Applied Research in Chemical - Polymer Engineering

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

key words

Enhance Oil Recovery

Phase-Field Method

Hydrogel

Simulation

Comsol Multiphysics

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 regions is important for increasing oil 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.

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

پژو،ش می کاربردی پر مہندسی شیمی - پلیمر

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

سيدحسين حيات الغيبي، فروغ عاملي*

تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، گروه نفت، کد پستی 18148-12114



موضوع تحقیق: تقاضای جهانی انرژی رو به افزایش است، از این رو، روش های از دیاد برداشت در فرایندهای تولید وارد شده است. یکی از ساده ترین و ارزان ترین روش های بهبود تولید، سیلابزنی است. از جمله چالش های مهم در ایـن فراینـد، ناهمگونـی در سـاختار مخـزن اسـت کـه موجـب افزایـش تولیـد آب و كاهـش بازيافـت نفـت مىشـود. عـلاوه بـر ايـن، سـيلابزنى بلندمـدت آب يـا مواد شیمیایی در طول فرآیند، ممکن است به ناهمگونیهای افقی و عمودی بیشتر در مخزن منجر شود. برای افزایش بازده در فرایندهای ازدیاد برداشت، مسدودسازی انتخابی مناطق با نفوذپذیری بالا و در نتیجه بهبود بهرموری جاروب در مناطق با نفوذپذیری کم اهمیت دارد. استفاده از هیدروژل در کنترل جریان تزریقی به ویژه در سالهای اخیر، با موفقیتهای میدانی مختلفی همراه بوده است که نشاندهنده کارایی بالای این روش است. هیدروژل بعد از تزریق آب یا پلیمر مورد استفاده قرار می گیرد و موجب هدایت سیال تزریقے ، به سمت مناطق کمتراوا می شود. روش تحقیق: در این مقاله، فرایند آزمایشگاهی تزریق هیدروژل در میکرومدل

شیشهای با استفاده از نرمافزار کامسول و معادلات فازی-میدانی شبیهسازی شده است و عملکرد هیدروژل در بهبود ضریب بازیافت نواحی کمتراوا مورد بررسی قرار گرفت. همچنین سیلابزنی قبل از تزریق هیدروژل که معمولا با آب یا پلیمر انجام می گیرد، بررسی شد و با تعیین پارامترهای موثر بر ضريب بازيافت سعى شد شرايط بهينه اين فرايند بررسى شود. به اين منظور، پـس از صحتسنجی مـدل تهیـه شـده، حساسیتسـنجی پارامترهای موتر بر این فرایند روی ضریب بازیافت انجام شد و مدل ریاضی ای جهت تعیین أن ارائه شد.

یافته های تحقیق: فاکتور بازیافت نفت حاصل از مطالعات تجربی و شبیهسازی، بهترتیب با مقادیر خطای مطلق ۲/۲۹ و ۴/۰۶ درصد در فرایند تزريـق آب و هيـدروژل بهدسـت آمـد. اثـر پارامترهـاي نـرخ تزريـق، زاويـه تمـاس و گرانروی در این فرایند مورد مطالعه قرار گرفت. با استفاده از تجزیه و تحلیل ANOVA ، مدل های آماری برای محاسبه ضریب بازیافت نفت ارائه شد که با نتایج حاصل از مدلسازی مطابقت خوبی داشتند. ثوابت مدل در فرآیند Ameli@iust.ac.ir ترريق هيدروژل نيز گزارش شدند.

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

كلمسات كليسدي ازدیاد برداشت روش فازى-ميداني هيدروژل شبيەسازى كامسول

*مسئول مكاتبات:

