مطالعه تأثیر محلول‌های مغناطیسی پلیمری بر روی پارامترهای مؤثر در ازدیاد برداشت نفت

احسان اسماعیل نژاد[*+]

گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی نفت و پتروشیمی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

میثم رجبی

گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن، عمران و شیمی، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده: *لزوم حفظ روند تولید در مخازنی که وارد نیمه دوم عمر خود شده‌اند، دانشمندان را متوجه روش‌های ازدیاد برداشت کرده و در نتیجه روش‌های نوینی در این زمینه ظهور کرده‌اند. روش سیلاب زنی با آب مغناطیسی به عنوان یک فناوری سبز و سازگار با محیط زیست، از جمله روش‌های نوین معرفی شده در این زمینه بوده و روش سیلاب زنی با پلیمر نیز سالیان درازی است که استفاده می‌شود. هدف اصلی این مطالعه ترکیب دو روش پیش، برای افزایش راندمان روش سیلاب زنی است. بنابراین آب مغناطیسی به عنوان حلال برای پودر پلیمر استفاده شده و سپس پدیده‌های سطحی شامل زاویه تماس و کشش سطحی مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر چهار عامل زمان مغناطیسی شدن، شدت میدان مغناطیسی، مدت زمان گذشته پس از مغناطیسی شدن و غلظت پلیمر بر روی پدیده‌های سطحی مذکور مطالعه شده‌اند. نتیجه‌ها نشان دادند که تمامی فاکتورهای فوق‌الذکر به جز زمان مغناطیسی شدن تأثیر زیادی بر روی کشش سطحی داشته و فقط شدت میدان مغناطیسی اثر چشمگیری بر زاویه تماس دارد. این نتیجه‌ها اثبات می‌کند که سیلاب زنی با محلول پلیمری تهیه شده با آب مغناطیسی نه تنها بر جابه‌جایی ماکروسکوپیک بلکه بر جابه‌جایی میکروسکوپیک نیز بسیار اثرگذار می‌باشد و می تواند منجر به تقویت اثر سیلاب زنی با پلیمر شود.*

واژگان کلیدی: *آب مغناطیسی، کشش سطحی، زاویه تماس، ازدیاد برداشت نفت.*

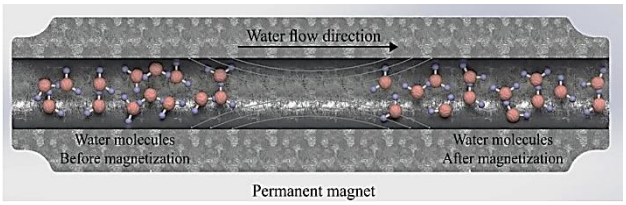
KEYWORDS: *Magnetized water, Interfacial tension, Contact angle, Enhanced oil recovery.*

مقدمه

ورود مخازن به نیمه دوم عمر خود، افزایش تقاضا و همچنین نگرانی از آینده مخازن نفتی، سبب روی آوردن کشورها به استفاده از روش‌های ازدیاد برداشت نفت شده است. ازدیاد برداشت نفت به گروهی از فناوری‌ها اطلاق شده که می‌تواند به طور چشمگیری ضریب بازیافت از مخازن نفتی را بهبود بخشد [۱-۲]. شایان ذکر است که بهترین روش ازدیاد برداشت، براساس ملاحظه‌های فنی و اقتصادی انتخاب می‌شود [۳] به طوری که بتواند بر راندمان جاروب میکروسکوپیک و ماکروسکوپیک در درون مخزن اثرگذار باشد.

* عهده‌دار مکاتبات

+Email: E.Esmailnezhad@hsu.ac.ir



شکل ۱ - آرایش مولکول‌های آب، پیش و پس از مغناطیسی شدن [۱۰]

از جمله روش‌های ازدیاد برداشتی که به طور گسترده‌ای توسعه یافته، روش سیلاب‌زنی با پلیمر است که با تغییر ویژگی‌های ماکروسکوپیک و بهبود راندمان جاروب[۱]، بازیافت نفت را افزایش می‌دهد [۴]. این به معنای کاهش نسبت تحرک پذیری آب-نفت بوده که با حرکت سیال به درون مخزن و ایجاد جبهه پیشران، افزایش تولید را در پی دارد [۵، ۶].

