

بررسی عملکرد امواج فراصوتی در بهبود توان تولید نفت با استفاده از آزمایش‌های سیلاب‌زنی

امید رحمانی^۱، شهرام محمدامین پور^۲، عرفان محمدیان^۳

۱- دانشیار، گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی، واحد مهاباد، دانشگاه آزاد اسلامی، مهاباد

۲- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۳- استادیار، گروه مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی مارا، کوالالامپور، مالزی

(دریافت ۱۳۹۹/۰۶/۳۰، پذیرش ۱۴۰۰/۰۶/۰۲)

چکیده

یکی از روش‌های بهبود توان تولید نفت، استفاده از امواج فراصوت است. با توجه به شناخت جزئی از ساز و کارهای در برگیرنده در استفاده از امواج فراصوت، آزمایش‌های سیلاب‌زنی به صورت سری‌های مستقیم و تحریک شده‌ی فراصوت با استفاده از مبدل‌های فراصوتی مورد بررسی قرار گرفتند. در این رابطه، دو سیال کروزن (نفت سفید) و وازلین به عنوان دو فاز نفتی به ترتیب با گرانشی ۰/۹۹ سانتی‌پواز و ۲۲ سانتی‌پواز در سیستم استفاده شدند. برای افزایش شناخت ساز و کارهای تشکیل‌دهنده، آزمایش‌های جریان سیال و افزایش دما با استفاده از حمام فراصوت انجام شدند. دلیل اصلی استفاده از آزمایش‌های جریان سیال و افزایش دما، مشاهده اثرات امواج فراصوت بر بازبایی نفت بوده است. با استفاده از فرآیند سیلاب‌زنی، ۱۶ درصد بهبود در برداشت نفت مشاهده گردید. تشکیل امولسیون، کاهش گرانشی و کاویتاسیون به عنوان ساز و کارهای کمک‌کننده در بهبود توان تولید نفت شناسایی شدند. همچنین شبیه‌سازی تغییرات فشار و سرعت امواج فراصوت به وسیله نرم‌افزار کامسول در طول ماسه‌پک انجام گرفت. به عنوان نتیجه‌ای از عملکرد امواج فراصوت در بهبود توان تولید نفت، از این مطالعه می‌توان برای شناسایی بهتر ساز و کارهای در برگیرنده در بازبایی نفت استفاده کرد.

کلمات کلیدی

بهبود توان تولید نفت، امواج فراصوت، روش سیلاب‌زنی، ماسه‌پک، کامسول.

۱- مقدمه

تشکیل شده در سیال که معمولاً تولیدکننده برآشفتگی است هنگامی به کمک می‌آید که امواج فراصوت باعث قوی‌تر شدن این برآشفتگی و تشکیل فرم خاصی از امولسیون می‌شوند. اثرگرمایی ایجاد شده به وسیله امواج فراصوت هم حاصل مجموعه‌ای از عوامل است. به عنوان مثال، امواج صوتی جذب شده به وسیله محیط، خود عاملی برای تبدیل انرژی به گرماست. همچنین، اصطکاک و سایش بین مرزها نیز باعث به وجود آمدن گرما و افزایش دما می‌شود و نیز حفره‌زایی که خود عامل مهمی در آزاد کردن گرمای زیاد است. مجموعه این عوامل باعث به وجود آمدن اثر گرمایی به وسیله امواج فراصوت می‌شوند که این گرما خود عاملی برای کاهش گرانروی و افزایش برداشت در مخازن نفتی است.

چندین محقق کاربرد امواج فراصوت در فرآیندهای مختلف مانند تخلیه گرانشی و سیلاب‌زنی را مورد بررسی قرار داده‌اند [۴-۷]. داهون و کمپیل^۱ [۱]، سیستمی را برای بهبود بازیافت نفت با استفاده از امواج صوت اختراع کردند. حمیدی و همکاران [۶] در آزمایشگاه مشاهده کردند که قطره‌های نفت پس از القای محرک صوتی افزایش می‌یابند. پویسیو^۲ و همکاران [۷] تاثیر امواج صوتی بر جریان مایع را در ماسه‌سنگ بریاً بررسی کردند و دریافتند که گرادیان فشار داخل مغزه‌ها، در اثر انرژی صوت کاهش می‌یابد. این اثر به کاهش گرانروی سیالات نسبت داده شده است. آمو^۳ و همکاران [۴] افزایش در بازیابی نفت را با استفاده از محرک فراصوت در روش سیلاب‌زنی، به تغییرات نفوذپذیری نسبی هر دو فاز نسبت دادند. گو^۵ و همکاران [۸] کاربرد امواج فراصوت در چین را مورد بحث قرار دادند. آن‌ها همچنین آزمایش‌هایی برای نشان دادن اثرات امواج فراصوت بر گرانروی انجام دادند و متوجه شدند که گرانروی به دلیل مواجه شدن با امواج فراصوت به طور موقت کاهش یافته است. نجفی [۵] به صورت آزمایشگاهی و تحلیلی، اثر امواج فراصوتی بر روی تخلیه گرانشی و نفوذ نفت با استفاده از مایعات با گرانروی‌های مختلف را مورد بررسی قرار داد. نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی ایشان نشان داد که در مدت زمان ۱۰۰۰ دقیقه، ۲۰ درصد سانتی‌گراد به دمای سیال‌ها افزوده شده است. علی‌رغم تعداد زیادی مقالات علمی چاپ شده و برخی آزمایش‌های میدانی در مورد این موضوع، هنوز ساز و کارهای دقیق امواج فراصوت در بهبود توان تولید نفت به طور کامل درک نشده‌اند.

نیکولافسکی و ستیانوا^۶ [۹] نظریه‌ای در مورد به کارگیری امواج فراصوت پیشنهاد کردند که در نتیجه اثرات غیرخطی

استفاده از امواج لرزه‌ای به عنوان روشی پیشرفته برای بهبود برداشت نفت از مخازن نفتی، به دهه‌ی ۱۹۵۰ باز می‌گردد [۵-۱]. استفاده از روش امواج فراصوت در بهبود توان تولید نفت از چاه‌ها دارای شایستگی‌هایی است که ممکن است در مواجهه با مشکلات زیر بیشتر مورد توجه قرار گیرد:

- هنگامی که چاه به وسیله گل حفاری که به مدت زیادی جریان داشته و به دلیل مصرف بیش از حد گل دچار آسیب شده باشد.
- چاه‌هایی که تزریق آب و اسید در آنها بی‌فایده بوده و تاثیری در ازدیاد برداشت نداشته باشند.
- چاه‌هایی که پتانسیل بالا برای تولید و بهره‌دهی دارند اما قدرت تولیدی آنها کم است.
- چاه‌هایی که نفت سنگین و پارافین دارند و به وسیله نمک و رسوبات آسیب دیده‌اند.

با توجه به فاصله محدودی که امواج فراصوت (تعبیه شده در داخل چاه‌های اکتشافی) ممکن است در اطراف چاه حرکت کنند، بیشتر کاربردهای میدانی امواج فراصوت محدود به حذف پدیده آسیب سازند در ناحیه نزدیک به چاه اکتشافی بوده است. پدیده آسیب سازند با تاثیر بر روی تراوایی سنگ مخزن، قابلیت تولید یک چاه نفتی یا گازی و یا قابلیت تزریق‌پذیری یک چاه را نسبت به حالت طبیعی آن کاهش می‌دهد. به علاوه، استفاده از امواج فراصوت در بهبود توان تولید نفت نکات برجسته‌ای دارد که می‌توان به روش سریع با عملکرد آسان، حفاظت از مرزهای نفتی و چاه در مقابل آسیب‌ها، هزینه‌ی عملیاتی کم اما سوددهی بالا و کاربرد و تلفیق آن با دیگر تکنولوژی‌های ازدیاد برداشت مورد اشاره کرد.

از دلایل اصلی اثرگذار بر روی بهبود توان تولید نفت از چاه‌ها می‌توان به وجود کشش سطحی بین نفت و آب (نیروهای موئینگی)، نسبت تحرک بالا و ناهمگونی در سنگ مخزن اشاره کرد. استفاده از امواج فراصوت ممکن است به عنوان روشی مطمئن در بهبود توان تولید نفت به کار گرفته شود که با کشش سطحی میان آب و نفت مقابله کرده و در نتیجه فشار موئینگی کاهش یابد. زمانی که امواج فراصوت در محیط ارتجاعی گسترش می‌یابد، دامنه و شتاب این امواج نیز تغییرات قابل توجهی پیدا می‌کنند که به انعطاف‌پذیرتر شدن، تغییر در اصطکاک و تصفیه نفت به هیدروکربورهای سبک‌تر و از هم گسیخته منجر می‌شوند. همچنین سوسپانسیون

شده به وسیله امواج فراصوت بر روی یک ماسه‌پک غیرمتراکم انجام شده است، سپس با استفاده از فرآیند سیلاب‌زنی تحریک شده، ساز و کارهایی که به افزایش در بازیابی نفت منجر می‌شوند، بررسی شده است. علاوه بر این، برخی آزمون‌های مکمل (به عنوان مثال: آزمایش‌های جریان سیال و افزایش دما) برای بررسی جزئیات بیشتر ساز و کارهای امواج فراصوت همراه با شبیه‌سازی تغییرات فشار و نیز سرعت امواج فراصوت در طول بستر ماسه‌ای (اجرا شده به وسیله نرم‌افزار کامسول) انجام گرفته است.

