل در ترشوندگی‌های مختلف را نشان می‌دهد. از آنجا که زاویه تماس بر نیروی مویینگی موثر است، نمودارها با افزایش زاویه تماس و کاهش نیروی



شکل ۴ الگوی جاروب در زاویه تماس بهینه (۲۵/۷)
Figure 4. Sweep pattern in optimum contact angle (25.7)



شکل ۵ افت فشار در طول میکرومدل برای زاویه تماس‌های مختلف
Figure 5. Pressure drop across micromodel in different contact angles

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-07-03]

مویینگی، اندکی به سمت بالا حرکت می‌کنند.

۴-۳-۲ نرخ تزریق

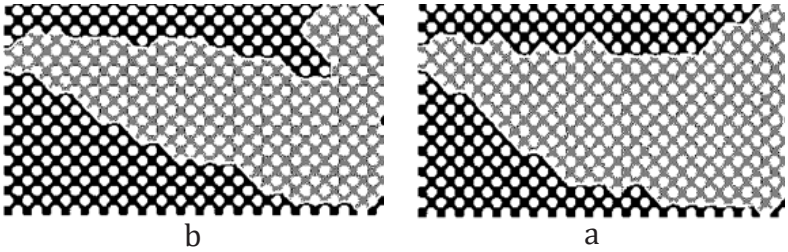
در نتیجه افزایش نرخ تزریق، نیروی گرانرو بر مویینگی غلبه کرده و تمایل سیال برای عبور از کانال‌های متفاوت و پخش‌شدن در سطح گسترده‌تری از میکرومدل افزایش می‌یابد. ضریب بازیافت بهینه در دبی cc/min $۱۰/۵\times۱۰^{-۴}$ و معادل ٪ ۳۷/۹ است. اگر نرخ تزریق سیال جابه‌جا کننده از این مقدار بهینه فاصله بگیرد، ضریب بازیافت کاهش خواهد یافت. همان‌طور که بیان شد، انگشتی‌شدن گرانرو وابسته به نسبت گرانروی دو سیال و سرعت تزریق است. با افزایش نرخ تزریق، سرعت سیال بیشتر شده و در اثر پدیده انگشتی‌شدن گرانرو، جاروب سیال غیریکنواخت‌تر می‌شود و سیال تزریقی مناطقی را به‌صورت جاروب‌نشده باقی گذاشته و به خروجی سامانه می‌رسد. بازیافت نفت با افزایش دبی ابتدا افزایش یافته و در دبی‌های بالاتر سیر نزولی به خود می‌گیرد. زمانی که دبی تزریق از cc/min $۳/۵\times۱۰^{-۴}$ کمتر می‌شود، با کاهش بیشتر نرخ تزریق، ضریب بازیافت رفتار افزایشی نشان می‌دهد. شکل‌های ۶ الف و ب الگوی جاروب در دو نرخ تزریق cc/min $۳/۵\times۱۰^{-۴}$ و cc/min ۲×۱۰^{-۴} در زمان میان‌شکنی را نشان می‌دهد. زمانی که دبی در این محدوده افزایش پیدا می‌کند، سیال‌های وارد شده از دو مجرای ورودی نوعی تمایل به انگشتی‌شدن را از خود نشان می‌دهند که باعث می‌شود ناحیه بین دو نقطه تزریق به‌خوبی جاروب نشود.

۴-۴ مدل آماری ضریب بازیافت بدون هیدروژل

با توجه به حساسیت‌سنجی انجام‌گرفته روی پارامترهای موثر بر ضریب بازیافت که از میان آن‌ها نرخ تزریق و زاویه تماس در اینجا بیان شد، چهار پارامتر نرخ تزریق، زاویه تماس، گرانروی نفت و گرانروی سیال تزریقی به‌عنوان پارامترهای موثر بر ضریب بازیافت در نظر گرفته شدند. این پارامترها به‌عنوان پارامترهای طراحی مدل در نظر گرفته شدند. تحلیل ها به کمک نرم‌افزار Design Expert صورت گرفت. نتایج تحلیل واریانس ANOVA که بیانگر پراکندگی مدل و میزان دقت آن است، در جدول ۴ ارائه شده است. مقدار پارامتر P کمتر از ۰/۰۰۰۱ است که نشان‌دهنده درجه اطمینان بسیار بالای مدل است. در صورتی که مقدار P برای هریک از روابط کمتر از ۰/۰۵ باشد، مدل گزارش‌شده از لحاظ آماری معنادار است. ضرایب مربوط به هریک از پارامترها در جدول ۵ ارائه شده است.