همان‌گونه که بیان شد، ازدیاد برداشت در صنعت نفت نه تنها بایستی قادر به بهبود ویژگی‌های ماکروسکوپیک باشد، بلکه باید راندمان جاروب میکروسکوپیک را نیز افزایش دهد زیرا این فاکتور بر تخلیه فضاهای متخلخل تأثیر می‌گذارد [۷]. روش‌های بسیاری مانند سیلاب‌زنی سورفکتانت-پلیمر وجود دارند که ویژگی‌های ماکروسکوپیک را با محلول پلیمر و ویژگی‌های میکروسکوپیک را با سورفکتانت بهبود می‌بخشند. سیلاب زنی با آب مغناطیسی روشی است که می‌تواند راندمان جابه‌جایی[۲] را با تغییر در تعدادی از ویژگی‌های میکروسکوپیک همانند کشش سطحی و زاویه تماس تقویت کند. به عبارتی دیگر آب مغناطیسی می‌تواند همانند یک سورفکتانت در ازدیاد برداشت عمل نماید [۸].

اصطلاح آب مغناطیسی به آبی گفته می‌شود که از درون یک میدان مغناطیسی گذر کرده باشد. پژوهش‌های زیادی بر روی مغناطیس شدن آب وجود دارد و عامل‌های زیادی مثل مدت زمان مغناطیسی شدن، شدت میدان مغناطیسی و نوع آهنربای استفاده شده بر روی کیفیت آب مغناطیسی تأثیرگذار است. مغناطیس شدن آب به مفهوم پیدا کردن خاصیت مغناطیسی برای آب نیست بلکه مولکول‌های آب با گذر از میدان مغناطیسی، آرایش جدیدی به خود می‌گیرند و در نتیجه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آب تغییر می‌کند [۹]. در شکل ۱ آرایش مولکول‌های آب، پیش و پس از مغناطیسی شدن نشان داده شده است.

هدف این پژوهش، مطالعه بر روی پدیده‌های سطحی به‌دست آمده از سیلاب زنی با محلول پلیمری پایه آب مغناطیسی (محلول پلیمری تهیه شده از انحلال پلیمر در آب مغناطیسی) است. هیچ شکی نیست که محلول پلیمر با افزایش گرانروی آب می‌تواند بازدهی ماکروسکوپیک را بهبود ببخشد [۱۱] و اگر محلول پلیمری پایه آب مغناطیسی بتواند تغییرهای دلخواه در پدیده‌های سطحی اثرگذار در بازدهی میکروسکوپیک (مثل زاویه تماس و کشش سطحی) را ایجاد کند، سیال پیشنهاد شده می‌تواند روی هر دو نوع راندمان جابه‌جایی و جاروب تأثیر بگذارد. داشتن چنین ویژگی، سیلاب زنی با محلول پلیمری پایه آب مغناطیسی را در تراز سیلاب زنی پلیمر-سورفکتانت یا پلیمر-آلکالین قرار می‌دهد با این تفاوت که برای تهیه آن نیازی به صرف هزینه (برای تهیه سورفکتانت و یا آلکالین) نیست و از سوی دیگر آلودگی‌های ناشی از این مواد نیز وجود نخواهد داشت. مغناطیسی شدن آب می‌تواند توسط آهنرباهای دائمی ایجاد شده که با هزینه‌سرمایه‌ای اولیه ناچیز قابل انجام است. در نتیجه آب مغناطیسی نه تنها یک روش سبز و دوست‌دار محیط زیست است بلکه از نظر هزینه‌های اجرایی نیز از برتری نسبی بالایی برخوردار است.

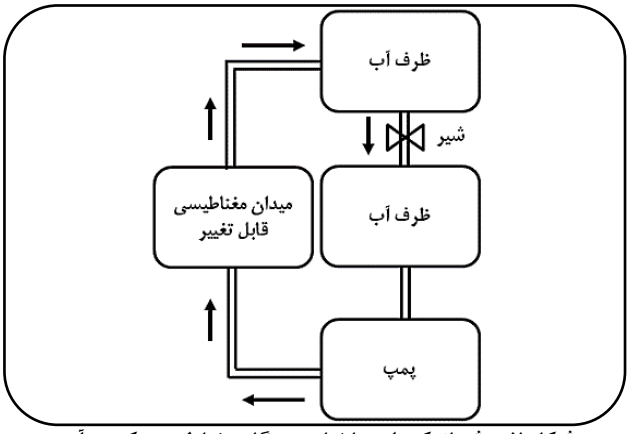
برای درک تأثیر پارامترهای گوناگون اثرگذار در مغناطیسی شدن آب بر روی کشش سطحی و زاویه تماس از روش سطح پاسخ (RSM[۳]) استفاده شده است. این روش که به صورت گسترده‌ای در مطالعه‌های صنعتی به کار می‌رود، در کاهش تعداد آزمایش‌های لازم برای بررسی یک موضوع (با فاکتورهای فراوان) و درک تأثیر متقابل فاکتورها بسیار مفید می‌باشد [۱۲]. کار حاضر، یک مطالعه برای بررسی اثرات غلظت محلول پلیمر، شدت میدان مغناطیسی، زمان مغناطیسی شدن و مدت زمان گذشته پس از مغناطیسی شدن بر پاسخ های متناظر کشش سطحی و زاویه تماس می‌باشد.