۲- مواد

برای شبیه‌سازی آب سازندی، دو نوع آب نمک معمولی^۹ با غلظت ۴٪ و چگالی ۱٫۰۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب و آب نمک هوازده شده^{۱۰} با غلظت ۳٪ و چگالی ۱٫۰۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب برای آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. کروزن و وازلین به عنوان سیستم فاز غیر ترشونده در آزمایش‌ها استفاده شدند. گرانیروی سیالات با استفاده از گرانیروی سنج کانون-فنسک^{۱۱} ۱۰۰ در دمای ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شدند. وازلین با چگالی ۰٫۸۵۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب و کشش سطحی ۳۸ دین بر سانتی‌متر و کروزن با چگالی ۰٫۷۷۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب و کشش سطحی ۳۱ دین بر سانتی‌متر در مقایسه با آب به کار برده شدند. کروزن به عنوان سیال نیوتنی رفتار می‌کند در حالی که وازلین رفتار جریان برشی غیرنیوتنی را نشان می‌دهد. هدف اصلی آزمایش بررسی اثر امواج فراصوت برای بهبود توان تولید نفت بوده است، به همین جهت، به دلیل در دست نبودن نفت سازند، از دو سیال کروزن با گرانیروی ۰٫۹۹ سانتی‌پواز و وازلین با گرانیروی ۲۲ سانتی‌پواز و مشابه با آنچه در مخازن نفتی یافت می‌شوند، استفاده شده است.

۳- روش تحقیق

در این بخش فعالیت‌های انجام گرفته بیان می‌شود.

۳-۱- آزمایش‌ها

دو عدد مبدل فراصوت یکسان برای انجام آزمایش‌ها به کار گرفته شدند. ژنراتور فراصوت کرس^{۱۲} با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز و توان خروجی ۱۰۰ تا ۵۰۰ وات مورد استفاده قرار گرفت. یک پمپ گریز از مرکز با نرخ تزریق ثابت ۳ میلی‌لیتر

مربوط به امواج لرزه‌ای و صوتی با فرکانس پایین در محیط متخلخل اشباع شده، تولید غیرخطی امواج فراصوت با فرکانس بالا به وسیله امواج لرزه‌ای ممکن می‌شود. این در حالتی امکان‌پذیر است که موج کوتاه تشدید شده باشد. بر اساس این نظریه، انرژی فراصوت (امواج فرکانس بالا) دلیل اصلی بهبود توان تولید نفت از چاه‌ها پس از فعالیت‌های طبیعی یا مصنوعی است، بنابراین مطالعات بیشتری برای شناخت اثرات امواج فرکانس بالا بر بازیابی نفت مورد نیاز است. برای این منظور، استفاده از امواج فرکانس بالا در مدل ماسه‌پک ممکن است به عنوان راهکار پیشنهادی مورد توجه قرار گیرد. نتایج آزمایشگاهی نشان داده است که استفاده از امواج فراصوت موجب بهبود بازیابی نفت از مخزن ماسه‌سنگی می‌شود [۱۰]. بر اساس مدل توسعه داده شده توسط محسن و مریبوت [۱۰]، با به کارگیری امواج فراصوت، نفوذپذیری ماسه‌سنگ کاهش پیدا می‌کند. از سوی دیگر، مقدار نفت بازیابی شده با کاهش گرانیروی نفت افزایش می‌یابد. یکی از عوامل مهم در تولید و برداشت از مخازن نفتی، میزان گرانیروی نفت خام تولیدی است، به نحوی که هرچه نفت مخزن دارای گرانیروی بالاتری باشد، امکان تولید و برداشت از آن کاهش می‌یابد [۱۳-۱۱]، بنابراین در صورت کاهش گرانیروی نفت می‌توان میزان برداشت از مخزن نفتی را افزایش داد.

افزایش دما در طول امواج فراصوت تحریک شده توسط برخی محققان گزارش شده است [۱۴-۱۲]، اما به نظر می‌رسد که روش‌های استفاده شده در مطالعات قبلی نتوانسته‌اند تغییرات واقعی دما را در سیستم نشان دهند و در نتیجه اثر افزایش دما به اندازه کافی مورد بحث قرار نگرفته است. برای مثال، حمیدی و همکاران [۱۴] آزمایش‌های اندازه‌گیری گرانیروی را در دمای ثابت تحت امواج فراصوت با فرکانس‌های متفاوت از ۲۵ تا ۶۸ کیلوهرتز انجام دادند. در مطالعه ایشان، تغییرات دما در بهبود توان تولید نفت سنگین با استفاده از امواج فراصوت نادیده گرفته شده است. همچنین ینگ‌خین^۷ و همکاران [۱۱] اثرات امواج فراصوت در بهبود توان تولید نفت را در دمای اتاق بررسی و پیشنهاد کردند که افزایش دما ممکن است موجب بهبود توان تولید نفت شود. به علاوه، در مطالعه انجام شده توسط قمرطالع^۸ و همکاران [۱۲]، بهینه‌سازی افزایش برداشت از چاه‌های نفتی به وسیله امواج فراصوت بدون در نظر گرفتن تغییرات دما ارایه شده است.

در این مطالعه، یک سری از فرآیندهای سیلاب‌زنی (ابتدا اشباع شده از نفت و سپس آب) به صورت مستقیم و تحریک

۳-۲- محیط متخلخل

دانه‌های ماسه کوارتز^{۱۴} در اندازه اسمی ۱۰۶ تا ۲۲۵ میکرومتر در یک نمونه استیل ضدزنگ به طول ۱۰۲ سانتی‌متر و قطر ۳/۸ سانتی‌متر برای نشان دادن محیط متخلخل در تمام آزمایش‌های جابه‌جایی بسته‌بندی شدند. قبل از استفاده، دانه‌ها به دقت شسته شده و در کوره خشک شده بودند. برای اطمینان از همگن بودن دانه‌های ماسه، ماسه‌پک بر روی یک لرزاننده الکتریکی با سرعت ۱۵۰ دور بر دقیقه^{۱۵} کار گذاشته شد. ۵ سانتی‌متر مکعب از دانه‌های ماسه در هر مرحله به ماسه‌پک ریخته شد. ریخت‌شناسی دانه‌های استفاده شده، از نیمه زاویه‌دار تا نیمه گرد شده را شامل می‌شود. از نظر دانه‌بندی رسوبات، دانه‌های گرد شده تمایل به تخلخل بیشتر و در نتیجه نفوذپذیری بالاتر دارند. تخلخل و نفوذپذیری ماسه‌پک به ترتیب ۳۳٪ و ۴۰۰ میلی‌داری اندازه‌گیری شد که با تراوایی گزارش شده از مخازن نفتی قابل مقایسه و ممکن است از ۰/۱ تا ۱۰۰۰ میلی‌داری و یا بیشتر باشد. همچنین کارایی امولسیون‌های ساخته شده در عملیات بهبود تولید نفت با استفاده از دو مدل همگن و ناهمگن تحت دبی‌های متفاوت بررسی شد، بنابراین برای کاهش امکان کانالیزه شدن^{۱۶}، دبی تزریقی ۱/۰ سی‌سی بر دقیقه در نظر گرفته و افت فشار به طور منظم به وسیله فشارسنج‌ها کنترل شد. لحظه‌ای که افت فشار شدید در سیستم فشارسنج‌ها دیده شد، به عنوان زمان برون‌شکافت^{۱۷} در نظر گرفته شد.

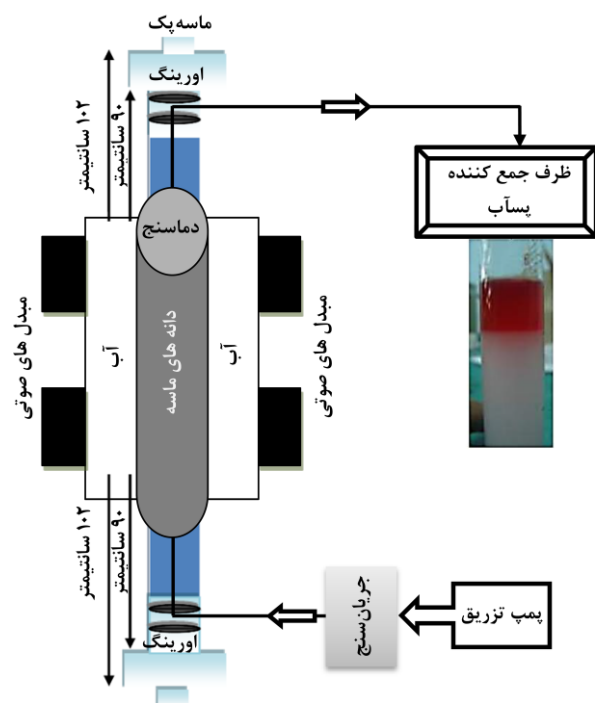
۳-۳- آزمایش جابه‌جایی

برای انجام آزمایش جابه‌جایی، تحت فرآیند سیلاب‌زنی، ماسه‌پک اشباع شده از نفت به دست آمد. در نقطه اشباع‌شدگی، اشعه فراصوت (۴۰ کیلوهرتز و ۲۵۰ وات) همزمان با شروع سیلاب‌زنی اعمال شد. مانند فرآیند سیلاب‌زنی حجم‌های مشابهی از آب تزریق شدند و در هر مرحله مقدار بازیابی نفت محاسبه گردید. نمودارهای بازیابی بر حسب زمان برای هر دو آزمایش در حضور و غیاب امواج فراصوت به دست آمد.