۱ مقدمه

روش های متفاوتی برای تولید نفت به جا مانده در مخرن وجرد دارد که بسته به ویژگیهای مخزن، تجهیـزات، قیمـت نفت و اسـتانداردهای موجود مورد اسـتفاده قـرار می گیرنـد. یـک گـروه از روش هـای ازدیـاد برداشـت، سیلابزنی است که برای کنترل پروفیل جابهجایی و مسدودسازی کانال های با نفوذپذیری بالا استفاده می شوند. ترکیبی از پلیمر و سورفکتانت معمولاً منجر به جاروب بیشتر و افزایش کارایی جابه جایی سیال تزریقی می شود. این مواد می توانند همراه با ژل نیز تزریق شده و بازده را افزایش دهند. برای این کار ابتدا ژل تزریق می شود و با نفوذ به مناطق با تراوایی بالا و شکافها و انسداد آنها موجب بهبود جاروب در محيط متخلخل می شود. در مرحله بعد می توان از سور فکتانت برای جابهجایی نفت باقیمانده استفاده کرد. تزریق ژل بیشتر در مواقعی که مشکل میان شکنی و انگشتی شـدن در اثـر وجـود كانالهـا وجـود داشـته باشـد، مـورد توجــه قــرار میگیـرد. هیدروژلهـا شــبکههای ســهبعدی پلیمری هستند که میتوانند تا هزار برابر وزن خود آب را در ساختار خود حفظ کنند، بدون این که در آب حـل شـوند[۱]. توانایـی هیدروژلهـا در جـذب آب در ساختار سهبعدی آن ها وابسته به گروههای عاملی آبدوست در ساختار آنهاست و مقاومت آنها در برابر انحلال وابسته به اتصال دهنده ای این ساختار سهبعدی است. نوع دیگری از ژلها که مورد استفاده قـرار میگیرنـد، ذرات ژل پیشسـاخته هسـتند. ایـن ژلهـا بر روی سطح زمین ساخته می شوند و می توانند 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]. اخیرا مطالعهای در مورد هیدروژل ها با خواص خودچینش به منظور بهبود خواص آن ها انجام شده است[۳].

جهت بررسی خواص هیدروژل ها و همچنین یافتن شرایط تزریق و مخازن هدف می توان از مدل سازی این فرایند کمک گرفت. با استفاده از شبیه سازهای عددی می توان بدون توجه به محدودیت های آزمایشگاهی، تأثیر پارامترها را بر فرایند تزریق بررسی کرد و سپس شرایط بهینه به دست آمده 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. آن ها نشان دادند که پیش بینی های مدل فازی-میدانی با مقادیر تطیلی و نتایج آزمایشگاهی تطابق کامل دارد. امیری و حموده [۵] از نرمافزار کامسول برای حل معادلات

انتقال حرارت و مدل فازى-ميداني استفاده كردند و بهوسیله آن فرآیندهای مختلف جابهجایی غیرهمدمای آب-نمـک را در محيـط متخلخـل بـه هنـگام ازديـاد برداشـت نفت شبیهسازی کردند. وو و همکارن[۶] نتایج تزریق آزمایشـگاهی هیـدروژل را شبیهسـازی کردنـد. مـدل آنهـا برمبنای کاهش تراوایی در اثر وجود هیدروژلها در حفرات و جذب هیدروژل ها در سطح سنگ بود. طبق ایـن مـدل، لازمـه ورود ذرات هیـدروژل بـه گلوگاههـا، اعمـال 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. اخیرا 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 افزايش حجم بهمنظور مديريت مخزن مورد بررسي قرار گرفته است و همچنین در این مطالعه در خصوص پارامترهای موثر در این فرایند بررسیهایی انجام شده است[۸]. فناوری های دیگری مبتنی بر انرژی سبز و بر پایه صمغ گواربهمنظور سنتز هیدروژلها در فرایند کنتـرل آبدهـی مـورد مطالعـه قـرار گرفتـه اسـت[۹]. در این مقاله، فرایند تزریق هیدروژل در میکرومدلهای شیشهای که قبلا توسط جمالی و همکاران [۱۰] بهطور آزمایشـگاهی انجـام گرفتـه بـود، بـا اسـتفاده از نـرم افـزار کامسول و با استفاده از معادلات فازی-میدانی شبیهسازی شد و عملکرد هیدروژل در بهبود ضریب بازیافت نواحی كمتراوا مورد بررسي قرار گرفت. همچنين سيلابزني قبل از تزریق هیدروژل نیز به صورت دقیق مورد بررسی قرار گرفته و پارامترهای موثر بر این فرایند تعیین شد. به این منظور پس از صحتسنجی مدل تهیه شده، حساسیت سنجی پارامتر های موثر بر این

فرایند روی ضریب بازیافت انجام شده و مدلی ریاضی برای پیشبینی ضریب بازیافت ارائه شد.