بخش تجربی

مواد و روش‌ها

از آب مقطر و پلی‌اکریل‌امید[۴] (خریداری شده از شرکت SNF Floerger فرانسه) که پرکاربردترین پلیمر در روش ازدیاد برداشت پلیمری است [۱۳] به ترتیب برای آماده کردن آب مغناطیسی و محلول پلیمر استفاده شد. برای تهیه آب مغناطیسی مطابق شکل ۲، آب درون یک چرخه بین دو قطب آهنربایی موازی (هر یک به اندازه ۲×۴×۴ سانتی‌متر) در گردش است به طوری که شدت میدان مغناطیسی (توسط نزدیک شدن یا دور شدن

(۱) Sweep Efficiency
(۲) Displacement Efficiency
(۳) Response Surface Methodology
(۴) Polyacrylamide



شکل ۲ - شماتیکی از ساختار دستگاه مغناطیسی کننده آب

دوقطب مخالف به یکدیگر) قابل تنظیم می‌باشد. زمان مغناطیسی شدن نیز به زمانی که آب در محفظه مغناطیسی در گردش است، بستگی دارد. پس از آماده سازی آب مغناطیسی، مقدار معینی از پلیمر انتخاب شده، طبق استاندارد API RP63[1]، درون حجم مشخصی از آب مغناطیسی حل می‌شود. این استاندارد، روش کامل و صحیح تهیه محلول‌های پلیمری برای روش سیلاب‌زنی پلیمری را تشریح کرده و در این پژوهش نیز، تمامی نمونه‌ها مطابق با این استاندارد تهیه شده‌اند. مطابق با این استاندارد نخست با زیاد کردن سرعت دستگاه هم‌زن، یک گردابه به اندازه‌ی ۷۰٪ کل ارتفاع سیال در ظرف ایجاد شده و سپس پودر پلیمر به صورت آرام آرام به محلول اضافه می‌شود. سرعت دستگاه همزن کم شده و هم‌زدن سیال تا وقتی ادامه می‌یابد که محلول پلیمر به‌طور کامل شفاف و بدون هیچ‌گونه کدورت و یا حبابی باشد. برای آماده‌سازی نمونه‌های سنگی مناسب برای محاسبه زاویه تماس، مغزه‌ای با قطر ۳/۸ سانتی‌متر از جنس کربناته در قطعاتی به ضخامت ۰/۵ سانتی‌متر بریده و سپس در چند مرحله جلا داده شده است. اقدامات آماده سازی نمونه‌های سنگ بر پایه روال متداول و استانداردی که در مقالات آمده، انجام گرفته است [۱۴]. برای بررسی پدیده‌های سطحی زاویه تماس و کشش سطحی، محلول پلیمری پایه آب مغناطیسی در دستگاه قطره آویزان (IFT-400) ساخت شرکت ازدیاد برداشت فارس مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