۳-۴- آزمایش‌های درجه حرارت و جریان یافتن سیال

دو نوع آزمایش تکمیلی بررسی آزمایش جریان یک فاز و همچنین آزمایش افزایش دما انجام گردید. آزمایش جریان یک فاز با استفاده از همان تنظیمات آزمایش‌های جابه‌جایی انجام شد. در این آزمایش، مغزه با آب نمک معمولی و هوازده اشباع

بر دقیقه برای تزریق مایعات در تمام آزمایش‌های سیلاب‌زنی به کار برده شد. برای ثابت نگه‌داشتن نرخ جریان سیال، از یک جریان‌سنج متصل به پمپ استفاده گردید. در آزمایش امواج فراصوت به منظور کالیبره کردن محورهای افقی و عمودی دستگاه، از نمونه مرجع^{۱۳} استفاده شد. نمونه مرجع، نمونه همگنی است که بیش از ۱۰ مرتبه آنالیز شده و نتایج آن در محدوده قابل قبولی بوده است و به عنوان مرجع کنترلی داده‌های آزمایشگاهی استفاده می‌گردد. بر روی نمونه مرجع، فرآیندهای اندازه‌گیری معتبری برای تعیین ماهیت، همگنی و پایداری و تعیین مقادیر مشخصه‌های مختلف انجام می‌شود. ویژگی‌های عمده نمونه مرجع شامل همگنی، پایداری و قابلیت ردیابی اندازه‌شناسی است. همگنی به معنی یکسان بودن آماری کلیه نمونه‌های تولید شده است. پایداری به معنی ثابت بودن ویژگی‌ها در یک بازه‌ی زمانی قابل توجه و قابل استفاده است. قابلیت ردیابی اندازه‌شناسی به معنی ارتباط یکای مشخصه اندازه‌گیری شده و روش اندازه‌گیری با سیستم بین‌المللی اندازه‌گیری و یکاها است. شکل ۱ طرح شماتیک از فرآیند سیلاب‌زنی را نشان می‌دهد.



شکل ۱: سامانه آزمایشگاهی فرآیند سیلاب‌زنی

استفاده از تفاوت بین چگالی آب خالص (ρ_w) و هیدروکربن (ρ_{hc})، دما و دمای بحرانی (T_r) انطباق دادند. این انطباق در برگزیده داده‌های اندازه‌گیری شده از متان، پروپان و سیستم آب-بنزن است.

بر اساس معادله فیروزآبادی و رامی، کشش سطحی (σ) بین فاز آب-هیدروکربن (گاز یا نفت) را می‌توان محاسبه کرد. در این رابطه a_1 (۳,۳۸۵۸) و b_1 (۰,۶۲۵۹-) بر حسب دین بر سانتی‌متر یا میلی‌نیوتن بر متر هستند.

$$\sigma^{1/4} = \frac{a_1 \Delta \rho^{b_1}}{T_r^{0.3125}} \quad (1)$$

$$\Delta \rho = \rho_w - \rho_{hc} \quad (2)$$

جدول ۱ کشش سطحی وازلین و کروزن با آب را در دماهای مختلف نشان می‌دهد که بر اساس معادله فیروزآبادی و رامی^{۱۸} محاسبه شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش دما کشش سطحی برای هر دو سیستم وازلین-آب و کروزن-آب کاهش می‌یابد. کاهش کشش سطحی بین سیالات درون محیط متخلخل، باعث افزایش عدد موئینگی می‌گردد [۱۶]. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که مقدار کاهش کشش سطحی در برابر افزایش دما به اندازه‌ای نیست که بتواند اثرات قابل توجهی بر روی عدد موئینگی داشته باشد، بنابراین قادر به کاهش اشباعیت نفت باقی‌مانده نیست. همچنین بحث یاد شده تنها مربوط به کاهش کشش سطحی به عنوان نتیجه‌ای

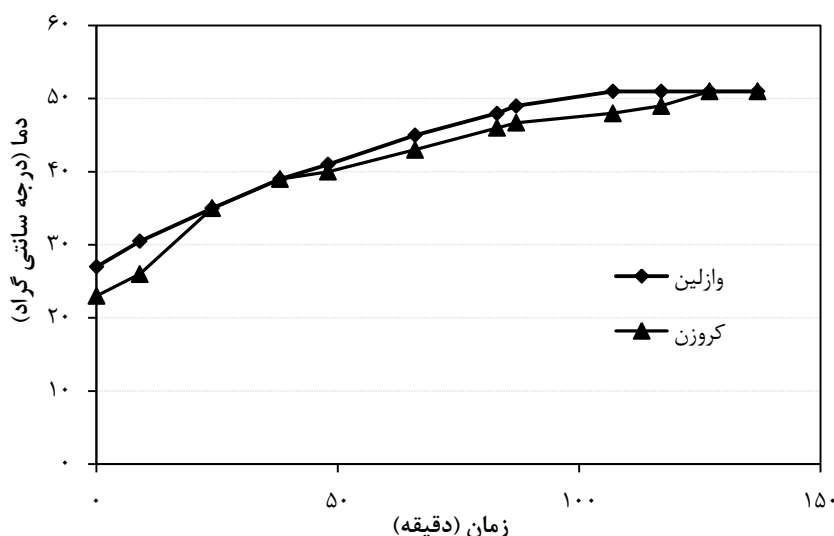
گردید، سپس در معرض امواج فراصوت قرار گرفت. تغییرات فشار در سیستم نیز ثبت شدند. آزمایش افزایش دما با استفاده از ستون فراصوت انجام شد. به طوری که نمونه اشباع شده (با نفت و آب نمک) در معرض امواج فراصوتی با خروجی‌هایی با توان مختلف قرار گرفت و دمای سیستم (وازلین-آب و کروزن-آب) از طریق یک دماسنج نصب شده در ماسه‌پک اندازه‌گیری شد.

۴- بررسی و تحلیل نتایج

۴-۱- آزمایش افزایش دما

در این مطالعه، دمای سیستم با آب نمک معمولی و ماسه-یک اشباع شده به مقدار ۴، ۱۲ و ۱۶ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برای خروجی‌های با توان مربوطه ۱۰۰، ۲۵۰ و ۴۰۰ وات افزایش یافت. در بخش دوم آزمایش، دما برای وازلین و کروزن در حمام فراصوت اندازه‌گیری شد. با توجه به ضریب رسانایی مشابه ۰,۱۴۵ و ۰,۱۴۶ (وات بر مترمربع درجه سانتی‌گراد) به ترتیب برای وازلین و کروزن، در هر دو مورد صعود دما تقریباً به طور مشابه دیده شد. شکل ۲ افزایش دما برای وازلین و کروزن را نشان می‌دهد.

افزایش دما ممکن است بر روی خواص سیال یعنی گرانروی و کشش سطحی تاثیر بگذارد. کشش سطحی مابین نفت و آب نمک تابعی از دما است. در دمای بالا، کشش سطحی پایین‌تر است. فیروزآبادی و رامی [۱۵] کشش سطحی را با



شکل ۲: نمایش صعود دما برای وازلین و کروزن در مدت زمان ۱۲۰ دقیقه

از سنگ می‌شود. تغییرات در فشار برشی، موجب تغییرات در گرانروی سیال نیز خواهد شد. در واقع امواج فراصوت به وسیله لرزش‌های متناوب خود باعث به وجود آمدن این فشار برشی شده و گرانروی را کاهش می‌دهد [۱۹].

طبق نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده، با افزایش زمان تابش امواج فراصوت طی زمانی معین، گرانروی نفت خام روند نزولی داشته و تا این زمان بهینه از تابش امواج فراصوت، گرانروی نفت خام کاهش می‌یابد [۱۶]. از آنجا که گرانروی سیال در دماهای مختلف مورد نیاز است، از رابطه میهن و گلاسو^{۱۹} هم مقدار گرانروی محاسبه شده است. مقادیر اندازه‌گیری شده گرانروی حاصل از آزمایش‌های افزایش دما با استفاده از گرانروی سنج کانون- فنسک ۱۰۰، ۵٪ واریانس مقادیر محاسبه شده با استفاده از رابطه میهن و گلاسو را نشان می‌دهد. شکل ۳ کاهش گرانروی برای هر دو سیال (الف) وازلین، (ب) کروزن و (ج) آب حاصل از آزمایش‌های افزایش دما با استفاده از گرانروی سنج کانون- فنسک ۱۰۰ را با یک روند خطی در برابر افزایش دما نشان می‌دهد.

۴-۲- آزمایش جریان یک فازی

شکل ۴ گرادیان فشار بر حسب زمان تابش امواج فراصوت با شدت‌های مختلف برای جریان یک فازی آب نمک معمولی را نشان می‌دهد که ممکن است در اثر کاپیتاسیون [۲۰، ۲۱]، نفوذپذیری مطلق و گرانروی سیال [۲۲] پدید آید. با توجه به شدت امواج فراصوت، در ابتدا فشار به اوج می‌رسد و سپس به مقادیر پایین‌تر کاهش پیدا می‌کند که این تغییر رفتار فشار ناشی از کاپیتاسیون [۲۰] است. در پدیده کاپیتاسیون در ابتدا حباب‌هایی ایجاد می‌شود و لازم است که این حباب‌ها تحت شرایط خاصی دچار فروپاشی گردند. در صورت فروپاشی سریع حباب‌های ایجاد شده، فرصت انتقال جرم و حرارت بین محتویات داخل حباب و سیال بیرونی به کمترین میزان می‌رسد و دمای بخار داخل حباب در آخرین لحظات قبل از فروپاشی به شدت افزایش پیدا می‌کند. این افزایش دما شرایط را برای شکسته شدن پیوند مولکول‌های داخل و مجاور حباب در حال فروپاشی مهیا می‌کند [۲۱].

