

## مروری بر کاربرد امواج فراصوت در صنعت نفت

مهدی رضوی فر\*، دانشگاه شهید باهنر کرمان

## چکیده

با توجه به اهداف بنیادین صنعت نفت مبنی بر استفاده از روش‌های بهره‌برداری با حداقل تخریب و آلودگی زیست‌محیطی و همچنین هزینه عملیاتی پایین، نیاز به استفاده از تکنولوژی‌های جدید همچون امواج فراصوت در این صنعت بیش از پیش مورد توجه است. طبق تحقیقات و آزمایش‌های انجام شده، امواج فراصوت با نتایجی همچون کاهش گرانیوی نفت، جدایش توده‌های آسفالتین موجود در نفت خام، حذف رسوبات واکسی، نمک‌زدایی و آب‌گیری از نفت خام و بهبود نفوذپذیری، نقش موثر و چشم‌گیری در افزایش تولید و برداشت از میادین نفتی داشته است ولی با این حال هنوز استفاده میدانی و عملیاتی از این تکنولوژی در اکثر میادین نفتی از جمله میادین نفتی ایران کاربردی نشده است. در این مقاله سعی گردیده تا به صورت جامع با ذکر کاربردها و سوابق تحقیقاتی مرتبط با امواج فراصوت در بخش‌های متنوع صنعت نفت گامی در جهت استفاده هر چه بیشتر از این تکنولوژی در این صنعت برداشته شود.

## اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۶/۰۲/۰۸

تاریخ ارسال به داور: ۹۶/۰۲/۲۱

تاریخ پذیرش داور: ۹۶/۰۴/۱۰

## واژگان کلیدی:

امواج فراصوت، روش نوین ازدیاد برداشت از نفت، کاربرد امواج فراصوت در صنعت نفت، تحریک چاه، کاهش گرانیوی نفت خام، کاهش آسفالتین نفت خام، نمک‌گیری از نفت خام

## مقدمه

گذشت زمان و پیشروی امواج، این حباب‌ها به مقدار بحرانی خود رسیده و بعد از آن، متلاشی می‌شوند. این پدیده، به شدت، دما و فشار نفت خام را افزایش می‌دهد [۲].

۲. لرزش نفت خام توسط موج‌های لرزشی ناشی از تابش امواج فراصوت که سبب ارتعاش مولکول‌های سازنده می‌گردد [۳]. تحقیقات انجام شده در این راستا نشانگر مزیت‌های فراوان این روش نسبت به روش‌های معمول بهره‌برداری از مخازن نفتی می‌باشد. از جمله عدم نیاز به توقف تولید در حین عملیات، عدم آسیب به مخزن، مصرف انرژی و نیروی انسانی اندک و به طبع آن کاهش هزینه‌ها، بالا بودن ضریب ایمنی، عدم نیاز به تزریق مواد خاص به مخزن، امکان انتخاب دقیق مکان انگیزش چاه، عدم نیاز به تجهیزات سرچاهی، عدم آلودگی زیست‌محیطی، امکان استفاده در چاه‌های شاخه‌ای و... از این رو سعی گردیده تا با تشریح کاربردهای امواج فراصوت در صنعت نفت ضرورت استفاده از این تکنولوژی مورد توجه قرار گیرد [۱].

با بررسی پیشینه تحقیقاتی در این زمینه می‌توان آزمایش‌های انجام شده را در ۱۱ گروه کلی طبقه‌بندی کرد که در ادامه، به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۱- تأثیر امواج فراصوت بر روی آسفالتین نفت خام

از مشکلات اصلی در طول دوره بهره‌برداری از مخازن نفتی مشکل رسوب و تجمع ذرات آسفالتین موجود در نفت خام درون مخزن نفتی، لوله‌های تولید نفت و تجهیزات درون چاهی است که به شدت میزان برداشت را کاهش می‌دهد.

با توجه به افزایش نیاز به سوخت و انرژی در جهان و محدود بودن ذخایر نفتی جهان، تمرکز بر افزایش تولید از مخازن نفتی ضروری است. در این راستا روش‌های متنوعی پیشنهاد شده که هر کدام دارای مزایا و معایب فراوانی هستند.

امواج فراصوت دسته‌ای از موج‌های مکانیکی هستند که بسامد آنها بیش از ۲۰ هزار هرتز می‌باشد. استفاده از امواج فراصوت به عنوان یک روش جدید با حداقل میزان آلودگی‌های زیست‌محیطی و هزینه‌های عملیاتی پایین امروزه به عنوان یک روش نوین افزایش تولید از مخازن نفتی مطرح است.