نتیجه‌ها و بحث

چهار فاکتور کنترلی شامل، غلظت پلیمر (فاکتور A) در دو سطح (۱۰۰۰ و ۳۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر)، شدت میدان مغناطیسی (فاکتور B) در سه سطح (۰، ۳۶۷۰ و ۶۳۳۰ گوس[2])، زمان مغناطیسی شدن (فاکتور C) در سه سطح (۰، ۳ و ۱۲ دقیقه) و زمان گذشته پس از مغناطیسی شدن (فاکتور D) در سه سطح (۱، ۴ و ۸ روز) در نظر گرفته شدند و از طرف دیگر زاویه تماس و کشش سطحی، توابع هدف این چهار فاکتور می‌باشند. سطح صفر در هر دو فاکتور شدت میدان مغناطیسی و زمان مغناطیسی شدن به مفهوم آب غیرمغناطیسی می‌باشد. انتخاب سطوح مناسب برای هر فاکتور بر مبنای بررسی مطالعه‌های پیشین و در نظر گرفتن الزامات فنی و مهندسی برای اجرا بوده است. برای غلظت پلیمر، تزریق بیشتر از ۳۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در محیط متخلخل مخازن نفتی امکان پذیر نبوده و حتی در صورت امکان، تخریب مکانیکی محلول پلیمری قابل توجه می‌باشد [۱۵]. بنابراین دو سطح حداقل ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و بیشینه ۳۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر انتخاب‌های مناسبی می‌باشند. در مورد انتخاب سطوح مناسب برای دو فاکتور شدت میدان مغناطیسی و مدت زمان مغناطیسی شدن، دو موضوع اشباع مغناطیسی آب و ملاحظه‌های اقتصادی مد نظر بوده است. مطابق با مطالعه‌های صورت گرفته در زمینه آب مغناطیسی، خاصیت مغناطیسی شدن آب دارای یک مقدار اشباع می‌باشد [۱۶]. برای مقدار حد اشباع مغناطیسی آب، مقدارهای متفاوتی گزارش شده بنابراین در این پژوهش میانگینی برای مقدارهای شدت میدان مغناطیسی و مدت زمان مغناطیسی شدن مطابق با آن چه در بالا گفته شد، انتخاب شده است. مطالعه‌های پیشین نشان می‌دهد که خاصیت مغناطیسی آب دارای حافظه بوده و این میزان حافظه تابعی از دیگر فاکتورهای تأثیرگذار مثل شدت و نوع میدان مغناطیسی می‌باشد [۱۷]. بنابراین در این پژوهش نیز نخست با توجه به خاصیت حافظه آب مغناطیسی، این ویژگی به عنوان یک فاکتور مورد بررسی در نظر گرفته شد و سپس سطوح گوناگون آن با توجه به مقاله‌های منتشر شده در این زمینه به صورت ۱، ۴ و ۸ روز انتخاب شدند.

نرم‌افزار Design Expert 7.0 برای طراحی و انتخاب آزمایش‌های لازم از بین فاکتورها و در سطوح مناسب آن‌ها به کار گرفته شد. تعداد ۲۱ آزمایش برای بررسی فاکتورها و سطوح هر کدام از آن‌ها توسط نرم افزار پیشنهاد شد و مطابق با آن، ۲۱ آزمایش زاویه تماس و ۲۱ آزمایش کشش سطحی انجام گرفت که

(۱) Recommended Practices for Evaluation of Polymers Used in Enhanced Oil Recovery Operations standard by American Petroleum Institute, 1990

(۲) Gauss

جدول ۱ - ماتریس طراحی آزمایشی با پاسخ‌های مربوطه

Std	Run	فاکتورها				کشش سطحی	زاویه تماس
		A (mgr/l)	B (گوس)	C (دقیقه)	D (روز)	(dyne/cm)	(Θ)
۱۳	۱	۱۰۰۰	۰	۰	۱	۱۱۷/۵۲	۸۲/۵
۴	۲	۱۰۰۰	۰	۰	۴	۱۳۹/۲۱	۸۲
۱۹	۳	۱۰۰۰	۰	۰	۸	۱۵۷/۶۹	۷۹
۲۱	۴	۳۰۰۰	۰	۰	۱	۱۱۶/۹۱	۸۳
۱۶	۵	۳۰۰۰	۰	۰	۴	۱۵۴/۲۷	۸۱
۲۹	۶	۳۰۰۰	۰	۰	۸	۱۵۱/۸۱	۸۲
۵	۷	۱۰۰۰	۶۳۳۰	۳	۱	۷۷/۲۵	۷۳
۱	۸	۱۰۰۰	۶۳۳۰	۳	۴	۹۳/۲۱	۸۵/۶
۱۱	۹	۱۰۰۰	۶۳۳۰	۳	۸	۱۱۶/۸	۷۲
۱۰	۱۰	۳۰۰۰	۶۳۳۰	۳	۱	۸۱/۰۲	۸۲/۷
۱۵	۱۱	۳۰۰۰	۶۳۳۰	۳	۴	۱۰۱/۳۹	۹۰/۶
۳۰	۱۲	۳۰۰۰	۶۳۳۰	۳	۸	۱۲۴/۴	۷۹/۲
۲	۱۳	۱۰۰۰	۶۳۳۰	۱۲	۱	۸۰/۵	۷۶
۲۶	۱۴	۱۰۰۰	۶۳۳۰	۱۲	۴	۱۰۷/۲۵	۷۸/۵
۸	۱۵	۱۰۰۰	۶۳۳۰	۱۲	۸	۱۱۷/۴۸	۷۳
۹	۱۶	۱۰۰۰	۳۶۷۰	۳	۱	۱۱۰/۴۲	۷۵
۲۴	۱۷	۱۰۰۰	۳۶۷۰	۳	۴	۱۱۳/۰۸	۸۹۸
۱۷	۱۸	۱۰۰۰	۳۶۷۰	۳	۸	۱۱۶/۴۶	۸۳
۲۷	۱۹	۱۰۰۰	۳۶۷۰	۱۲	۱	۸۱/۱۸	۷۸
۲۰	۲۰	۱۰۰۰	۳۶۷۰	۱۲	۴	۱۲۲/۸	۹۰/۷
۱۸	۲۱	۱۰۰۰	۳۶۷۰	۱۲	۸	۱۱۴/۳۳	۸۴