۲ فراینـــد آزمایشـــگاهی تزریـــق هیـــدروژل بـــه میکرومـــدل

میکرومدل های شیشهای به عنوان شبیه ساز محیط متخلخل به منظور درک بهتر فرایند جابه جایی در سیلاب زنی مورد استفاده قرار می گیرند. در این مطالعه، از نتایج آزمایشگاهی جمالی و همکاران [۱۰] در تزریق هیدروژل به میکرومدل استفاده شده است. طرحواره میکرومدل به کاررفته در آزمایش ها در شکل ۱ نشان داده شده است. سایر جزئیات در کار چاپ شده توسط جمالی و همکاران ارائه شده است[۱۰].



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

مے شہود:

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 تزریقی 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 فازی مدلسازی میشود. نرمافزار مورد استفاده در فرایند مبیه سازی، کامسول است. در ادامه توضیحات مربوط به قسمتهای مختلف مدلسازی ارائه شده است. ستال میال سیال سیال

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u.\nabla)u = \nabla (-P + \mu(\nabla u + \nabla u^{T}) - \frac{2}{3}\mu(\nabla u)) + F_{st} + F \quad (1)$$
 Sha

برای دنبال کردن سطح تماس سه فاز غیرقابل امتزاج از مدل فازی-میدانی سهفازی بر مبنای مطالعات بویر و همکاران استفاده شده است. این مدل برای حل معادلات کان-هیلیارد به کار می رود

است کـه همگرایـی توسـط سـه عامـل انجـام میشـود: انـدازه مـش، ضخامـت سـطح رابـط و تحرک پذیـری.

ایـن مـدل بـرای دنبـال کـردن سـطح تمـاس میـان سـه فـاز

غیرقابل امت زاج و تراکم ناپذیر استفاده می شود. 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

معادلیه برای پوشیش دادن معادلات فازی-میدانیی و دو

معادله برای پتانسیل شیمیایی. حرکت سطح تماس

مایع-مایے بر مبنای حداقلسازی انرژی آزاد صورت

می گیرد. معادلیه نویر استوکس به صورت زیر بیان

۳-۳-۱معادلات جریان سهفازی

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

$$\eta_i = \frac{4\Sigma T}{\varepsilon} \sum_{j \neq i} \left(\frac{1}{\Sigma j} \left(\frac{\partial F}{\partial \phi i} - \frac{\partial F}{\partial \phi i} \right) \right) - \frac{3}{4} \varepsilon \sum_j \nabla^2 \phi_i \tag{(7)}$$

۳-۳-۲ پیادہسازی مدل

به منظـور مدلسـازی، میکرومدلـی کـه توسـط جمالـی و همـکاران [۱۰] مـورد اسـتفاده قـرار گرفت، در نـرم افـزار Corel Draw طراحـی و بهعنـوان ورودی در نـرم افـزار کامسـول اسـتفاده شـد. اطلاعـات حفـرات و گلوگاههـای دو قسـمت میکرومـدل در جـدول ۱ آورده شـده اسـت. در هـر تزريـق ابتـدا ميکرومـدل بـا فـاز نفـت آغشـته مـی شود. سـپس آب بـا دبی ml/min /۰۰۰۰ از سـمت راست بـه محيـط متخلخـل تزريـق مـی شـود. سـطح ماتريکـس از نظـر ترشـوندگی مشـخص اسـت. شـرط مـرز ورودی میکرومـدل بـرای جريان آرام دبی سيال است کـه برابـر با میکرومـدل برابـر است کـه تقريبـاً بـا دبی حرکـت سيال در مخـزن برابـر اسـت [1۲]. بـرای شبيهسـازی تزريـق ژل

دو نظریه برای بررسی سطح جدایش دو سیال وجود دارد که عبارتند از مدل سطح تماس تیز(Sharp interface اسمط و مدل سطح تماس انتشاری(model 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، به صورت سریع ولی هموار در طول سطح تماس تغییر میکند[11].