در این روش نیازی به تزریق ماده خاصی نیست و بر خلاف روش‌های معمول تحریک چاه مانند تزریق اسید که نیاز به خرید، انتقال و ترکیب مواد مختلف از جمله اسید از شرکت‌های متنوع با قیمت‌های بالا دارد و یا روش ایجاد شکاف هیدرولیکی که نیاز به تهیه مواد و ساخت سیال دارد، این هزینه‌ها با استفاده از روش فراصوت حذف خواهد شد. همچنین در روش فراصوت بر خلاف روش‌های معمول نیازی به خرید دستگاه‌های پمپ سیال به منظور تحریک چاه نیست. علاوه بر این، در روش‌های تزریق اسید و ایجاد شکاف، در زمان اجرای عملیات نیاز به توقف کامل تولید است، این در حالی است که در روش فراصوت می‌توان به صورت همزمان با تولید، عملیات تحریک چاه را انجام داد و از لحاظ اقتصادی توفقی در تولید نداشت [۱].

امواج فراصوت سبب دو رویداد در نفت خام می‌شوند:

۱. پدیده حفره‌زایی؛ در طی این رویداد، حباب‌هایی درون نفت خام به دلیل اختلاف فشار ناشی از امواج فراصوت تشکیل می‌شود که با

\* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (mahdi\_razavifar@yahoo.com)

شده به صورت نموداری در شکل ۱- نشان داده شده است.

## ۲- کاهش گرانی نفت خام با استفاده از امواج فراصوت

یکی از عوامل مهم در تولید و برداشت از مخازن نفتی، میزان گرانی نفت خام تولیدی می باشد به نحوی که هرچه نفت مخزن دارای گرانی بالاتری باشد، امکان تولید و برداشت از آن کاهش می یابد. بنابراین، در صورت کاهش گرانی نفت می توان میزان برداشت از مخزن نفتی را افزایش داد.

امواج فراصوت می توانند نفت سنگین را علاوه بر افزایش دما و فشار دچار لرزش های مکانیکی کنند. این امواج می توانند مولکول های بزرگ موجود در نفت های سنگین را به هیدروکربن های سبک تر تبدیل کنند و زمانی که این مولکول های بزرگ شکسته می شوند، دیگر گرانی نفت قابلیت برگشت به حالت ابتدایی خود را ندارد [۸].

طبق نتایج به دست آمده از آزمایش های انجام شده، با افزایش زمان تابش امواج فراصوت تا زمان معین، گرانی نفت خام روند نزولی داشته و تا این زمان بهینه از تابش امواج فراصوت، گرانی نفت خام کاهش می یابد، ولی بعد از این زمان به دلیل تأثیر پدیده جوشش، حذف ترکیبات سبک نفت و همچنین اتصال دوباره رادیکال های آسفالتین، گرانی نفت خام افزایش می یابد به طوری که در بعد از این زمان، گرانی نفت بیشتر از نفت خام می شود و در صورت استفاده ترکیبی از امواج فراصوت و حلال ها مانند تولوئن این کاهش گرانی بیشتر خواهد شد [۴] [۹-۱۲].

تأثیر زمان تابش امواج فراصوت بر روی گرانی نفت خام طبق پیشینه تحقیقاتی موجود و توضیحات ذکر شده به صورت نموداری در شکل ۲- نشان داده شده است.

## ۳- حذف پلاگ ها و رسوبات پارافینی نزدیک چاه تولیدی

این رسوبات با انسداد فضاهای خالی درون سنگ مخزن و

این مولکول های بزرگ به صورت کلوییدی در نفت خام پخش شده اند. در این راستا باید با انتخاب روش های کاربردی و مفید، تجمع و رسوب ذرات آسفالتین را به حداقل میزان خود کاهش داد. بررسی آسفالتین موجود در نفت های خام تحت تابش امواج فراصوت نشان می دهد تابش امواج فراصوت اندازه خوشه های آسفالتین را کاهش می دهد و سبب کاهش توده های آسفالتینی موجود در نفت خام می شود [۴].

طبق نتایج آزمایش های انجام گرفته، امواج فراصوت سبب خرد شدن و تغییر ساختار رسوبات آسفالتین شده و نکته حائز اهمیت این است که پس از گذشت چند روز، این تغییر ساختار برگشتناپذیر بوده و پدیده ی به هم پیوستن ذرات آسفالتین اتفاق نمی افتد. با افزایش زمان تابش تا حد معینی، قطر ذرات آسفالتین کاهش داشته و پس از این زمان بهینه، با افزایش زمان تابش، رسوبات درشت تر می گردد. لذا تعیین این زمان بهینه در تابش امواج فراصوت امری ضروری تلقی می شود [۵].

با افزایش مدت زمان تابش به بیش از مقدار بهینه، با افزایش تجمع رادیکال های آزاد حاصل از شکستن پیوندها، ساختارهای شکسته شده به طور مجدد تشکیل شده و ترکیبات سنگین با شاخه های بیشتر تشکیل می شود که این پدیده افزایش گرانی را نیز به دنبال خواهد داشت.

طبق نتایج مربوط به آزمایش های انجام گرفته بر روی میزان رسوب آسفالتین، خواص رئولوژی و درصد آسفالتین موجود در نفت مشخص گردید که افزایش زمان تابش امواج فراصوت تا یک مقدار بهینه بسیار موثر بوده و در محدوده این زمان از تابش امواج فراصوت، نفت دارای کمترین میزان گرانی سبکی، حداقل میزان آسفالتین همراه و کمترین پتانسیل ایجاد رسوب در ترکیبات آسفالتین می باشد و در صورت استفاده ترکیبی از امواج فراصوت و حلال ها شدت این اثرات بیشتر خواهد شد [۴] [۶-۸].