$$RF= AT + Bq + C\Theta + D\mu_o + E\mu_w + FTq + GT\Theta + HT\mu_o + JT\mu_w + Kq\Theta + Lq\mu_o + Mq\mu_w + N\Theta\mu_o + O\Theta\mu_w + P\mu_o\mu_w + Z \quad (۵)$$

شکل ۷ پیش‌بینی مدل در مقایسه با نتایج مدل‌سازی را نشان می‌دهد. با توجه به قرارگیری داده‌ها در اطراف خط با شیب یک می‌توان مشاهده کرد که نتایج مدل‌سازی و مدل پیش‌بینی شده تطبیق قابل‌قبولی با هم دارند.



شکل ۶ جاروب در نرخ تزریق a) cc/min ۰/۰۰۰۲ و b) cc/min ۰/۰۰۰۳۵
Figure 6. Sweep pattern for a) 0.0002 cc/min and b) 0.00035 cc/min

جدول۴ نتایج تحلیل ANOVA برای ضریب بازیافت در حالت بدون هیدروژل
Table 4. ANOVA analysis of variance to determine oil recovery factor in water flooding

	sum of square	dF	Mean of the square error	F value	P value
Model	51.95	5	10.39	1020	<0.00001
Residuals	26.47	26	1.02		

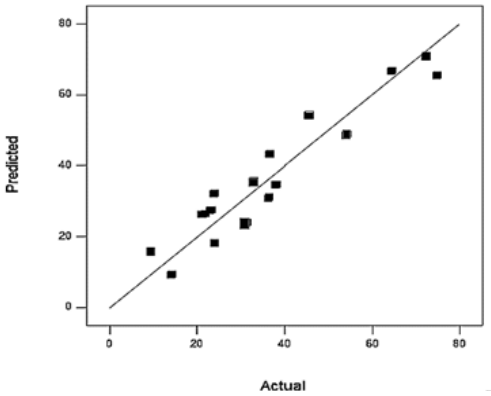
۴-۵ شبیه‌سازی تزریق هیدروژل

همان‌طور که در قسمت‌های قبلی اشاره شد، در مدل آزمایشگاهی[۶, ۹] بعد از تزریق آب به‌عنوان فاز تولید ثانویه، در مرحله ازدیاد برداشت از هیدروژل‌های ازپیش‌ساخته‌شده استفاده شده است. تزریق هیدروژل‌ها بعد از میان‌شکنی آغاز می‌شود و با مسدودکردن مسیر اصلی حرکت آب، جریان تزریقی را به مناطق جاروب‌نشده منتقل می‌کند. در طول فرایند

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-07-03]

جدول ۵ ضرایب پارامترهای مربوط به مدل
Table 5. Coefficients of the proposed model using design expert

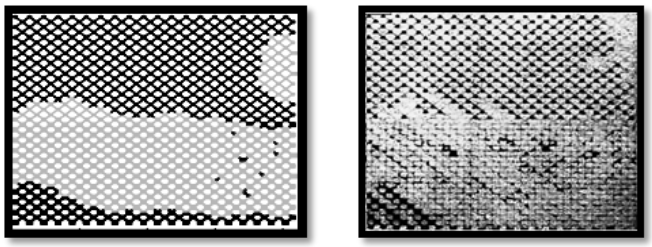
Coefficient	Parameter	Coefficient	Parameter	Coefficient	Parameter
A	0.12	G	0.016	M	1.77
B	3.52	H	-0.0015	N	6.7
C	-10.24	J	-0.00343	O	1.32
D	-9.65	K	6.6	P	-0.45
E	5.34	L	0.73	Z	37.7
F	-0.009687				



شکل ۷ مقایسه پیش‌بینی ضریب بازیافت با نتایج مدل‌سازی
Figure 7. Anova actual and predicted result