۲-۳ معادلات فازی- میدانی

عـلاوه بـر معـادلات بقـای جـرم، انـدازه حرکـت، در سالهای اخیـر اسـتفاده از معـادلات فازی-میدانـی بـرای شبیهسازی جریانهـای چندفـازی غیرقابل امتـزاج مـورد توجـه قـرار گرفتـه است. ایـدهی اصلـی ایـن مـدل معرفی پارامتـری است کـه در طـول سـطح تمـاس بهطـور پیوسـته تغییـر کنـد، اما در محیط فازهـا ثابت باشـد. معادلـه کان-هیلیـارد شناختهشـدهترین معادلـهی فازی-میدانـی اسـت کـه در سـامانههای دو و سـهبعدی مـورد اسـتفاده قـرار میگیرد. ایـن معادلـه، تشکیل، تبدیـل و انحـلال در سطح میگیرد. این معادلـه، تشکیل، تبدیـل و انحـلال در سطح راهحـل وابسـته بـه انحنـا دارد (اثـر گیبس-تومـاس) کـه تماس را مدلسـازی میکنـد[۱۲]. ایـن معادلـه یـک راهحـل وابسـته بـه انحنـا دارد (اثـر گیبس-تومـاس) کـه تبخیر و بـزرگ شـوندگی (ماننـد آنچـه در ژل بـر اثـر جـذب آب رخ میدهـد) کاربـردی میکنـد. تجزیهوتحلیـل دقـت

سیس 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

ناحیه انتقالی نازک جایگزین می شود، میزان وضوح شـبکهبندی بایـد بـه گونـهای باشـد کـه امـکان مطالعـه

فیزیک بر روی این لایه نازک مهیا باشد. مشبندی

لایـه مـرزی(Boundary layer)در اینجـا مـورد اسـتفاده قرار

گرفت و در مدل سهفازی از مشبندی مثلثی استفاده

شـد. به منظـور حـل معـادلات جریانـی، شـرایط مـرزی و

شـرط مـرز ورودی میکرومـدل بـرای جریـان آرام، دبـی 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 شـود تـا سـرعت حركـت سـيال محاسـبه شـود. در ايـن

مطالعــه، عمــق حفـرات در حـدود ۱۶۰ میکرومتـر اسـت.

سرعت ایجادشده در این نرخ تزریق تقریبا برابر با

سرعت حرکت سیال در محیط مخزن است. برای روابط

میدان فازی، فاز سیالی که وارد می شود به عنوان شرط

ورودی تعریف میشود. پس از پایان فرایند تزریق آب

لازم است با تعريف فيزيک جديد، نوع جريان به جريان

سهفازی تغییر پیدا کرده و سپس ذرات هیدروژل در

شرط مرزی خروجی برای جریان آرام مرز فشاری است

که برابر با Pa۱۰۵ در نظر گرفته شده است. شرط

مرزی خروجی برای معادلات میدان فازی امکان خروج

تمامی فازها از خروجی سامانه است. محل مرز خروجی

اولیه به شرح زیر است:

ورودی میکرومـدل رسـم شـوند.

* شرط مرزی خروجی

* ديوار ها

* شرط مرزی ورودی

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		

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

کـه دیوارهها ثابـت هسـتند، سـرعت سـیال در کنـار دیوارهها نیز برابر با صفر خواهد بود (uft = 0). همچنین از آنجا کـه ديوارهها نفوذپذيـرى ندارنـد، سـيال اجـازه عبور از دیوارهها را نخواهد داشت. شرط غیرقابلنفوذ بودن دیوارهها نیز بهصورت زیر بیان می شود:

> $n'=0. u_{f}$ دلیل کے سطح تماس در معادلات فازی-میدانے با یک (۴)

که n بردار نرمال سطح است. همچنین در سطح تماس دوسیال، سرعت سیالات با همدیگر برابر است. (u_{fy}=u_{fy}) * شرايط اوليه

دمای اولیـه سـیال برابـر بـا دمـای محیـط (۲۵ درجـه سانتی گراد) در نظر گرفته شده است. فشار اولیه سيال نيز برابر با فشار محيط است. همچنين سيال در ابتـدای کار در هیـچ جهتـی حرکـت نمیکنـد. در ابتـدا کل محیط با نفت اشباع شده که شرط اولیه فیزیک میدان فازی خواهد بود.

۴ بحث و نتیجه گیری

در این مطالعه جابهجایی نفت توسط آب فرایندی با فیزیک فازی_میدانی دوفازی شبیهسازی شده است. سيس نتايج أن بهعنوان ورودي شرايط اوليه شبیهسازی سهفازی (شامل سه فاز آب، نفت و ذرات هیدروژل) مورد استفاده قرار گرفته است. بعد از بررسی تطبیــق نتایـج شبیهسـازی بـا نتایـج آزمایشـگاهی، تأثیـر پارامترهای مختلف سیال و میکرومدل بر ضریب بازیافت مورد مطالعه قرار گرفته و میزان ضریب بازیافت در مرحله تزريق آب پيشبيني شده است.