تأثیر زمان تابش امواج فراصوت بر روی میزان و اندازه آسفالتین موجود در نفت خام طبق پیشینه تحقیقاتی موجود و توضیحات ذکر



شکل ۱ | ۲ | تأثیر زمان تابش امواج فراصوت بر روی گرانی نفت خام



شکل ۲ | ۱ | تأثیر تابش امواج فراصوت بر روی اندازه و میزان آسفالتین نفت خام بر حسب زمان تابش امواج فراصوت

امواج فراصوت با پدیده حفره‌زایی و همچنین ایجاد لرزش در نفت باعث شکستن رسوبات نمک و معلق ماندن ذرات در محیط به صورت سوسپانسیون می‌شوند و چون نیروی برشی ایجاد شده در محیط توسط پدیده حفره‌زایی امواج فراصوت بیشتر از نیروی چسبندگی درون رسوبات می‌باشد. این ذرات کوچک توسط سیال، جریان یافته و از رسوب نمک‌ها در دیواره تجهیزات و لوله‌ها جلوگیری می‌کند [۱۹].

آمریکا و روسیه اولین کشورهایی بودند که از این روش برای حذف رسوب نمک‌ها استفاده کردند و نتایج موفقیت آمیزی نیز به دست آوردند. استفاده از این روش به صورت گسترده در تگزاس آمریکا به طور قابل ملاحظه‌ای باعث افزایش تولید نفت خام گردید [۱۹]. طبق آزمایش‌های انجام شده در مورد جلوگیری از رسوب نمک کلسیم کربنات تحت تابش امواج فراصوت مشخص شد که استفاده از امواج فراصوت با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز در شرایط بهینه‌ی تابش، باعث موفقیت ۸۱ درصد عملیات در نفت مورد مطالعه بوده است [۲۰].

#### ۵- نمک‌گیری از نفت خام

برای پالایش و جداسازی ناخالصی‌های موجود در نفت خام و همچنین سهولت انتقال آن نیاز به حذف نمک‌های موجود در آن است. از روش‌های معمول نمک‌گیری از نفت خام استفاده از روش‌های الکتریکی است. طبق آزمایش‌های انجام شده ترکیب امواج فراصوت و روش الکتریکی در نمک‌گیری و آب‌گیری از نفت خام بسیار موثر است.

آزمایش‌های انجام شده نشان داده برای نفت‌های خام با غلظت بالای نمک بعد از دو مرحله پالایش توسط فرآیند نمک‌گیری الکتریکی غلظت نمک همچنان بالا بوده است. ولی استفاده از تکنولوژی جدید شامل استفاده ترکیبی از امواج فراصوت و روش الکتریکی در نفت‌ها با غلظت بالای نمک در شرایط بهینه، میزان نمک همراه در نفت خام را از ۶۸ میلی گرم بر لیتر به ۴ میلی گرم بر لیتر بعد از یک مرحله از عملیات رسانده است و میزان آب همراه نیز

مشبک‌های موجود در دهانه چاه تولیدی به شدت تولید و برداشت از مخزن را کاهش می‌دهند. همواره حذف پلاگ‌ها و رسوبات پارافینی از چاه تولیدی در حین تولید طبیعی نفت به سختی انجام می‌گیرد. ارتعاشات متعدد حاصل از لرزش امواج فراصوت باعث مشکل شدن تجمع کریستال‌های پارافین در نفت‌های واکسی می‌گردد. بنابراین حذف پلاگ‌های پارافین در صورت استفاده از امواج فراصوت با موفقیت همراه خواهد بود.

در حال حاضر اصلی‌ترین روش حذف پلاگ‌ها تزریق مواد شیمیایی به مخزن است هر چند نتایج خوبی از کاربرد میدانی این روش به دست آمده ولی این روش دارای معایبی همچون سختی ساخت مواد، قیمت بالا، آلودگی مخزن و آسیب به محیط زیست و مخزن نفتی می‌باشد.

در مقابل، استفاده از امواج فراصوت مزایای فراوانی دارد همچون سازگاری بالا، سهولت عملیات، هزینه پایین عملیات و عدم آلودگی محیط زیست [۱]. از سال ۱۹۸۰ آزمایش‌های میدانی مربوط به حذف پلاگ‌ها توسط امواج فراصوت انجام گرفته که هر چند نتایج خوبی به دست آمده است ولی همچنان مشکلات کلیدی وجود دارد. به طوری که به دلیل عوامل و فاکتورهای تأثیرگذار در این فرآیند و قوانین حاکم بر حذف پلاگ‌های مختلف، اغلب این تکنیک به صورت تجربی برای هر چاه تعیین می‌گردد.