تزریق، ذرات ژل ممکن است دچار شکستگی یا تغییر شکل شوند. شکل ۸-الف و ب نتیجه تزریق هیدروژل را توسط جمالی و همکاران [۹] و براساس مدلسازی با استفاده از نرم‌افزار کامسول نشان می‌دهد. با مقایسه این دو شکل می‌توان دریافت که تطبیق بسیار خوبی بین نتیجه آزمایشگاهی و مدل‌سازی حاصل شده است. همان‌طور که مشخص است استفاده از هیدروژل‌ها موجب حرکت آب تزریقی به دیگر بخش‌های میکرومدل شده است و مناطقی از ناحیه کم‌تراوا نیز جاروب شده‌اند که کارایی ذرات هیدروژل را نشان می‌دهد. برای مدل‌سازی این فرایند در نرم‌افزار کامسول، اندازه ضخامت سطح تماس terpf.ep_default/۵٫۶۵ به‌دست آمده است. terpf.ep_default ضخامت سطح تماس پیش‌فرض کامسول است که در این مدل‌سازی برابر با ۶۳۱ میکرومتر است.

مقدار انتقال‌پذیری بین فازها معادل $5\times10^{-13}/m^3$ به‌دست آمده است. جدول ۶ نتایج مربوط به ضریب بازیافت نفت را در فرایند تزریق آزمایشگاهی و مدل‌سازی نشان می‌دهد. درصد خطای مدل‌سازی در کل میکرومدل ٪ ۴/۰۶ است که مقدار قابل قبولی است. میزان بازیابی با مدل‌سازی در هردو ناحیه کم‌تراوا و پرتراوا کمتر از مقدار آزمایشگاهی است. در شکل ۹ نمودار ضریب بازیافت برای قسمت با تراوایی بالا، قسمت با تراوایی پایین و کل مدل در زمان تزریق نشان داده شده است.

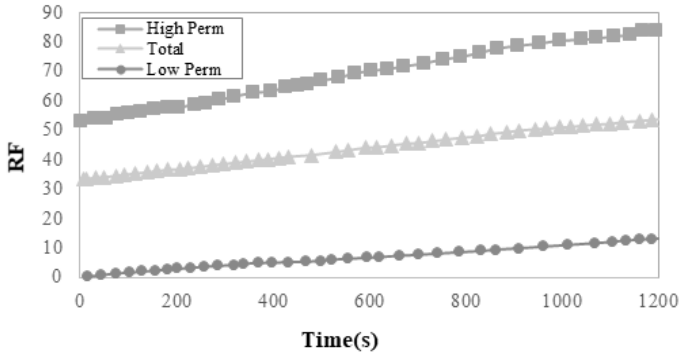


شکل ۸ مقایسه نتایج تزریق هیدروژل در a) مطالعه آزمایشگاهی[۹] b) مدل‌سازی
Figure 8. Results of hydrogel flooding in micromodel a) experimental and modeling (b)

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-07-03]

جدول ۶ مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی تزریق هیدروژل
Table6. Laboratory and modelling recovery factors

	High Permeable	Low permeable	Total
Lab recovery factor	87.54	13.79	57.05
Model recovery factor	84.02	13.22	53.99
Error, %	4.02	4.13	4.06



شکل ۹ نمودار ضریب بازیافت در طول تزریق هیدروژل
Figure 9. Recovery factor during hydrogel flooding

۵ نتیجه‌گیری

در این مطالعه فرایند آزمایشگاهی تزریق هیدروژل به میکرومدل شیشه‌ای با استفاده از نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی شد و عملکرد هیدروژل در بهبود ضریب بازیافت نواحی کم‌تراوا مورد بررسی قرار گرفت. همچنین سیلاب‌زنی قبل از تزریق هیدروژل شبیه‌سازی شد و با تعیین پارامترهای موثر بر ضریب بازیافت سعی شد، شرایط بهینه این فرایند بررسی شود. از جمله نتایج این شبیه‌سازی عبارتند از:

۱-نتایج مدل‌سازی فرایند سیلاب‌زنی و تزریق هیدروژل تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. درصد خطای مربوطه به‌ترتیب ٪۲/۲۹ و ٪ ۴/۰۶ است.

۲-در شبیه‌سازی سیلاب‌زنی ضخامت سطح تماس معادل ۵/hmax به‌دست آمد که مقدار ، ۲۳۰ میکرومتر است. پارامتر تنظیم‌کننده انتقال‌پذیری بین فازها نیز معادل یک در نظر گرفته شد. در شبیه‌سازی سه‌فازی اندازه ضخامت سطح تماس ۵,۶۵/terpf.ep_default حاصل شد. terpf.ep_default ضخامت سطح تماس و معادل ۶۳۱ میکرومتر است.