۴–۱ اعتبارسنجی مدل دوفازی

نتیجـه آزمایشـگاهی فراینـد سـیلابزنی در میکرومـدل کـه توسط جمالی و همکاران [۱۳] انجام شده ، در شکل ۲-الف نشان داده شده است. میان شکنی آب به عنوان زمان پایان تزریق در نظر گرفته شده است. نتیجه این مدلسازی در شکل ۲-ب آورده شده است. همانطور کـه در ایـن دو شـکل مشـخص اسـت، تطابـق بسـیار خوبـی بین نتایج مدلسازی و مطالعه آزمایشگاهی وجود دارد. ضخامـت سـطح تمـاس در ايـن مدلسـازي معـادل h_{mav}/۵ بەدست آمدہ است کے h_{max} طول بزرگترین مش در دامنیه مدلسازی و مقدار آن ۲۳۰ میکرومتر است. پارامتر تنظیم کننده انتقال پذیری بین فازها نیز مقدار

در شـکل ۱ نشـان داده شـده اسـت. ديوارهها بهصورت سطوح جامد غيرقابل نفوذ وبى اثر

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



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)

شبکهبندی ریزتر شود، مدت زمان اجرای مدل و دقت نتایج افزایش می یابد. از یک اندازه مش به بعد

ییش فـرض نرمافـزار (برابـر بـا یـک) در نظـر گرفتـه شـده مـرزی بـا انـدازه مـش متوسـط اسـت. هرچـه انـدازه کـه بـرای گسـتره وسـيعی از مدلهـا مناسـب اسـت. ضریب بازیافت آزمایشگاهی و نتایج شبیهسازی در جـدول ۲ ارائـه شـده اسـت. درصـد خطـای حاصـل ٪ ۲/۲۹ میـزان افزایـش دقـت مـدل در برابـر زمـان اجـرای آن قابـل است. همان طور که مشخص است در فرایند جابه جایی چشم پوشی است. در جدول ۳ نتایج شبیه سازی با توسط آب، از آنجـا کـه انـدازه حفـرات و گلوگاههـای قسـمت انـدازه مختلـف شـبکهبندی بـه همـراه درصـد خطـای هـر پایین میکرومدل بزرگتر است، نیروی موئینگی کمتر 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
Experimenta factor	l recovery (%)	51.46	0	31.84
Simulation rec (%)	overy factor)	52.63	0	32.57
Error	• %	2.29	0	2.29

ناحیه دارد. بعد از پدیده میان شکنی تزریق آب متوقف **بازیافت** شده و ذرات هیـدروژل تزریـق میشـوند کـه نتایـج آن در ادامــه آورده شــده اســت.

۲-۴ استقلال نتایج از شبکهبندی

شــبکهبندی استفادهشـده در مـدل ساختهشـده بـا نـرم افزار کامسول برای مدل دوفازی به صورت لایه های ترشوندگی با کمیت زاویه تماس تعریف می شود که از

بوده و سیال تزریقی تمایل بیشتری به حرکت از این ۴**-۳ بررسی تأثیر عوامل مختلف بر ضریب** در ادامـه تأثیـر پارامترهـای مختلـف بـر ضریـب بازیافـت نفت بررسی میشود و تلاش میشود که شرایط بهینه برای سیلابزنی قبل از تزریق هیدروژل، مشخص شود. ۴–۳–۱ زاویه تماس

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

	T			1
t/t _{Normal}	Error %	So @ break throat time	mesh density	Mesh size
570	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

فصلنامه علمی پژوهشی بین رشته ای پژوهش های کاربردی مهندسی شیمی - پلیمر

شبيهسازى فرايند تزريق هيدروژل در...