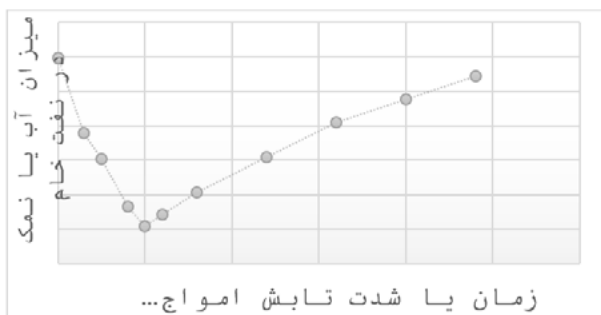
نتایج نشان داده که امواج فراصوت نقش موثری را در حذف رسوبات پارافینی و پلاگ به دست آمده از آنها دارند در حالی که برای حذف پلاگ‌های پلیمری توسط این امواج، نتایج خوبی به دست نیامده است و حذف پلاگ‌های پلیمری توسط امواج فراصوت انجام شدنی نیست [۱۳].

طبق نتایج آزمایش‌های انجام گرفته، امواج فراصوت باعث کاهش چشم‌گیر در میزان رسوبات پارافینی و به تبع آن، افزایش تراوایی سنگ مورد مطالعه شده است به طوری که با افزایش تعداد تابشگرهای امواج فراصوت، فرکانس و زمان تابش امواج فراصوت، میزان حذف رسوبات پارافینی نیز بیشتر شده است و این روش، روشی جایگزین با حداقل انرژی و عدم نیاز به تزریق سیال می‌باشد [۱۴-۱۷].

#### ۴- جلوگیری از رسوب نمک‌ها

در زمان تولید نفت خام اگر شوری آب سازندی بالا باشد به راحتی باعث رسوب نمک‌ها بر دیواره خطوط انتقال نفت و تجهیزات درون چاهی می‌شود. همچنین در عملیات سرویس، تعمیر تجهیزات و در میزان کارایی آنها تأثیر منفی می‌گذارد.

در حال حاضر متداول‌ترین روش جلوگیری، روش‌های شیمیایی و مکانیکی است. ولی با این حال استفاده بلندمدت از مواد شیمیایی باعث آلودگی جدی محیط زیست می‌شود. از طرفی هر دو روش شیمیایی و مکانیکی هزینه بالایی دارند [۱] [۱۸].



۳ | تأثیر زمان تابش امواج فراصوت بر روی میزان نمک و آب موجود در نفت خام



تولیدی امری ضروری است.

تابش امواج فراصوت به امولسیون آب و نفت با افزایش دمای سیال و ایجاد موج‌های لرزشی در آن باعث تفکیک آب و نفت از هم می‌گردد. این تکنیک بستگی به میزان کاهش گرانروی و غلظت نفت خام بعد از تابش امواج فراصوت دارد که می‌تواند باعث تجمع قطرات آب در کنار هم و ایجاد دو فاز آب و نفت شود [۲۴].

نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که تابش امواج فراصوت در فرکانس‌های پایین به منظور امولسیون‌زدایی از نفت دارای بازده بالا بوده است ولی برای فرکانس‌های بالای امواج فراصوت، امولسیون‌زدایی به دلیل عدم پایداری به وجود آمده در امولسیون آب و نفت انجام نمی‌گیرد [۲۵-۲۶].

امولسیون‌زدایی نفت خام به کمک امواج فراصوت در صنعت نفت بسیار اهمیت دارد. چون می‌توان در زمان کم بدون نیاز به امولسیون‌زداینده‌های شیمیایی و در دماهای نسبتاً پایین باعث جدایش آب از نفت خام گردد. در شکل ۳- به صورت نموداری تأثیر افزایش زمان تابش امواج فراصوت و توان تابشی امواج بر روی میزان نمک و آب موجود در نفت خام طبق پیشینه تحقیقاتی موجود و توضیحات ذکر شده نمایش داده شده است.

این عملیات را می‌توان همراه با امولسیون‌زدایی شیمیایی به صورت همزمان انجام داد. برای نفت خام در یکی از میدان‌های نفتی چین، امولسیون‌زدایی تا ۹۷ درصد با استفاده ترکیبی از امواج فراصوت به دست آمده در حالی که در حالت استفاده مستقل از امولسیون‌زدایی شیمیایی در شرایط یکسان، ۷۳ درصد آب‌گیری حاصل شده است [۲۷].

#### ۷- پاک‌سازی چاه‌های افقی

در صنعت نفت میزان برداشت از میداین نفتی در صورت استفاده از چاه‌های افقی به طرز غیرقابل انکاری بهتر و بالاتر است. یکی از مشکلات استفاده از این روش پلاگ شدن و انسداد چاه در صورت تغییر در فشار و دمای مخزن و حرکت ذرات ریز شن به سمت چاه تولیدی است.

ترکیبات نفت خام از جمله آسفالتین و واکس‌های پارافینی در صورت ته‌نشینی و رسوب در قسمت افقی چاه به شدت باعث کاهش تولید نفت می‌شوند.