در شرایط عادی برای محیط، سیال در برگیرنده اتم‌های بسیار ریزی است که گاز و یا بخار غیرقابل انحلال دارد. با تغییر فشار محیط سیال به فشار بخار، این اتم‌ها بزرگتر شده و به صورت حفره‌هایی خود را نشان می‌دهند. در این حالت، به دلیل فرآیند تبخیر، فشار داخلی این حفره‌ها با فشار بخار مایع

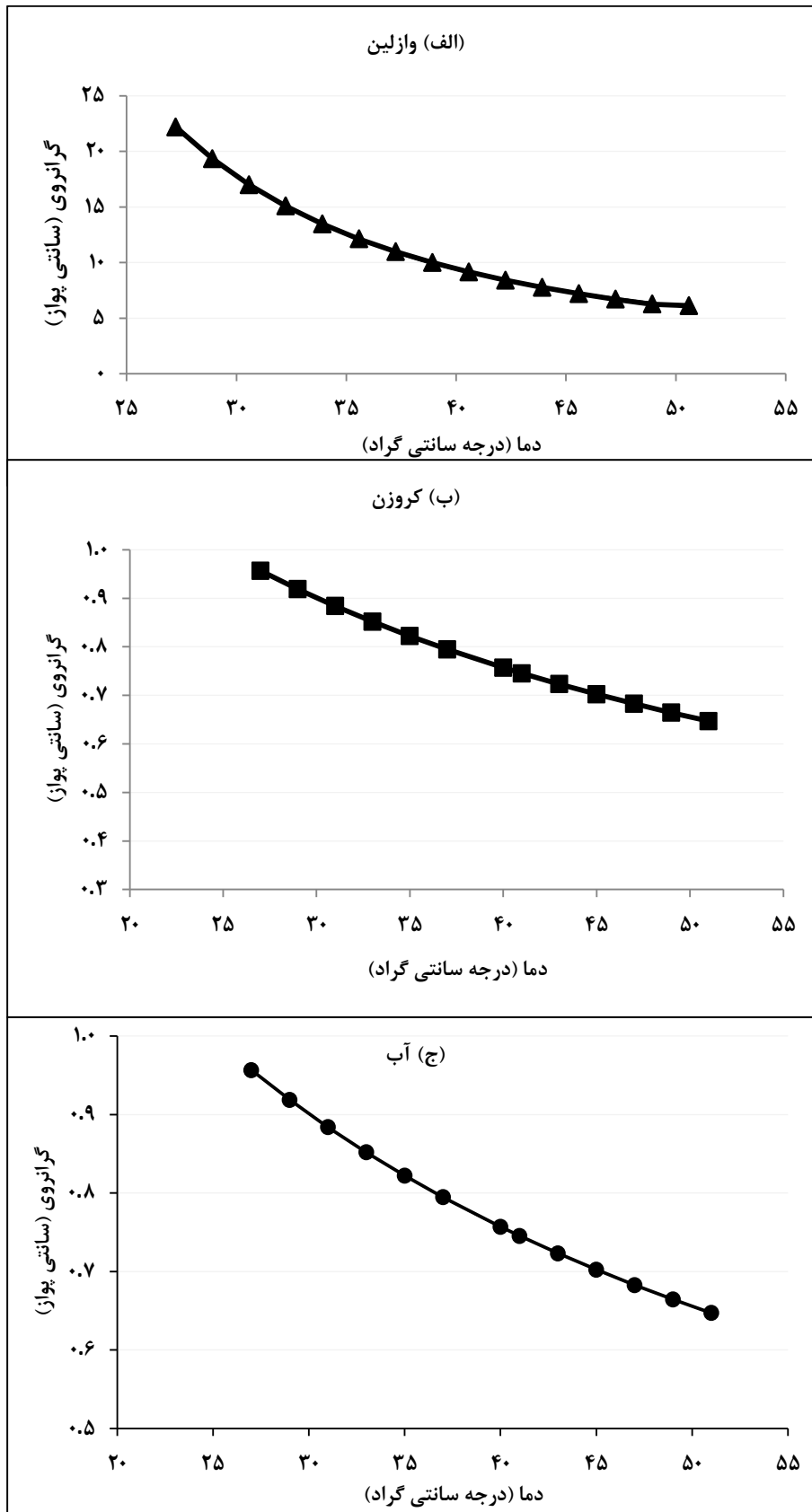
از افزایش دما است. با این حال، اثر مستقیم امواج فراصوت بر کاهش کشش سطحی در این بخش حذف شده است. از این رو، می‌توان نتیجه گرفت که اگر امواج تاثیری بر کاهش کشش سطحی داشته باشند، با افزایش دمای سیستم مرتبط نخواهند بود. از طرف دیگر، تاباندن امواج فراصوت با قدرت بالا باعث ایجاد القای حرارتی و حفره‌زایی در سیال و در نهایت به دلیل افزایش دما باعث کاهش گرانروی خواهد شد.

جدول ۱: کشش سطحی برای وازلین و کروزن با آب در دماهای مختلف بر اساس معادله فیروزآبادی و رامی

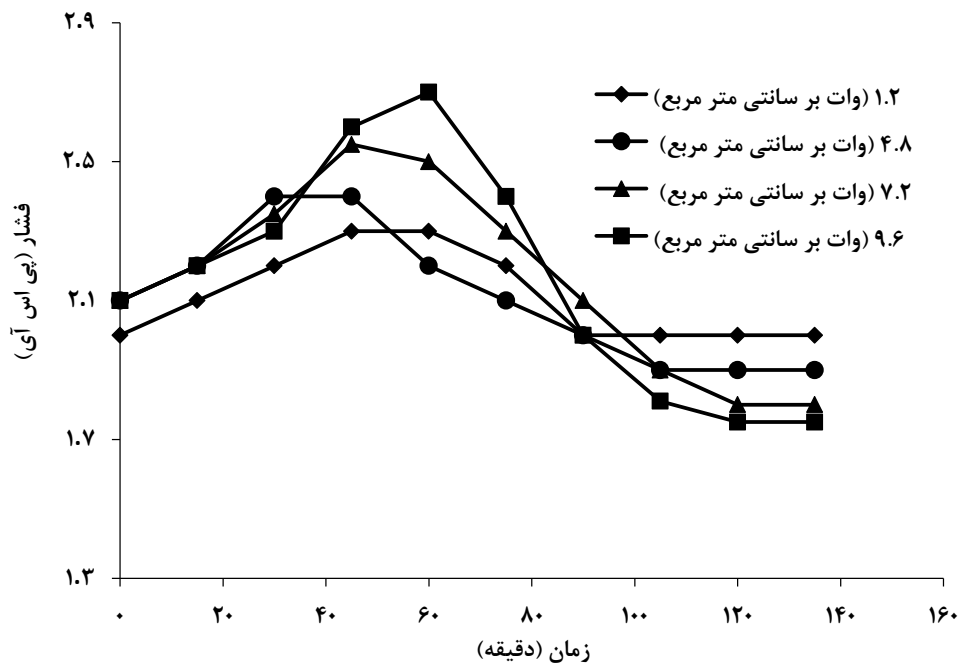
کروزن (دین بر سانتی‌متر)	وازلین (دین بر سانتی‌متر)	دما (درجه سانتی‌گراد)
۳۱	۳۸	۲۳
۳۰٫۵	۳۷٫۴	۲۷
۳۰	۳۶٫۸	۳۱
۲۹٫۵	۳۶٫۲	۳۵
۲۹	۳۵٫۶	۳۹
۲۸٫۶	۳۵	۴۳
۲۸٫۱	۳۴٫۵	۴۷
۲۷٫۷	۳۳٫۹	۵۱
۲۷٫۳	۳۳٫۴	۵۵

گرانروی سیالات تابعی از دما است [۱۳]. صعود دما به اندازه ۲۴ درجه سانتی‌گراد بر گرانروی سیالات تاثیر می‌گذارد. افزایش دما باعث می‌شود گرانروی آب و نفت کاهش یابد. امواج فراصوت علاوه بر افزایش دما که سرعت انتقال جرم را بهبود می‌دهد، نفت را دچار لرزش‌های مکانیکی و هیدروکربن‌های سنگین نفتی را به ترکیبات سبک‌تر تبدیل می‌کند.

زمانی که این هیدروکربن‌های سنگین شکسته می‌شوند، دیگر گرانروی نفت قابلیت برگشت به حالت ابتدایی خود را ندارد [۱۷، ۱۸]. سونگ و دیگران [۱۹] گزارش دادند که با گسترش امواج فراصوت در محیط ارتجاعی، دامنه و شتاب آنها نیز تغییرات قابل توجهی پیدا می‌کنند و همگی این موارد به انعطاف‌پذیرتر شدن، تغییر در اصطکاک سطوح و شکسته شدن و از هم گسیخته شدن اجزای سنگین‌تر منجر می‌شوند. هرچند در چگالی سیال (کروزن و وازلین) و سنگ خود باعث ایجاد تغییرات در لرزش‌ها می‌شود و همین عامل رابطه حرکتی شبیه هم در سیال و سنگ ایجاد می‌کند و هنگامی که این اتفاق رخ دهد، ارتباط بین سنگ و سیال ضعیف و باعث جدا شدن سیال



شکل ۳: تغییرات گرانروی (الف) وازلین، (ب) کروزن و (ج) آب در برابر دما اندازه‌گیری شده با گرانروی سنج کانون- فنسک ۱۰۰



شکل ۴: گرادیان فشار بر حسب زمان تابش امواج فراصوت با شدت‌های مختلف برای جریان یک فازی آب نمک معمولی

طول سونیکاسیون با ۱٫۲ وات بر سانتی‌متر مربع، فشار از ۲٫۱ پی اس آی به ۲٫۳ پی اس آی افزایش پیدا کرد. در انتهای آزمایش میزان فشار در ۱٫۸ پی اس آی ثابت ماند که ۰٫۱ کمتر از مقدار اولیه آن است که می‌تواند به کاهش گرانشی آب (معادله ۳) نسبت داده شود.

$$\Delta P = \frac{Q\mu L}{KA} \quad (3)$$

که در آن:

Q: نرخ جریان یافتن سیال (میلی‌لیتر بر ثانیه)

L: طول نمونه (سانتی‌متر)

A: سطح مقطع نمونه (سانتی‌متر مربع)

K: نفوذپذیری نمونه (داریسی)

μ : گرانشی سیال (سانتی‌پواز) که همگی ثابت در نظر گرفته می‌شوند. همان‌طور که تنها یک فاز در سیستم جریان دارد، عبارت μ مخفف گرانشی آب (μ_w) است. پیرو آنچه که بحث شد افزایش دما به کاهش گرانشی منجر می‌شود. چون تغییرات فشار (ΔP) متناسب با گرانشی آب است، هر کاهشی در گرانشی، افت فشار را به همان مقدار کاهش می‌دهد. به دلیل وجود کاویتاسیون به دنبال تزریق هوا به آب، تعیین مقدار اثر دشوار می‌شود. نتایج حاصل از آزمایش جریان یک فازی نشان می‌دهد که فشار به مقدار کمتر از مقدار اولیه آن

برابری می‌کند. به دنبال افزایش فشار به وسیله امواج فراصوت، خاصیت انفجاری در حفره‌ها ایجاد می‌شود. همان‌طور که توسط داهون و کمپیل ذکر شد، در اثر ترکیدن حباب‌ها، فشار در درون سیستم افزایش می‌یابد و سپس، فشار افت می‌کند. با انفجار حباب‌های ناشی از فرآیند کاویتاسیون، تولید نفت در اثر حرکت حباب‌ها افزایش می‌یابد، بنابراین از کاویتاسیون می‌توان به عنوان یکی از ساز و کارهای موثر در کاربرد امواج فراصوت استفاده کرد.