شکل ۳ ضریب بازیافت در زاویه تماسهای مختلف Figure 3.0il recovery factor at different contact angles

وارد فضای درونی حفرات می شود و نفت را جابه جا می کند و بیشترین میزان نفت بازیافتی در این زاویه تماس اتفاق می افتد. با افزایش زاویه تماس، آب تمایل خود برای جابه جا کردن نفت در نزدیکی سطح میکرومدل را از دست می دهد که موجب کاهش تعداد حفرات جاروب شده می دهد که موجب کاهش تعداد حفرات جاروب شده می دهد که موجب کاهش تعداد حفرات جاروب شده می دهد که موجب کاهش تعداد حفرات جاروب شده می دهد که موجب کاهش می محمل از زخود نشان می دهند. شکل ۵ تغییرات اختلاف فشار تزریق در طول می دهد. شان می دهد. میکرومدل در ترشوندگی های مختلف را نشان می دهد. از آنجا که زاویه تماس بر نیروی مویینگی موثر است، نمودارها با افزایش زاویه تماس و کاهش نیروی میان فاز چگال تر اندازه گیری می شود. شکل ۳ ضریب بازیافت نفت را در زاویه های تماس مختلف در زمان میان شکنی نشان می دهد. همان طور که مشخص ۲۵/۷ مقدار برداشت نفت ۸ ۳۴/۹ خواهد بود که مقدار بهینه بازیافت نفت است. شکل ۴ الگوی جاروب را در این زاویه تماس نشان می دهد. با فاصله گرفتن از این زاویه بهینه، میزان ضریب بازیافت کاهش می یابد. در حالتی که مدل بسیار آب دوست باشد، آب تزریقی تمایل بالایی به حرکت از روی دیواره ها خواهد داشت. این عملکرد در محیط متخلخل باعث می شود که نفت در داخل حفرات بزرگ تشکیل قطرات غیر پیوسته ای را بدهد که قابلیت بازیافت ندارند.



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





Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2024-05-02

تزریــق، زاویــه تمـاس، گرانـروی نفـت و گرانـروی سـیال تزریقی به عنوان پارامتر های موثر بر ضریب بازیافت در نظر گرفته شدند. این پارامترها به عنوان پارامترهای طراحی مدل در نظر گرفته شدند. تحلیل ها به کمک نرماف_زار Design Expert صورت گرف_ت. نتایے تحلیل واریانس ANOVA که بیانگر پراکندگی مدل و میزان دقت آن است، در جـدول ۴ ارائـه شـده اسـت. مقـدار پارامتـر P کمتر از ۰/۰۰۰۱ است که نشان دهنده 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 یارامترها در جدول ۵ ارائه شده است.

(۵)

 $RF = AT + Bq + C\Theta + D\mu_0 + E\mu_w + FTq + GT\Theta + HT\mu_0$ + $JT\mu_w$ + $Kq\Theta$ + $Lq\mu_o$ + $Mq\mu_w$ + $N\Theta\mu_o$ + $O\Theta\mu_w$ + $P\mu_o\mu_w$ + Z

شکل ۷ پیشبینی مدل در مقایسه با نتایج مدلسازی



شکل ۶ جاروب در نرخ تزریق a) ۰/۰۰۰۲ cc/min و (۰/۰۰۰۳ در نرخ تزریق a) Figure 6. Sweep pattern for a) 0.0002 cc/min and b) 0.00035 cc/min

تزریق، ضریب بازیافت رفتار افزایشی نشان میدهد. را نشان میدهد. با توجه به قرار گیری داده ها در اطراف شـکلهای ۶ الـف و ب الگـوی جـاروب در دو نـرخ تزريـق ۳/۵×۱۰^{-۴} cc/min و ۲۰^{-۴} ۲۰^{-۴} در زمان میانشکنی را نشان میدهد. زمانی که دبی در این محدوده افزایش با هم دارند.

مویینگی، اندکی به سمت بالا حرکت میکنند.

در نتیجه افزایش نرخ تزریق، نیروی گرانرو بر مویینگی

غلبه كرده و تمايل سيال براى عبور از كانالهاى

متفاوت و پخششدن در سطح گستردهتری از میکرومدل

افزایش مییابد. ضریب بازیافت بهینه در دبی cc/min

۱۰/۵×۱۰/۰ 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،

انگشتی شدن گرانرو وابسته به نسبت گرانروی دو

سيال و سرعت تزريق است. با افزايش نرخ تزريق،

سرعت سیال بیشتر شده و در اثر پدیده انگشتی شدن گرانـرو، جـاروب سـيال غيريكنواختتـر مىشـود و سـيال تزریقے مناطقے را بہصورت جاروبنشدہ باقے گذاشتہ

وبه خروجی سامانه میرسد. بازیافت نفت با افزایش

دبی ابتدا افزایش یافته و در دبیهای بالاتر سیر نزولی به خود می گیرد. زمانی که دبی تزریق از /cc

min ۲/۵×۱۰-۴ کمتر می شود، با کاهش بیشتر نرخ min

۴-۳-۴ نرخ تزريق

خط با شیب یک میتوان مشاهده کرد که نتایج مدلسازی و مدل پیش بینی شده تطبیق قابل قبولی

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

	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		

پیدا می کند، سیالهای وارد شده از دو مجرای ورودی نوعی تمایل به انگشتی شدن را از خود نشان میدهند که باعث می شود ناحیه بین دو نقطه تزریق به خوبی جاروب نشود.