به منظور کاهش هزینه بالای تعمیرات چاه‌های افقی به دلیل رسوب ترکیبات نفتی از امواج فراصوت استفاده شده است. طبق نتایج آزمایشگاهی به دست آمده، تابش امواج فراصوت در چاه‌های افقی، در محیط‌های مختلف و غلظت‌های متنوع از نفت خام، آسفالتین و واکس به منظور تمیز کردن مفید بوده است و دیگر نیازی به توقف عملیات تولید از چاه به این منظور نیست [۱۲].

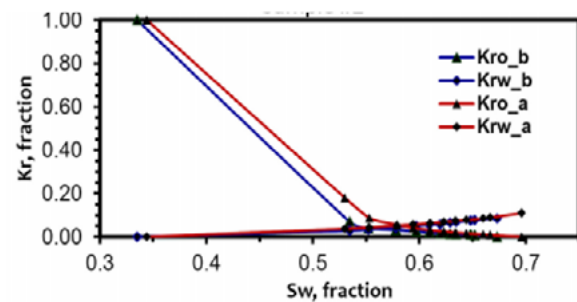
ولی با این حال استفاده میدانی از این روش هنوز عملیاتی نشده است. مهم‌ترین موضوع در عدم استفاده از این روش برای

به کمتر از ۰/۳ درصد حجمی کاهش یافته است [۲۱]. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از امواج فراصوت در نمک‌گیری و آب‌گیری از نفت خام با غلظت‌های بالای نمک بسیار موثرتر از فرآیند الکتریکی است و این تکنولوژی در فرآیندهای پالایش نفت خام بسیار پرکاربرد خواهد بود. طبق آزمایش انجام شده در سال ۲۰۱۲، امواج فراصوت در حالت بهینه با فرکانس ۱۰ کیلوهرتز و در زمان ۵ دقیقه از تابش امواج، نرخ نمک‌گیری ۸۷/۹ درصد از نفت خام را داشته است [۲۲].

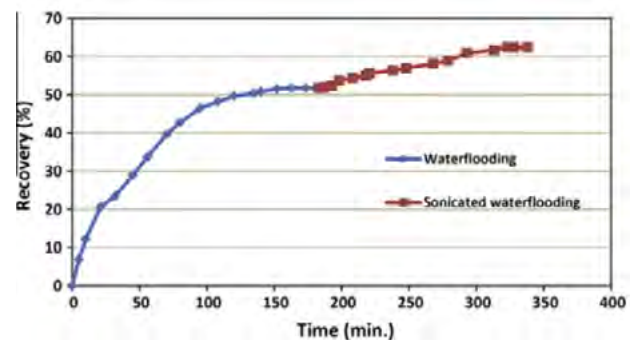
این روش به صورت تئوری و آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت. طبق نتایج، برای نفت خام در شرایط بهینه از تابش امواج فراصوت با توان ۵۷/۷ وات میزان بازده نمک‌گیری از نفت خام ۸۴ درصد اندازه‌گیری شد که برای عملیات پالایش نفت خام مناسب است [۲۳].

#### ۶- امولسیون‌زدایی و آب‌گیری نفت خام به کمک امواج فراصوت

تشکیل امولسیون آب در نفت باعث افزایش گرانروی نفت خام تولیدی می‌گردد و از طرفی، جدایش آب از نفت در سطح نیز به سختی انجام می‌گیرد. بنابراین لزوم امولسیون‌زدایی از نفت خام



شکل ۴ | تراوایی نسبی نفت خام قبل و بعد از تابش امواج فراصوت - قبل از تابش امواج فراصوت =  $b$  و بعد از تابش امواج فراصوت =  $a$  [۲۵]



شکل ۵ | بازده تولید نفت خام قبل و بعد از استفاده از امواج فراصوت در آب تزریقی [۲۷]

## ۱۰- کاربرد امواج فراصوت در استحصال نفت خام از لجن نفتی

با توجه به افزایش تقاضای نفت و محدود بودن این ذخایر، لزوم توجه به استحصال نفت خام از لجن های نفتی ضروری است. در این راستا آزمایش های مختلفی صورت گرفته، از جمله استفاده از امواج فراصوت که نتایج مفیدی نیز در برداشته است.

در سال ۲۰۱۲ از امواج فراصوت به همراه روش های ترموشیمیایی به منظور افزایش بهره‌وری از لجن های نفتی استفاده گردید. نتایج نشان داد که انرژی امواج فراصوت در شرایط بهینه باعث می‌شود که درصد نفت باقی مانده در لجن از ۴۳ درصد به ۱ درصد کاهش پیدا کند [۳۲].

طبق آزمایش های انجام شده، استفاده از امواج فراصوت در خروج و استحصال نفت از لجن های نفتی بازده بالایی دارد و می‌تواند به عنوان روشی جایگزین به جای روش های معمول مورد استفاده قرار گیرد. همچنین استفاده از این روش آلودگی های زیست محیطی مربوط به خالص سازی نفت خام را نیز به شدت کاهش می‌دهد [۳۳-۳۴].