۳-چهار پارامتر نرخ تزریق، زاویه تماس، گرانروی نفت و گرانروی سیال تزریقی به‌عنوان پارامترهای موثر بر ضریب بازیافت در فرایند سیلاب‌زنی درنظر گرفته شدند. از این میان، بیشترین تأثیر را زاویه تماس و کم‌ترین اثر را دما دارد.

۴-در مدل مربوط به پیش‌بینی ضریب بازیافت در سیلاب‌زنی اثر متقابل پارامترها هم در نظر گرفته شد که از این میان، بیشترین اثر متقابل مربوط به گرانروی و زاویه تماس و کم‌ترین آن مربوط به دما و نرخ تزریق است.

علائم و نشانه ها

پارامتر	واحد	پارامتر	واحد
ضخامت سطح تماس (Є)	μm	تحرک پذیری (M)	$J^{-1}.m^{5}.S^{-1}$
نیروی خارجی (F)	N	گرانروی (μ)	Pa.s
انرژی آزاد (f)	J	نرخ تزریق (q)	cc/min

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-07-03]

مراجع

1. Pu, J., Zhou J, Chen Y&Bai B., Development of Thermotransformable Controlled Hydrogel for Enhancing Oil Recovery. Energy & Fuels, 2017 ,13609-13600 ,(12)31
2. Imqam, A. and Bai B., Optimizing the strength and size of preformed particle gels for better conformance control treatment. Fuel, -148,178 2015 ,185
3. Ren, P., Li, J., Zhao, L., Wang, A., Wang, M., Li, J, Bai, S. Dipeptide, Self-Assembled Hydrogels with Shear-Thinning and Instantaneous Self-Healing Properties Determined by Peptide Sequences. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020 ,21440-21433 ,(19)12
4. Amiri, H.A. and Hamouda A.A., Evaluation of level Set and Phase Field Methods in Modeling Two Phase Flow with Viscosity Contrast through Dual-Permeability Porous Medium. International Journal of Multiphase Flow, ,52 2013 ,34-22
5. Amiri, H.A. and Hamouda A.A., Pore-Scale Modeling of Non-Isothermal Two Phase Flow in 2D Porous Media: Influences of Viscosity, Capillarity, Wettability and Heterogeneity. International Journal of Multiphase Flow, ,61 2014 ,27-14
6. Wu, Y.-S. and B. Bai. Modeling Particle Gel Propagation in Porous Media. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2008
7. Liu, J., Li, L., Xu, Z., Chen, J., & Dai, C. Self-Growing Hydrogel Particles with Applications for Reservoir Control: Growth Behaviors and Influencing Factors. The Journal of Physical Chemistry B, 2021 ,9878-9870 ,(34)125.
8. El-Hoshoudy, A. N. Experimental and Theoretical Investigation of Glycol-Based Hydrogels through Waterflooding Processes in Oil Reservoirs Using Molecular Dynamics and Dissipative Particle Dynamics Simulation. ACS omega, 2021
9. Elsaeed, S. M., Zaki, E. G., Omar, W. A., Ashraf Soliman, A., & Attia, A. M., Guar Gum-Based Hydrogels as Potent Green Polymers for Enhanced Oil Recovery in High-Salinity Reservoirs. ACS omega, ,23431-23421 ,(36)6 2021
10. Jamali A,Ameli F And Moghbeli M.R. MSc Thesis, Iran, Synthesis and characterization of pH-sensitive poly hydrogel microspheres containing silica nanoparticles For Enhanced Oil Recovery In Petroleum Reservoir, Feb 2012
11. Mauri, R., Non-Equilibrium Thermodynamics in Multiphase Flows, Springer Science & Business Media, 2012
12. Akhlaghi Amiri, H.A. Pore-level Influence of Contact Angle on Fluid Displacements in Porous Media. COMSOL Conference, 2014
13. Jamali, A., Moghbeli M.R. & Ameli F., Synthesis and Characterization of PH-sensitive poly (Acrylamide-co-Methylenebisacrylamide-co-Acrylic acid) Hydrogel Microspheres Containing Silica Nanoparticles: Application in Enhanced Oil Recovery Processes. Journal of Applied Polymer Science, ,491-484 ,(12)137 2019

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-07-03]