۴-۴ مدل آماری ضریب بازیافت بدون هیدروژل با توجه به حساسیتسنجی انجام گرفته روی پارامترهای موثر بر ضریب بازیافت که از میان آن ها نرخ تزریق و زاویـه تماس در اینجا بیان شد، چهار پارامتر نرخ

۴–۵ شبیهسازی تزریق هیدروژل

همانطــور کــه در قســمتهای قبلــی اشــاره شــد، در مــدل آزمایشــگاهی[۶٫ ۹] بعــد از تزریــق آب بهعنــوان فــاز تولیـد ثانویـه، در مرحلـه ازدیـاد برداشـت از هیدروژلهـای 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 می کند. در طول فرایند

📢 🔹 فصلنامه علمی پژوهشی بین رشته ای پژوهش های کاربردی مهندسی شیمی – پلیمر

Coefficient	Parameter	Coefficient	Parameter	Coefficient	Parameter
А	0.12	G	0.016	М	1.77
В	3.52	Н	-0.0015	N	6.7
С	-10.24	J	-0.00343	0	1.32
D	-9.65	K	6.6	Р	-0.45
Е	5.34	L	0.73	Z	37.7
F	-0.009687				

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



شکل ۷ مقایسه پیش.بینی ضریب بازیافت با نتایج مدل سازی 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 شده است مدلسازی این فرایند در نرمافزار کامسول، اندازه برای مدلسازی این فرایند در نرمافزار کامسول، اندازه ضخامت سطح تماس terpf.ep_default به میراس





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

	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			

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



Time(s)

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

اندازه ضخامت سطح تماس A،۶۵/terpf.ep_default محاصل شد. terpf.ep_default ضخامت سطح تماس و حاصل شد. terpf.ep_default ضخامت سطح تماس و معادل ۶۳۱ میکرومتر است. - چهار پارامتر نرخ تزریقی باعنوان 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 سیلابزی 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.

۵ نتیجه گیری

در این مطالعـه فراینـد آزمایشـگاهی تزریـق هیـدروژل بـه میکرومـدل شیشـهای بـا اسـتفاده از نرمافـزار کامسـول شبیهسـازی شـد و عملکـرد هیـدروژل در بهبـود ضریـب بازیافـت نواحـی کمتـراوا مـورد بررسـی قـرار گرفـت. همچنیـن سـیلابزنی قبل از تزریـق هیـدروژل شبیهسازی شـد و بـا تعییـن پارامترهـای موثـر بـر ضریـب بازیافت معـی شـد، شـرایط بهینـه ایـن فراینـد بررسـی شـود. از جملـه نتایـج ایـن شبیهسازی عبارتنـد از: ۱-نتایـج مدلسـازی فراینـد سـیلابزنی و تزریـق هیـدروژل تطابق بسیار خوبی بـا نتایج آزمایشگاهی دارد. ۲-در شبیهسـازی سـیلابزنی ضخامـت سـطح تمـاس معـادل مـی در نظیمکننـده انتقالپذیـری بیـن فازهـا نیـز معـادل یـک در نظـر گرفتـه شـد. در شبیهسازی سـهفازی

واحد	پارامتر	واحد	پارامتر
J ⁻¹ .mΔ.S ⁻¹	(M) تحرک پذیری	μm	(€) ضخامت سطح تماس
Pa.s	(μ) گرانروی	N	(F) نیروی خارجی
cc/min	(q) نرخ تزریق	J	(f) انرژی آزاد

علائم و نشانه ها

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

فصلنامه علمی پژوهشی بین رشته ای پژوهش های کاربردی مهندسی شیمی – پلیمر 🖿

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-Methylenebisacrylamideco-Acrylic acid) Hydrogel Microspheres Containing Silica Nanoparticles: Application in Enhanced Oil Recovery Processes. Journal of Applied Polymer Science, ,491-484 ,(12)137 2019