## ۱۱- استفاده عملیاتی و میدانی از امواج فراصوت به منظور تحریک چاه

آسیب های سازندی در اطراف چاه تولیدی با کاهش نفوذپذیری نفت خام و افزایش افت فشار در نزدیک چاه تولیدی باعث کاهش شدید در میزان تولید و برداشت از مخازن نفتی می‌شود. از این رو باید به کمک روش های تحریک چاه این آسیب ها را برطرف کرد. به صورت معمول با استفاده از روش های اسید کاری و ایجاد شکاف هیدرولیکی در مخزن این آسیب تا حدودی برطرف می‌گردد. اما روش های ذکر شده دارای محدودیت هایی هستند. از جمله: هزینه بالای عملیات، آلودگی های زیست محیطی، تخریب بخشی از مخزن و افزایش احتمال پدیده مخروطی شدن آب و گاز و... [۱][۳۵].

در سال ۲۰۱۵ استفاده از این امواج در میدانی نفتی روسیه و آمریکا نشانگر افزایش چشم گیر در میزان بازده تولیدی از میدانی بوده است [۳۶]. تست های میدانی انجام شده در روسیه نشان داد که میانگین افزایش دبی نفت تولیدی بعد از تحریک چاه به روش امواج فراصوت بیش از دو برابر بوده است. افزایش ضریب بهره‌دهی چاه به صورت میانگین ۳۳ درصد و کاهش میزان آب تولیدی از چاه ها در حدود ۴ درصد بوده است.

استفاده از امواج فراصوت در آمریکا برای نفت سنگین با قدرت تولید پایین باعث افزایش چشم گیر دبی تولیدی از چاه ها شده و تولید جمعی نفت مربوط به چاه ها از ۲۹۰ بشکه به ۳۴۷۶ بشکه نفت در مدت شش ماه افزایش یافته است [۳۶].

در سال ۲۰۱۳ استفاده از تکنولوژی فراصوت به منظور افزایش

چاه های افقی، نحوه انتقال این ابزار به چاه افقی و چگونگی تثبیت آنها در مکان تعیین شده با توجه به تکمیل این چاه ها به صورت حفره باز است.

## ۸- تأثیر امواج فراصوت در نفوذپذیری و تراوایی نسبی نفت خام

نفت درون محیط متخلخل هر اندازه دارای تراوایی نسبی بالاتری نسبت به سایر سیالات باشد، با سهولت بیشتری درون فضاهای متخلخل حرکت می‌کند و با نرخ بیشتری برداشت شده، بازده تولید از مخزن نفتی نیز افزایش می‌یابد.

نتایج آزمایش های انجام شده نشان می‌دهد که تابش امواج فراصوت باعث بهبود تراوایی نسبی نفت خام شده است که این عملکرد به دلیل مکانیزم های متفاوتی رخ می‌دهد، از جمله کاهش گرانیوی نفت، تصحیح ترشوندگی، کاهش تنش بین سطحی و افزایش تراوایی سنگ. نمونه ای از این نتایج در شکل ۴- نشان داده شده است [۲۸-۲۹].

بعد از تابش امواج فراصوت، دبی تولید آب کاهش یافته و تراوایی نسبی نفت زیادتر شده است. تابش امواج فراصوت به نفت باعث افزایش آب دوستی سنگ، افزایش درجه اشباع آب در نقطه تقاطع دو نمودار تراوایی نسبی آب و نفت و در نتیجه افزایش تراوایی نسبی نفت شده است. بنابراین استفاده از امواج فراصوت باعث افزایش برداشت نفت خام خواهد گردید.

## ۹- کاربرد امواج فراصوت در تزریق آب به منظور ازدیاد برداشت

بعد از مدتی از تولید نفت خام، فشار مخزن کاهش می‌یابد و نمی‌توان تمامی نفت موجود در مخزن نفتی را تولید کرد. در حالت طبیعی به صورت میانگین تنها ۲۵ درصد از نفت خام موجود در مخزن قابل برداشت است. از این رو، برای افزایش بازده برداشت از مخازن نفتی از روش های ازدیاد برداشت متنوعی از جمله تزریق آب در مخزن نفتی به منظور حفظ فشار مخزن و جاروب نفت موجود به سمت چاه تولیدی استفاده می‌گردد.

طبق آزمایش های انجام شده، در نتیجه تابش امواج فراصوت به آب، میزان بازده مربوط به تزریق آب در مخزن نفتی در تمامی موارد افزایش داشته است که این افزایش از ۳ تا ۱۶ درصد می‌باشد [۳۰-۳۱].

علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد امواج فراصوت در تمامی نمونه ها باعث افزایش دما شده است که این افزایش دما علاوه بر کاهش گرانیوی سیال باعث کاهش تنش بین سطحی نیز شده است و این عوامل، افزایش راندمان و بازده عملیات تزریق آب را به دنبال داشته است. استفاده میدانی از این روش طبق بررسی پیشینه تحقیق موجود هنوز عملیاتی نشده است.