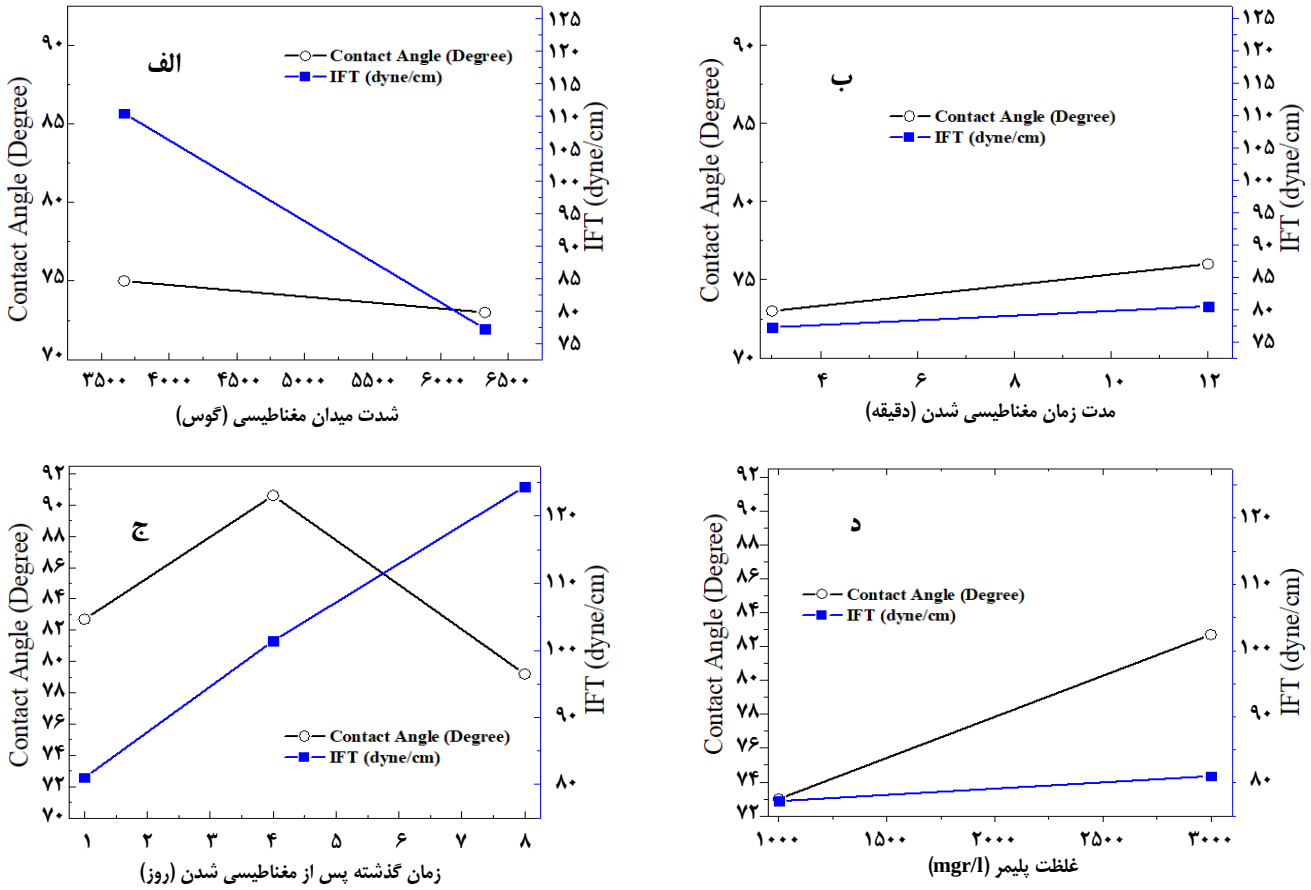
برای جلوگیری از طولانی شدن مقاله[1]، تنها داده‌های مربوط به آن‌ها در جدول ۱ نمایش داده شده است.