از سوی دیگر، کاهش افت فشار ممکن است به افزایش نفوذپذیری مطلق نسبت داده شود در حالی که گرانشی آب ثابت بماند. این تنها زمانی ممکن است که افزایش دما در سیستم قابل اغماض باشد. در هیچ کدام از آزمایش‌ها در طول سونیکاسیون، دما ثابت باقی نمی‌ماند. از آنجا که تمام آزمایش‌های پویا بر روی ماسه‌پک غیرمتراکم انجام گرفتند، می‌توان فرض کرد که کاهش افت فشار موجب بخشی از تغییرات در نفوذپذیری مطلق شده است. این امر به دلیل وجود اندازه معینی از دانه‌های ریز ماسه (بدون سیمان بین دانه‌ای) است که افزایش نیروی گرانشی حاصل از حرکت سیال به نوبه خود باعث مهاجرت دانه‌های ریز^{۲۰} می‌شود.

محمدیان و همکاران [۲۲] بررسی کردند که کاهش در فشار، ناشی از کاهش گرانشی آب است. به عنوان مثال، در

شکل ۵ نشان می‌دهد در صورتی که گرانروی در طول آزمایش یکسان باقی بماند، نسبت جابه‌جایی تنها برای روش سیلاب‌زنی تحریک شده معتبر است. در این مطالعه، نقطه مورد بررسی نسبت گرانروی سیالات است و نسبت نفوذپذیری نسبی مد نظر قرار نمی‌گیرد. در طول تابش امواج فراصوت تحریک شده، صعود دما در سیستم به طور منظم ثبت گردید. افزایش دما به مقدار ۱۰ درجه سانتی‌گراد موجب کاهش گرانروی آب به ۰٫۷۹ سانتی‌پواز می‌شود که ۱۷٪ کاهش در گرانروی را نشان می‌دهد. از طرف دیگر، مقدار گرانروی کروزن نیز ۲۰٪ کاهش می‌یابد و به ۰٫۷۹ سانتی‌پواز می‌رسد، بنابراین نسبت گرانروی سیستم برابر با "یک" خواهد بود.

با در نظر گرفتن کشش سطحی ۳۱ دین بر سانتی‌متر برای کروزن و آب نمک، عدد موئینگی N_{ca} برای آب برابر با $10^{-7} \times 1,58$ خواهد بود که از معادله ۵ محاسبه می‌شود:

$$N_{ca} = \frac{\mu Q}{\phi \sigma} \quad (5)$$

برای کاهش اشباعیت نفت باقی‌مانده، اعداد موئینگی لازم است که به صورت 10^{-5} تا 10^{-4} باشند. همچنین تشکیل امولسیون از دیگر نتایج جالب توجه است. پس از سه ساعت، دو فاز ترشونده و غیر ترشونده به طور کامل از هم جدا شدند که به آسانی دیده می‌شود.

در مورد وازلین، نسبت گرانروی در ۲۵ درجه سانتی‌گراد برابر با ۲۲٫۷۵ است. میزان بازیابی در روش سیلاب‌زنی تحریک

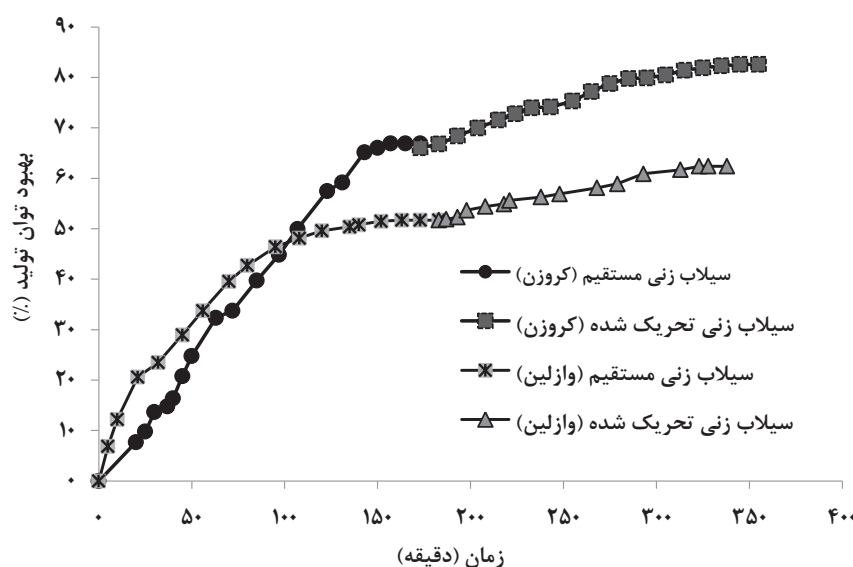
می‌رسد و این کاهش فشار ناشی از کاهش گرانروی آب است [۲۲].

در سری دوم آزمایش‌های جریان یک فازی، از آب نمک هوازده شده ۳٪ برای حذف اثرات کایتاسیون استفاده و تغییرات فشار مشابه با روش کار استفاده شده از آب نمک معمولی، ثبت شد. هنگامی که امواج فراصوت تابانده شدند، فشار کاهش پیدا کرد و در پایان هر آزمایش، مقدار فشار تثبیت شد. با توجه به نتایج آزمایش اثر دما و آزمایش جریان یک فازی، کاهش در گرانروی آب دلیل اصلی افت فشار است که در آزمایش جریان یک فازی مشاهده می‌شود. این نتیجه با نتایج به دست آمده توسط پوسیو و همکاران [۷] مطابقت دارد که نتیجه گرفتند کاهش فشار ناشی از کاهش گرانروی سیالات است.

۴-۳- آزمایش‌های جابه‌جایی

در این مطالعه، مقدار بازیابی نفت به روش سیلاب‌زنی ۷۱٪ است که تابش سونیکاسیون مقدار بازیابی نفت را تا ۱۶٪ بهبود بخشیده است. با فرض نفوذپذیری نسبی هر دو فاز ترشونده (۰٫۳) و غیر ترشونده (۰٫۷) در نقاط انتهایی آن‌ها، نسبت جابه‌جایی (M) برای کروزن و آب در دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) از معادله ۴ محاسبه می‌شود:

$$M = \frac{k_{rw}}{k_{ro}} \times \frac{\mu_o}{\mu_w} = 0.44 \quad (4)$$

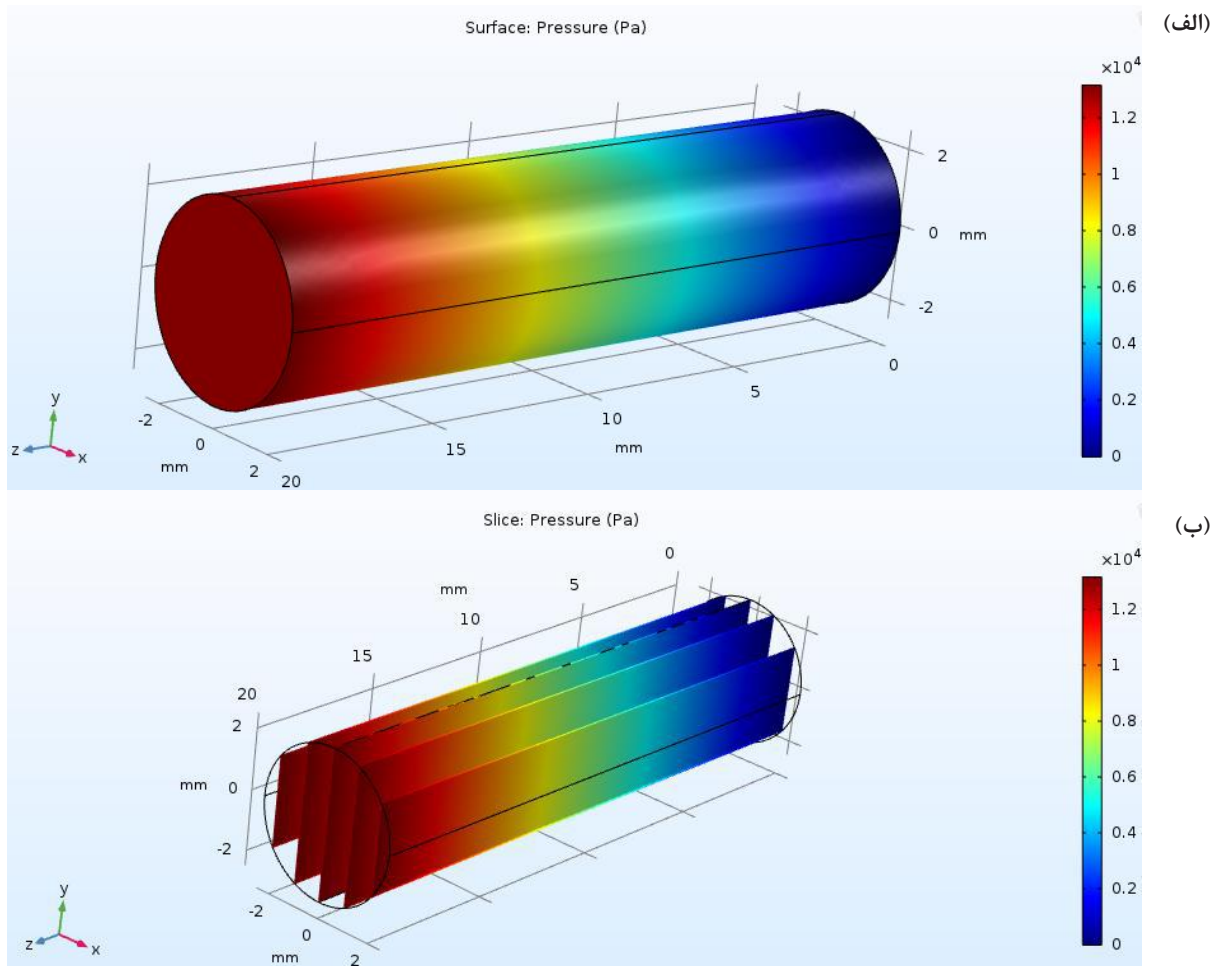


شکل ۵: درصد بهبود توان تولید از چاه با استفاده از آزمایش‌های سیلاب‌زنی مستقیم و تحریک شده