افقی ۸. نمک‌گیری از نفت خام ۹. افزایش بازده تزریق آب در مخزن به‌عنوان روش ازدیاد برداشت ۱۰. تولید نفت خام از لجن نفتی ۱۱. تحریک چاه تولیدی

با استفاده از این امواج در چاه‌های تولیدی علاوه بر موارد ذکر شده می‌توان بدون تخریب مخزن، بدون نیاز به تزریق مواد و با کمترین آلودگی زیست‌محیطی همزمان با تولید و بدون وقفه در عملیات بهره‌برداری، از چاه برداشت کرد.

در این روش نیازی به تزریق ماده خاصی نیست و بر خلاف روش‌های معمول تحریک چاه مانند تزریق اسید که نیاز به خرید، انتقال و ترکیب مواد مختلف از جمله اسید از شرکت‌های متنوع با قیمت‌های بالا دارد و یا روش ایجاد شکاف هیدرولیکی که نیاز به تهیه مواد و ساخت سیال دارد، این هزینه‌ها با استفاده از روش فراصوت حذف خواهد شد. همچنین در روش فراصوت بر خلاف روش‌های معمول نیازی به خرید دستگاه‌های پمپ سیال به منظور تحریک چاه نیست. علاوه بر این، در روش‌های تزریق اسید و ایجاد شکاف در زمان اجرای عملیات نیاز به توقف کامل تولید است. این در حالی است که در روش فراصوت می‌توان به‌صورت همزمان با تولید، عملیات تحریک چاه را انجام داد و از لحاظ اقتصادی توقفی در تولید نداشت. همچنین با توجه به سادگی نحوه کار با دستگاه‌های فراصوت نیازی به نیروی کار در این روش اندک است. بهره‌مندی از این تکنولوژی در میداین نفتی روسیه و آمریکا نتایج مفیدی در پی داشته است ولی استفاده از آن در میداین نفتی ایران با وجود مزایای فراوان این روش مستلزم توجه بیشتر مدیران و کارشناسان این صنعت است. برای رسیدن به این مهم می‌توان به صورت مستقل یا ترکیبی با سایر روش‌های بهره‌بردار و ازدیاد برداشت نفت از امواج فراصوت نیز بهره برد.

برداشت در چاه‌های رها شده، به‌صورت میدانی و عملیاتی مورد مطالعه قرار گرفت [۳۷].

طبق نتایج به‌دست آمده، استفاده از امواج فراصوت باعث افزایش برداشت از مخازن نفتی شده است و برای چاه‌هایی که نفوذپذیری و تخلخل بالا دارند، تابش امواج فراصوت می‌تواند باعث افزایش ۵۰ درصدی تولید نفت شود. اما برای مخازنی که دارای نفوذپذیری و تخلخل پایینی هستند، امواج فراصوت دارای موفقیت کمتری است ولی با این وجود، استفاده از امواج فراصوت به همراه روش‌های شیمیایی می‌تواند اثربخشی بیشتری داشته باشد [۳۷].

کاربرد این امواج در سال ۲۰۰۶ نشان داد که نفت خروجی از چاه‌ها بعد از انجام عملیات تابش امواج فراصوت افزایش ۴۰ تا ۶۰ درصدی داشته و میزان برداشت نفت تا بیش از ۱۰ درصد افزایش داشته است [۳۸].

### نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حاصل از سوابق تحقیقاتی و آزمایش‌های مربوط به امواج فراصوت، کاربرد و مزایای این امواج در صنعت نفت قابل توجه است. این امواج در صورت استفاده در شرایط بهینه می‌توانند به‌صورت چشم‌گیری باعث افزایش دبی تولیدی از چاه‌ها و بالا بردن میزان برداشت از میداین نفتی شوند.

امواج فراصوت در صورت استفاده در شرایط بهینه می‌توانند پیامدهای مفید فراوانی داشته باشند از جمله:

۱. کاهش آسفالتین موجود در نفت خام ۲. کاهش گرانیروی نفت خام
۳. جلوگیری از رسوب پارافین‌ها به‌خصوص در نفت‌های واکسی
۴. جلوگیری از رسوب نمک‌ها ۵. افزایش تراوایی نسبی نفت خام
۶. آمولسیون‌زدایی و آب‌گیری از نفت خام ۷. پاک‌سازی چاه‌های