پیش از تحلیل آماری نتیجه‌ها به کمک خروجی نرم افزار، در این قسمت سعی شده تا با رسم چند نمودار، اثر مربوط به فاکتورهای گوناگون به بحث گذاشته شود. بر طبق نتیجه‌های آزمایشگاهی، هر چقدر شدت میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد، مقدار کشش سطحی کاهش یافته اما تأثیر چشمگیری روی زاویه تماس ندارد (شکل ۳-الف). همچنین با افزایش زمان مغناطیسی شدن هر دو پاسخ زاویه تماس و کشش سطحی، تغییرهای اندک افزایشی را نشان می‌دهند (شکل ۳-ب). با افزایش زمان گذشته پس از مغناطیسی شدن، کشش سطحی افزایش یافته اما زاویه تماس نخست یک روند افزایشی داشته و سپس کاهش می‌یابد (شکل ۳-ج). افزون بر این، افزایش غلظت پلیمر، منجر به افزایش زاویه تماس شده، اما کشش سطحی تقریباً ثابت است (شکل ۳-د). شایان ذکر است که در تحلیل قسمت های گوناگون شکل ۳، اثر متقابل فاکتورها دیده نشده و تحلیلِ مربوط به اثر هر فاکتور به فرض ثابت بودن سایر فاکتورها انجام شده است.

برای تحلیل جامع داده‌ها و درک اثر متقابل فاکتورهای مورد بررسی بر روی پاسخ‌ها، از روش تحلیل واریانس (ANOVA[2]) استفاده شد. در این روش با استفاده از مقدارهای P-value می‌توان تشخیص داد که تغییرات سطح در کدام فاکتور بر روی پاسخ اثرگذار بوده است [۱۸]. برای تعیین P-value، سطح احتمال ۹۵٪ که مقبول و رایج در کارهای مهندسی می‌باشد [۱۹]، ملاک قرار گرفته و نتیجه‌های به‌دست آمده از تحلیل در جدول ۲ آمده است. با توجه به مقدار

(۱) برای بالابردن صحّت و دقّت نتیجه‌ها، تمامی آزمایش‌ها ۳ بار تکرار شدند و داده‌های به‌دست آمده از تصویرهای مربوط به زاویه تماس و کشش سطحی هر آزمایش در نرم‌افزار بارگذاری شد. ارایه این نتیجه‌ها به صورت تصویری به معنی قرار دادن بیش از ۱۲۰ تصویر بود که به دلیل کاهش حجم مقاله از قرار دادن آن‌ها در متن اجتناب شده است.

(۲) Analysis of Variance



شکل ۳ - تأثیر چهار فاکتور کنترلی بر روی زاویه تماس و کشش سطحی

P-value از جدول ۲ استنباط می‌شود که تغییرات در فاکتور A (غلظت پلیمر) تنها بر کشش سطحی تأثیر می‌گذارد. همچنین، تغییرهای مقدار فاکتور B (شدت میدان مغناطیسی) تأثیر چشمگیری بر روی هر دو پاسخ دارد اما تغییرهای مقدار فاکتور C (زمان مغناطیسی شدن) روی هیچ یک از پاسخ‌های زاویه تماس و کشش سطحی تأثیری نمی‌گذارد. تغییرها در مقدار فاکتور D (زمان پس از مغناطیسی شدن) تنها تأثیر چشمگیری بر روی کشش سطحی دارد که مطابق با دیگر پژوهش‌های انجام شده در این زمینه است [۱۰]. همچنین از مقدارهای مربوط به برهمکنش فاکتورها، مشخص است که تأثیر متقابلی بین هیچ کدام از فاکتورهای مورد بررسی وجود ندارد.

نتیجه‌گیری

ازدیاد برداشت از مخازن نفتی موجود مهم‌ترین روش برای برآورده کردن تقاضای انرژی بشر بوده و روش‌هایی مانند سیلاب زنی پلیمر از گذشته بسیار مورد توجه بوده است و در سال‌های اخیر نیز سیلاب زنی با آب مغناطیسی از روش‌های پیشنهادی می‌باشد. سیلاب زنی پلیمری بر روی راندمان ماکروسکوپیک و سیلاب زنی با آب مغناطیسی بر روی راندمان میکروسکوپیک اثرگذار است چون مهم‌ترین تأثیر پلیمر، افزایش گرانروی آب و بیشترین تأثیر آب مغناطیسی بر روی پدیده‌های سطحی است. در این پژوهش ایده استفاده از آب مغناطیسی برای تهیه محلول‌های پلیمری مورد ارزیابی قرار گرفت تا بتوان تنها با یک روش ازدیاد برداشت، مجموع اثرهای افزایش راندمان ماکروسکوپیک و میکروسکوپیک را در کنار هم قرار داد. استفاده از این ایده برای اولین بار مطرح شده و برای دانستن اثر پارامترهای مؤثر در مغناطیسی شدن آب از روش سطح پاسخ و تحلیل واریانس برای طراحی آزمایش و تحلیل آماری داده‌ها استفاده شد. چهار فاکتور غلظت پلیمر، شدت میدان مغناطیسی، مدت زمان مغناطیسی شدن و زمان گذشته پس از مغناطیسی شدن در سطوح گوناگون مورد آزمایش و ارزیابی قرار گرفتند. دو پارامتر کشش سطحی و زاویه تماس به عنوان مهم‌ترین پدیده‌های سطحی درگیر