۵- شبیه‌سازی

شبیه‌سازی و بهینه کردن تغییرات فشار و سرعت امواج فراصوت در بستر ماسه‌پک به وسیله نرم‌افزار کامسول^{۲۲} انجام شده است. در شکل ۶ کانتورهای (الف) سطحی^{۲۳} و (ب) تکه‌ای^{۲۴} تغییرات فشار بر روی بستر ماسه‌ای بر اساس معادله دارسی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد با توجه به اینکه میزان تخلخل بستر ماسه‌ای بالا نیست، میزان فشار بر روی بستر به تدریج کاهش می‌یابد. این در حالی است که کاهش فشار همراه با کاهش سرعت سیال (کروزن و یا وازلین) بر روی بستر ماسه‌ای انجام می‌گیرد. از طرف دیگر، افزایش دما در آزمایش‌ها به کاهش گرانیوی س‌یالات و نیز

شده برابر با ۶۷٪ است که ۱۲٪ از روش مستقیم بیشتر است. یکی از ساز و کارهای مهم در مورد وازلین، کاهش گرانیوی است، زیرا در اثر افزایش دما به میزان ۱۰ درجه سانتی‌گراد، نسبت گرانیوی به ۱۳/۹ کاهش می‌یابد، بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که امواج فراصوتی تحریک شده، بازیابی نفت را از طریق کاهش نسبت جابه‌جایی و بهبود راندمان جارویی افزایش می‌دهند. در مورد وازلین هم تشکیل امولسیون مشاهده گردید. با فرض کشش سطحی ۳۸ دین بر سانتی‌متر برای وازلین و آب نمک، عدد موئینگی در محدوده 10^{-7} خواهد بود. می‌توان نتیجه گرفت که افزایش در بازیابی نفت نمی‌تواند به کاهش کشش سطحی در اثر افزایش دما نسبت داده شود.



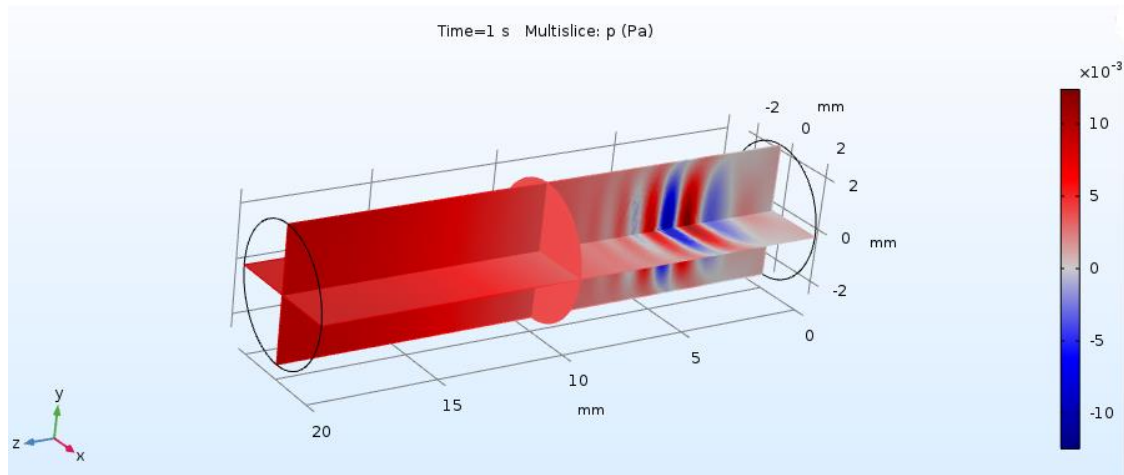
شکل ۶: کانتورهای تکه‌ای و سطحی تغییرات فشار بر روی بستر ماسه‌ای

کاهش کشش سطحی آنها منجر می‌شود. کاهش گرانروی سیال به عنوان یکی از ساز و کارهای تشکیل‌دهنده تولید نفت تشخیص داده می‌شود. از سوی دیگر، افزایش دما به اندازه‌ای نیست که بتواند کشش سطحی را تا حد زیادی کاهش دهد. به عبارت دیگر، کاهش کشش سطحی از دمای بالا به قدری کم است که نمی‌تواند در بهبود بازیابی نفت کمک کند.

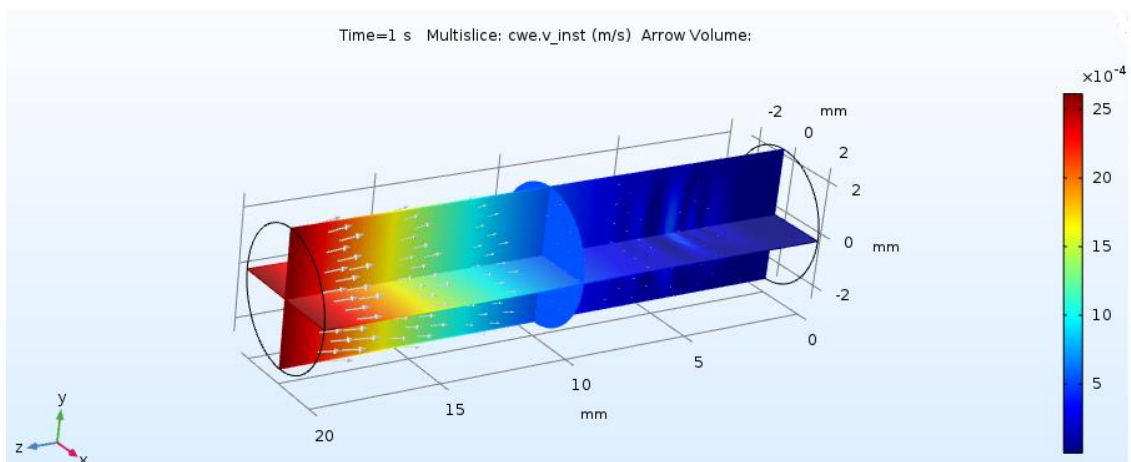
شکل ۷ کانتورهای سطحی فشار (الف) و سرعت امواج فراصوت (ب) را در طول بستر ماسه‌ای نشان می‌دهد. در این شکل فشار و سرعت امواج فراصوت در ابتدای بستر زیاد بوده اما به تدریج در طول ماسه‌پک کاهش می‌یابد به طوری که در انتهای بستر ماسه‌ای فشار و سرعت امواج فراصوت به صورت نوسانی تغییر می‌کنند. دلیل این امر، افت شدید فشار و سرعت سیال (کروزن و یا وازلین) در انتهای بستر است. همان‌طور که در بخش آزمایش‌ها اشاره شد، یکی از ساز و کارهای موثر

کاهش کشش سطحی آنها منجر می‌شود. کاهش گرانروی سیال به عنوان یکی از ساز و کارهای تشکیل‌دهنده تولید نفت تشخیص داده می‌شود. از سوی دیگر، افزایش دما به اندازه‌ای نیست که بتواند کشش سطحی را تا حد زیادی کاهش دهد. به عبارت دیگر، کاهش کشش سطحی از دمای بالا به قدری کم است که نمی‌تواند در بهبود بازیابی نفت کمک کند.

شکل ۷ کانتورهای سطحی فشار (الف) و سرعت امواج فراصوت (ب) را در طول بستر ماسه‌ای نشان می‌دهد. در این شکل فشار و سرعت امواج فراصوت در ابتدای بستر زیاد بوده اما به تدریج در طول ماسه‌پک کاهش می‌یابد به طوری که در انتهای بستر ماسه‌ای فشار و سرعت امواج فراصوت به صورت نوسانی تغییر می‌کنند. دلیل این امر، افت شدید فشار و سرعت سیال (کروزن و یا وازلین) در انتهای بستر است. همان‌طور که در بخش آزمایش‌ها اشاره شد، یکی از ساز و کارهای موثر



(الف)



(ب)

شکل ۷: الف) تغییرات فشار و ب) سرعت امواج فراصوت در طول بستر ماسه‌ای

SPE Eastern Regional Meeting, Charlston, USA, SPE-1316-MS: 1-16.

موجب کاهش اشباعیت نفت باقی مانده شود.