جدول ۲ - نتیجه‌های تحلیل واریانس در مورد پاسخ‌های زاویه تماس و کشش سطحی

فاکتورها	پاسخ	مجموع مربعات	درجه آزادی	F Value	p-value Prob> F
مدل	کشش سطحی زاویه تماس	۱۸۳۲۷/۳۸ ۳۱۰/۲۱	۹	۱۹/۰۰ ۱/۲۴	<۰/۰۰۰۱ significant ۰/۳۰۶۳ not significant
غلظت پلیمر-A	کشش سطحی زاویه تماس	۴۵۰/۹۴ ۶۰/۷۹	۱	۴/۲۱ ۲/۱۹	۰/۰۴۸۵ ۰/۱۴۸۹
شدت میدان مغناطیسی-B	کشش سطحی زاویه تماس	۱۶۶۴/۸۱ ۱۶۶/۷۹	۱	۱۵/۵۳ ۶/۰۰	۰/۰۰۰۴ ۰/۰۱۱۹
زمان مغناطیسی شدن-C	کشش سطحی زاویه تماس	۷۵/۴۳ ۹۰/۳۱	۱	۰/۷۰ ۳/۲۵	۰/۴۰۷۸ ۰/۰۸۰۹
زمان گذشته پس از مغناطیس شدن -D	کشش سطحی زاویه تماس	۴۳۰۳/۷۷ ۰/۰۴۸	۱	۴۰/۱۵ ۰/۰۰۱۷۲۲	<۰/۰۰۰۱ significant ۰/۹۶۷۲
AB	کشش سطحی زاویه تماس	۴۳/۸۳ ۲۵/۶۷	۱	۰/۴۱ ۰/۹۲	۰/۵۲۷۱ ۰/۳۴۳۶
AC	کشش سطحی زاویه تماس	۰/۰۰۰ ۰/۰۰۰	۰		
AD	کشش سطحی زاویه تماس	۱۳/۲۹ ۲/۱۵	۱	۰/۱۲ ۰/۰۷۷	۰/۷۲۷۱ ۰/۷۸۲۷
BC	کشش سطحی زاویه تماس	۱۲۲/۹۹ ۸۸/۹۵	۱	۱/۱۵ ۳/۲۰	۰/۲۹۲۱ ۰/۰۸۳۱
BD	کشش سطحی زاویه تماس	۳۱/۰۰ ۱۰/۱۱	۱	۰/۲۹ ۰/۳۶	۰/۵۹۴۴ ۰/۵۵۰۷
CD	کشش سطحی زاویه تماس	۷/۵۰ ۶/۵۳	۱	۰/۰۷۰ ۰/۲۳	۰/۷۹۳۱ ۰/۶۳۱۱

در راندمان میکروسکوپیک در روش‌های ازدیاد برداشت به عنوان پاسخ انتخاب شدند. نتیجه‌های به‌دست آمده از آزمایش‌ها و تحلیل‌ها نشان داد که تمام فاکتورهای پیش گفته به جز زمان مغناطیسی شدن بر روی کشش سطحی مؤثر بوده ولی تنها شدت میدان مغناطیسی بر روی زاویه تماس تأثیرگذار است. بنابراین می‌توان به صورت کلی بیان کرد که محلول‌های پلیمری با پایه آب مغناطیسی می‌توانند علاوه بر افزایش راندمان ماکروسکوپیک (به دلیل افزایش گرانروی آب در اثر انحلال پلیمر)، موجب افزایش راندمان میکروسکوپیک (به دلیل تأثیر بر کشش سطحی و زاویه تماس) نیز گردند و به عنوان یک روش سبز و کارآمد جایگزین مناسبی برای روش‌هایی مثل سیلاب زنی با پلیمر–سورفکتانت/آلکالین مطرح باشند.

قدردانی

از معاونت پژوهشی دانشگاه حکیم سبزواری و دانشگاه صنعتی بیرجند که هزینه انجام این پژوهش را تأمین نموده‌اند.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۲۸ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۰۷

مراجع

[1] Alvarado V., Manrique E., Enhanced Oil Recovery: An Update Review, *Energies*, **3:** 1529-1575 (2010).

[2] Lee J.-Y., Shin H.-J., Lim J.S. Selection and Evaluation of Enhanced Oil Recovery Method Using Artificial Neural Network, *Geosystem Eng.*, **14(4):** 157-164 (2011).

[3] Thomas S., Enhanced Oil Recovery-an Overview, *Oil Gas Sci Technol-Revue IFP*, **63(1):** 9-19 (2008).

[4] Meybodi H.E., Kharrat R., Wang X., Study of Microscopic and Macroscopic Displacement Behaviors of Polymer Solution in Water-Wet and Oil-Wet Media, *Transport in Porous Med.*, **89(1):** 97-120 (2011).

[5] Abidin A., Puspasari T., Nugroho W. Polymers for Enhanced Oil Recovery Technology, *Procedia Chem.*, **4:** 11-16 (2012).

[6] Shekhawat D.S., Aggarwal A., Agarwal S., Imtiaz M.D., Magnetic Recovery-Injecting Newly Designed Magnetic Fracturing Fluid With Applied Magnetic Field for EOR, *In SPE Asia Pacific Hydraulic Fracturing Conference*. SPE (2016).

[7] Torquato S., "Random Heterogeneous Materials: Microstructure and Macroscopic Properties", Vol. 16. Springer Science & Business Media (2013).

[8] Hosseini H., NorouziApourvari S., Schaffie M., Wettability Alteration of Carbonate Rocks *via* Magnetic Fields Application, *J. Petro. Sci. Eng.*, **172:** 280-287 (2019).

[9] Esmaeilnezhad E., Choi H.J., Schaffie M., Gholizadeh M., Ranjbar M., Characteristics and Applications of Magnetized Water as a Green Technology, *J. Clean. Prod.*, **161:** 908-921 (2017).

[10] Ghorbani S., Gholizadeh M., Brito J., Effect of Magnetized Water on the Mechanical and Durability Properties of Concrete Block Pavers, *Materials*, **11:** 1647(2018).

[11] Shi L., Zhu S., Guo Z., Zhao W., Xue X., Wang X., Ye Z., Experimental Study on the Effect of Polymer Injection Timing on Oil Displacement in Porous Media, *Processes*, **8(1):** 93 (2020).

[12] Karambeigi M.S., Nasiri M., Asl A.H., Emadi M.A., Enhanced Oil Recovery in High Temperature Carbonates Using Microemulsions Formulated with a New Hydrophobic Component, *J. Ind. Eng. Chem.*, **39:** 136–148 (2016).

[13] Firozjaii A.M., Saghafi H.R., Review on Chemical Enhanced Oil Recovery Using Polymer Flooding: Fundamentals, Experimental and Numerical Simulation, *Petroleum*, **6:** 115-122 (2019).

[14] Teklu T., Alameri W., Kazemi H., Graves R.M., "Contact Angle Measurements on Conventional and Unconventional Reservoir Cores", *Unconventional Resources Technology Conference*, San Antonio, Texas, 2297-2311 (2015).

[15] Al-Shakry B., Skauge T., Shaker Shiran B., Skauge A., Polymer Injectivity: Investigation of Mechanical Degradation of Enhanced Oil Recovery Polymers Using In-Situ Rheology, *Energies*, **12(1):** 49 (2019).

[16] Pang X.F., Zhong L.S., The Suspension of Water Using a Superconductive Magnetic-Field and Its Features, *IEEE Trans. Appl. Supercond*. **26(7):** 1-4 (2016).

[17] Mahmoud B., Yosra M., Nadia A., Effects of Magnetic Treatment on Scaling Power of Hard Waters, *Sep. Purif. Technol*. **171:** 88-92 (2016).

[۱۸] عیدی زاده م.، آذری ا.، بهینه سازی جذب همزمان کروم (III) و مس (II) از پساب به وسیله کیتوزان با استفاده از طراحی آزمایش تاگوچی، *نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران*، **۳۶(۳):** ۱۱۵ تا ۱۲۴ (۱۳۹۶).

[19] Mohammadi Doust A., Rahimi M., Feyzi M., An Optimization Study by Response Surface Methodology (RSM) on Viscosity Reduction of Residue Fuel Oil Exposed Ultrasonic Waves and Solvent Injection, *Iran. J. Chem. Chem. Eng*. IJCCE), **13(1):** 3-19 (2016).