۶- نتیجه گیری

در این مطالعه برای بررسی اثرات امواج فراصوت در بهبود توان تولید نفت، مجموعه‌ای از آزمایش‌های جابه‌جایی و تکمیلی با استفاده از دو سیال کروزن با گرانیوی ۰/۹۹ سانتی‌پواز و وازلین با گرانیوی ۲۲ سانتی‌پواز و مشابه با آنچه در مخازن نفتی یافت می‌شوند، انجام شد و نتایج زیر حاصل گردید: در نتیجه تابش امواج فراصوت، بازیابی فرآیند سیلاب‌زنی برای کروزن و وازلین تا ۱۶٪ افزایش را نشان داد و مقدار بازیابی برای سیال کروزن با گرانیوی کمتر، بیشتر بود. همچنین برای شبیه‌سازی آب سازندی، دو نوع آب نمک معمولی و هوازده شده مورد استفاده قرار گرفتند و نتایج نشان دادند که استفاده از آب نمک معمولی موجب بازیابی بیشتر نفت می‌شود. این نتیجه از طریق وجود فضای خالی در سیستم هنگام استفاده از آب نمک معمولی توضیح داده می‌شود. به علاوه، با انجام آزمایش جریان یک فازی و استفاده از آب نمک، فشار اولیه افزایش یافت که ممکن است مربوط به کاویتاسون، نفوذپذیری مطلق و گرانیوی سیال باشد. انجام آزمایش‌های بیشتر ثابت کرد که کاهش در فشار، ناشی از کاهش گرانیوی آب است که به نوبه خود نتیجه‌ای از تابش امواج فراصوت تحریک شده است. همچنین، کاهش افت فشار ممکن است به تغییرات نفوذپذیری مطلق منجر شود و این در حالتی است که گرانیوی آب ثابت بماند و افزایش دما در سیستم قابل اغماض باشد. در سری دوم آزمایش‌های جریان یک فازی هم که از آب نمک هوازده شده ۳٪ استفاده شد، تغییرات فشار مشابه با روش کار استفاده شده از آب نمک معمولی، ثبت گردید.

در نتیجه، کاویتاسیون و کاهش گرانیوی از ساز و کارهای اثرگذار در عملکرد امواج فراصوت برای بازیابی نفت قلمداد می‌شوند و بیشترین تاثیر امواج فراصوت در آزمایش‌های مربوط به فرکانس موج خروجی^{۲۵} است. برای انجام شبیه‌سازی، تغییرات فشار و سرعت امواج فراصوت در بستر ماسه‌پک به وسیله نرم‌افزار کامسول انجام گرفت. نتایج نشان دادند که با کاهش میزان فشار بر روی بستر ماسه‌ای، سرعت سیال‌های کروزن و وازلین نیز کاهش می‌یابد.

۷- مراجع

- [2] Naderi, K., and Babadagli, T. (2008). "Effect of ultrasonic intensity and frequency on oil/heavy-oil recovery from different wettability rocks". SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium, Calgary, Canada, SPE-117324-MS: 1-15.
- [3] Hamida, T., and Babadagli, T. (2007). "Fluid-fluid interaction during miscible and immiscible displacement under ultrasonic waves". European Physical Journal, 60: 447-462.
- [4] Amro, M., Al-Mobarky, M., and Al-Homadh, E. S. (2007). "Improved oil recovery by application of ultrasound waves to water-flooding". SPE Middle East Oil & Gas Show, Bahrain, SPE-105370-MS: 1-8.
- [5] Najafi, I. (2010). "A mathematical analysis of the mechanism of ultrasonic induced fluid percolation in porous media". SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Florence, Italy, SPE-141126-STU: 1-24.
- [6] Hamidi, H., Rafati, R., Junin, R. B., and Manan, M. A. (2012). "A role of ultrasonic frequency and power on oil mobilization in underground petroleum reservoirs". Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2: 29-36.
- [7] Poesio, P., Ooms, G., Schraven, A., and Bas, F. V. D. (2002). "Theoretical and experimental investigation of acoustic streaming in a porous material". Physical Review E, 66: 1-9.
- [8] Guo, X., Du, Z., Li, G., and Shu, Z. (2004). "High frequency vibration recovery enhancement technology in the heavy oil fields in China". SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium and Western Regional Meeting, California, USA, SPE-86956-MS: 1-18.
- [9] Nikolaevsky, V. N., and Stepanova G. S. (2005). "Non-linear seismics and the acoustic action on the oil recovery from oil pool". Acoustical Physics, 51: 131-139.
- [10] Mohsin, M., and Meribout, M. (2015). "An extended model for ultrasonic-based enhanced oil recovery with experimental validation". Ultrasonics Sonochemistry, 23: 413-423.
- [11] Ying-Xin, G., Ding, R., Chen, X., Gong, Z., Zhang, Y., and Yang, M. (2018). "Ultrasonic washing for oily sludge treatment in pilot scale". Ultrasonics, 90: 1-4.
- [12] Ghamartale, A., Escrochi, M., and Riazi, M. (2019). "Faghih An experimental investigation of ultrasonic treatment effectiveness on pore structure". Ultrasonics

- [1] Duhon, R. D., and Campbell, J. (1965). "The Effect of ultrasonic energy on the flow of fluids in porous media".

- [22] Mohammadian, E., Junin, R., Rahmani, O., and Idris, A. K. (2013). "Effects of sonication radiation on oil recovery by ultrasonic waves stimulated water-flooding". *Ultrasonics*, 53(2): 607-614.
- [13] Hamidi, H., Haddad, A. S., Mohammadian, E., and Rafati, R. (2017). "Azdarpour A., Ghahri P., Ombewa P., Neuert T., Zink A. Ultrasound-assisted CO₂ flooding to improve oil recovery". *Ultrasonics Sonochemistry*, 35(A): 243-250.
- [14] Hamidi, H., Mohammadian, E., Junin, R., Rafati, R., Manan, A. M., Azdarpour, A., and Junid, M. (2014). "A technique for evaluating the oil/heavy-oil viscosity changes under ultrasound in a simulated porous edium". *Ultrasonics*, 54: 655-662.
- [15] Firoozabadi, A., and Ramey, H. J. (1988). "Surface tension of water hydrocarbon systems at reservoir conditions". *Journal of Canada Petroleum Technology*, 27(3): 41-48.
- [۱۶] حقیگو، م.، جعفری، آ.؛ ۱۳۹۶؛ "بررسی آزمایشگاهی تاثیر پارامترهای شکاف بر بازده جاروب نفت حین تزریق نانوسیال". پژوهش نفت، دوره ۹۴، شماره ۲۷، ص ۱۶۴-۱۵۰.
- [17] Agi, A., Junin, R., Syamsul, M. F., and Chong, A. S. (2019). "Gbadamosi A. Intermittent and short duration ultrasound in a simulated porous medium". *Petroleum*, 5(1): 42-51.
- [18] Avvaru, B., Venkateswaran, N., Uppara, P., Iyengar, S. B., and Katti, S. S. (2018). "Current knowledge and potential applications of cavitation technologies for the petroleum industry". *Ultrasonics Sonochemistry*, 42: 493-507.
- [19] Song, W. N., Dong, Y. L., Xue, L. M., Ding, H. X., Li, Z., and Zhou, G. J. (2012). "Hydrofluoric acid-based ultrasonic upgrading of oil shale and its structure characterization". *Oil Shale*, 29: 334-343.
- [۲۰] عسکریان، م.، وطنی، ع.، عدالت، م.؛ ۱۳۹۶؛ "بهبود خواص نفت سنگین در سامانه کاویتاسیون هیدرودینامیک: اثر حضور منبع هیدروژنی و نانوذرات فلزی". پژوهش نفت، دوره ۹۵، شماره ۲۷، ص ۱۷-۴.
- [21] Sayyaadi, H. (2015). "Enhanced cavitation-oxidation process of non-VOC aqueous solution using hydrodynamic cavitation reactor". *Chemical Engineering Journal*, 272: 79-91.
- ¹ Duhon and Campbell
- ² Poesio
- ³ Berea Sandstone
- ⁴ Amro
- ⁵ Gou
- ⁶ Nikolaevsky and Stepanova
- ⁷ Ying-Xin
- ⁸ Ghamartale
- ⁹ NaCl
- ¹⁰ De-aerated NaCl
- ¹¹ Cannon-Fenske viscometer
- ¹² Crest
- ¹³ Reference material
- ¹⁴ Quartz sand grains
- ¹⁵ Revolutions per minute (rpm)
- ¹⁶ Channeling
- ¹⁷ Breakthrough time
- ¹⁸ Firoozabadi and Ramey
- ¹⁹ Meehan and Glaso's relation
- ²⁰ Fines migration
- ²¹ Capillary number
- ²² Comsol
- ²³ Surface
- ²⁴ Slice
- ²⁵ wave output



Investigation of Ultrasonic Waves' Function in Improving Oil Production Capacity Using Water-Flooding Experiments

Rahmani O.^{1*}, Mohammad Aminpour Sh.², Mohammadian E.³

1- Associate Professor, Dept. of Petroleum Engineering, Faculty of Engineering, Mahabad Branch, Islamic Azad University, Mahabad, Iran

omeid.rahmani@mahabad-iau.ac.ir

2- M.Sc, Dept. of Chemical and Petroleum Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

shahram.aminpour@che.sharif.ir

3- Assistant Professor, Dept. of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University Technology of MARA (UiTM), Kuala Lumpur, Malaysia

erfan@salam.uitm.edu.my

(Received: 20 Sep. 2020, Accepted: 24 Aug. 2021)

Abstract: One way to improve oil production capacity is to use ultrasonic waves. Series of straight and ultrasonic stimulated water-flooding experiments were conducted on a long unconsolidated sand-pack using ultrasonic transducers because of a limited understanding of the mechanisms involved in applying ultrasonic waves as an enhanced oil recovery method. Kerosene and vaseline were used as non-wet phases in the system with a viscosity of 0.99 and 22 cp, respectively. Moreover, fluid flow and temperature rise experiments were conducted using an ultrasonic bath to enhance contributing mechanisms. They were carried out to observe the effects of ultrasonic waves on oil recovery. As a result, the recovery of water-flooding increased by about 16%. Furthermore, three mechanisms of improving oil production capacity were recognized: emulsification, cavitation, and viscosity reduction. The changes in pressure and ultrasonic velocity were also simulated using Comsol software alongside the sand-pack. As a result of the function of ultrasonic waves, this study can help the contributing mechanisms for improving oil recovery.

Keywords: Oil production capacity, Ultrasonic waves, Water-flooding, Sand-pack, Comsol.

INTRODUCTION

The application of seismic and ultrasonic waves in different processes, such as gravitational depletion and water-flooding, has been studied by several authors [1-4]. Despite many published papers and some field tests on this issue, the exact mechanisms of ultrasonic waves have not been fully understood.

In this study, a series of water-flood processes (first saturated with oil and then water) were carried out directly and stimulated by ultrasonic transducers on an unconsolidated sand-pack. Moreover, some additional tests (e.g., fluid flow and temperature increase experiments) were carried out to study the details of ultrasonic waves, the simulation of pressure changes, and the speed of ultrasonic waves during a sand



layer (using Comsol software). This study focuses on mechanisms that lead to an increase in oil recovery using the water-flooding process.

METHODOLOGY

Set-up

Two types of ultrasonic transducers were used for the experiments. The ultrasound generator of Crest is used with a frequency of 40 kHz and a power output of 100 to 500 Watts. A centrifugal pump was applied with a constant injection rate of 3 (mL/min) to inject fluids in all water-flood tests. A flow meter connected to the pump was applied to keep the flow rate.

Materials

Two types of brine were used for experiments: normal and deaerated 3% NaCl brine with a density of 1.05 g/cm³. In comparison with water, vaseline and kerosene with moderate viscosity-high surface tension and very low viscosity-moderate surface tension, respectively, were used as non-wet phase systems in the experiments.

Porous media

5 cm³ of 106-225 μm sub-angular to sub-rounded quartz sand grains were poured into a sand-pack. At first, the grains were carefully washed and then dried in a furnace. The porosity and permeability of sand-pack were measured as 33% and 4000 mD, respectively

Experimental Procedure

Two types of experiments were conducted, including studying one-phase flow and the temperature increase using the ultrasonic column. In the one-phase flow experiment, the core was saturated with normal and deaerated brine and then exposed to ultrasonic waves. Pressure changes were also recorded in the system.

RESULTS AND DISCUSSION

One-phase flow

According to the intensity of the waves, the pressure reached a peak and then reduced to lower values. A possible explanation is that "cavitation" is responsible for irregular behavior of pressure. In an environment with normal conditions, the fluid consists of tiny atoms with gas or non-dissolution vapor. By changing the environmental pressure of the fluid to steam pressure, these atoms become larger and exhibit cavities. In this case, due to the evaporation process, the inner pressure of cavities increases with the fluid's vapor pressure. Increasing the pressure through ultrasonic waves caused an explosive property in the cavities. As a result, oil production increases due to bubble movement and also cavitation. Therefore, cavitation can be calculated as one of the effective mechanisms in the application of ultrasonic waves.

Following what was discussed, increasing the temperature results in a decrease in viscosity because the pressure is proportional to the viscosity of the water, and any reduction in viscosity decreases the pressure drop to the same amount. Due to the cavitation, it is difficult to determine the amount of its effect as a result of aerated water. The results also show that the pressure reaches a small amount of its initial value, and this decrease is caused by a drop in the water viscosity [5].

In the second series of one-phase flow experiments, the deaerated salt of 3% NaCl was used to eliminate the cavitation effects. Similar to the procedure of normal brine, the pressure changes were recorded. When the ultrasonic waves were radiated, the pressure was decreased, and the pressure value was stabilized at the end of each experiment. Due to the results of the temperature effect and one-phase flow experiment, the reduction in the water viscosity is the leading cause of pressure drop observed in the one-phase flow experiment.

Temperature effect

The system with normal brine and saturated sand-pack temperature increased by 4, 12, and 16 °C for the corresponding power output of 100, 250, and 400 Watts, respectively. In the second part of the experiment, the temperature was measured for vaseline and kerosene in the ultrasonic bath. Based on the thermal conductivity for vaseline and kerosene, the temperature ascent is almost identical in both cases (Figure 1).

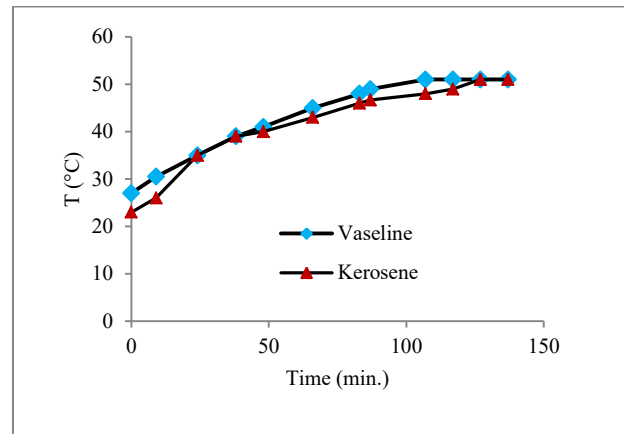


Figure 1. Temperature variations vs. time for both vaseline and kerosene

Table 1 shows the reduction of the surface tension in a system with vaseline-water and kerosene-water at different times calculated by Firozabadi and Ramey's equation [6].

Table 1. Changes of surface tension vs. time for vaseline-water and kerosene-water system

Kerosene (dyne/cm)	Vaseline (dyne/cm)	T (°C)
31	38	23
30.5	37.4	27
30	36.8	31
29.5	36.2	35
29	35.6	39
28.6	35	43
28.1	34.5	47
27.7	33.9	51

Although the surface tension for both vaseline-water and kerosene-water decreases, it is not high enough to significantly affect the capillary number; therefore, it cannot reduce the saturation of oil.

SIMULATION

Optimization of pressure and velocity variations in sand-pack have been done by Comsol software. In Figure 2, the pressure changes alongside the sand-pack are presented based on the Darcy equation. Because the porosity of the sand-pack is not high, the pressure on the sand-pack decreases gradually. This pressure decreases with decreasing fluid velocity (i.e., vaseline or kerosene) on the sand-pack.

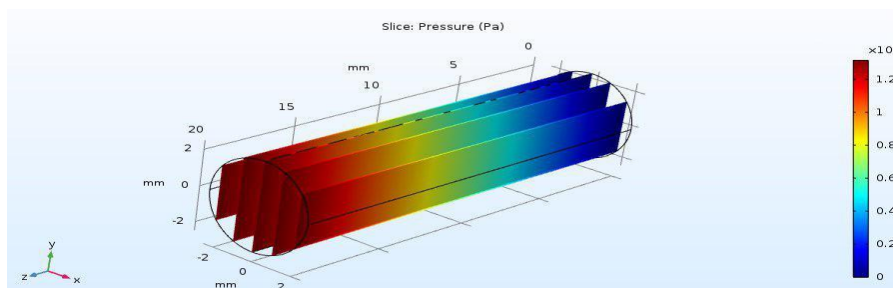


Figure 2. Slice counters regarding the pressure changes alongside the sand-pack

Figure 3 shows the speed of ultrasonic waves alongside the sand-pack. As shown in this figure, the speed of ultrasonic waves increases at the beginning of the sand-pack. However, it decreases gradually alongside the sand-pack due to the sharp drop of pressure and fluids (vaseline or kerosene) velocity at the end of the sand-pack.

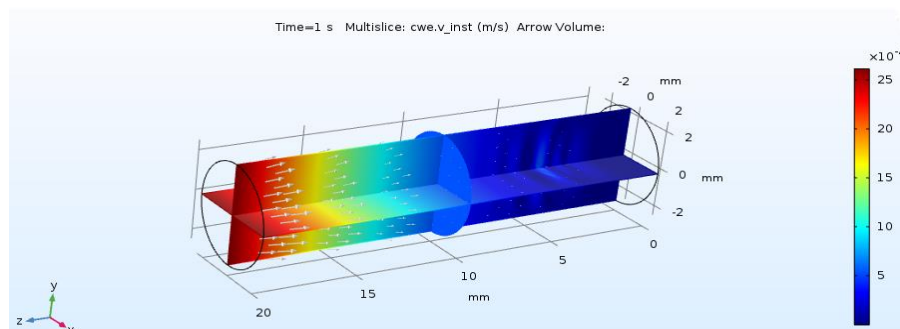


Figure 3. Changes the velocity of the ultrasonic waves alongside the sand-pack

CONCLUSIONS

Compared to deaerated brine, the use of normal brine caused more recovery of oil. This result can be explained by a space in the system when using normal brine. Besides, the increasing temperature is led to a decrease in the viscosity of fluids and their surface tension. Also, the one-phase flow experiment results show that increasing the initial pressure can be related to the Cavitation effect.

REFERENCES

- [1] Naderi, K., and Babadagli, T. (2008). "Effect of ultrasonic intensity and frequency on oil/heavy-oil recovery from different wettability rocks". SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium, Calgary, Canada, SPE-117324-MS: 1-15.
- [2] Hamida, T., and Babadagli, T. (2007). "Fluid-fluid interaction during miscible and immiscible displacement under ultrasonic waves". *European Physical Journal*, 60: 447-462.
- [3] Amro, M., Al-Mobarky, M., and Al-Homadhi, E. S. (2007). "Improved oil recovery by application of ultrasound waves to water-flooding". SPE Middle East Oil & Gas Show, Bahrain, SPE-105370-MS: 1-8.
- [4] Hamida T., and Babadagli T. (2008). "Effects of ultrasonic waves on the interfacial forces between oil and water". *Ultrasonics Sonochemistry*, 15: 274-278.
- [5] Mohammadian, E., Junin, R., Rahmani, O., and Idris, A. K. (2013). "Effects of sonication radiation on oil recovery by ultrasonic waves stimulated water-flooding". *Ultrasonics*, 53(2): 607-614.
- [6] Firoozabadi, A., and Ramey, H. J. (1988). "Surface tension of water hydrocarbon systems at reservoir conditions". *Journal of Canada Petroleum Technology*, 27(3): 41-48.