### منابع

- [1] F. van der Bas, E. de Rouffignac, P. Zuiderwijk, D. van Batenburg. "Near wellbore stimulation by acoustic waves". In Abu Dhabi International Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, (2004, January).
- [2] J. Strobel, S. Rupitsch, R. Lerch. "Ferroelectret sensor array for characterization of cavitation effects in ultrasonic cleaning". Ultrasonics symposium (IUS), 2009 IEEE International (2009) 20-23.
- [3] X. Zhang, X. Chen, L. Ma, Y. Zhou, Y. Shi, G. Yang. "Research and application of ultrasonic oil production technique". Ground water (2013).
- [4] S. Shedid, S. Attallah. "Influences of ultrasonic radiation on asphaltene behavior with and without solvent effects". In SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control. Society of Petroleum Engineers, (January 2004).
- [5] M. Salehzadeh, A. Akherati, F. Ameli. "Experimental study of ultrasonic radiation on growth kinetic of asphaltene aggregation and deposition". The Canadian Journal of Chemical Engineering (2016).
- [6] I. Najafi, M. Amani. "Asphaltene Flocculation Inhibition with Ultrasonic Wave Radiation: A Detailed Experimental Study of the Governing Mechanisms". Texas A&M University at Qatar. Advances in Petroleum Exploration and Development Vol. 2, No. 2(2011) 32-36.
- [7] M. Mousavi, A. Ramezani, I. Najafi. "Effect of ultrasonic irradiation on rheological properties of asphaltenic crude oils". Petroleum science 9 (2012) 82-88.
- [8] J. Strobel, J. Rupitsch, R. Lerch. "Ferroelectret sensor array for characterization of cavitation effects in ultrasonic cleaning". Ultrasonics Symposium (2009) 20-23.
- [9] A. Mohammadi, M. Rahimi, M. Feyzi. "Effects of solvent ad-

- dition and ultrasound waves on viscosity reduction of residue fuel oil". *Chemical Engineering and Processing* 95 (2015) 353-361.
- [10] Zh. Jiahong. "The analyses of porous media permeability in oil Stratum by ultrasonic". *China Academic Journal Electronic Publishing House*, (July 2010) 2.
- [11] A. Aarts, G. Ooms, K. Bil. "Enhancement of liquid flow through a porous medium by ultrasonic irradiation". *SPE* 57720. (October 1999) 697-703.
- [12] N. Bjorndalen, M. Islam. "The effect of micro wave and ultrasonic irradiation on crude oil during production with a horizontal well". *Journal of Petroleum Science Engineering* (2004) 139-150.
- [13] P. Roberts, A. Venkitaraman, M. Sharma. "Ultrasonic removal of organic deposits and polymer-induced formation damage". *SPE* 62046 (2000) 19-24.
- [14] H. xingxu, Ch. shengpu, Sh. shanzhao. "Experimental study and application of high power ultrasonic treatment for removal of near wellbore paraffin precipitation damage". *J Southwest Petroleum University* (2011)33.
- [15] F. Yang, Zh. Li. "Effect of wax deposition on the porosity and permeability of reservoir". *Nat Gas Geo science* (2006)17-848 e50.
- [16] B. Champion. "The application of high-power sound waves for wellbore cleaning". *Journal SPE* 82197 (2004) 113-121.
- [17] T.W. Bakker, I. Vladimir. "Cavitator for effective well cleaning". *Journal SPE* 75352 (2002) 1-4.
- [18] M. Zhimei. "Research progress in ultrasonic scale inhibition and elimination". *Energy Sino-global* (2008) 13.
- [19] Sh. Zhu. "Research on ASP flooding oil pipeline ultrasonic eliminating scale technology". *China Academic Journal Electronic Publishing House* (2011)6.
- [20] Li, Xiaoli, Jianguo Zhang, and Daoyong Yang. "Determination of antiscaling efficiency and dissolution capacity for calcium carbonate with ultrasonic irradiation." *Industrial & Engineering Chemistry Research* 51.27 (2012): 9266-9274.
- [21] Y. Guoxiang, L. Xiaoping. "Pretreatment of Crude Oil by Ultrasonic-electric United Desalting and Dewatering". *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 16(4) (2008) 564-569.
- [22] Ye, Guoxiang, et al. "Application of ultrasound on crude oil pretreatment." *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 47.12 (2008): 2346-2350.
- [23] GR. Check, D. Mowla. "Theoretical and experimental investigation of desalting and dehydration of crude oil by assistance of ultrasonic irradiation". *Ultrasonics sonochemistry* (2013) 20(1):378-85.
- [24] L. Hongwei, G. Limei. "Ground engineering model of crude oil dehydration method". *Oil Gas Field* 26 (3) (2007) 32-33.
- [25] F. Antes, L. Diehl. "Effect of ultrasonic frequency on separation of water from heavy crude oil emulsion using ultrasonic baths". *Ultrasonics Sonochemistry*, Elsevier (2016).
- [26] Y. Pin, T. hwang. "Acoustic separation of liquid hydrocarbon from waste water". *US1*, 568.
- [27] S. jiang. "The demulsification with ultrasonic irradiation on oil-in-water emulsions of the tertiary recovery". *Acta* 21 (6) (2000) 97-101.
- [28] M. adel, R. salem. "The Effect of Ultrasonic Waves of EOR on The Relative Permeability Curves". *Society of petroleum science, SPE-175410-MS* (2015).
- [29] B. Keshavarzi, R. Karimi. "Investigating the role of ultrasonic wave on two-phase relative permeability in a free gravity drainage process". *Scientia Iranica, C* (2014) 21(3), 763-771.
- [30] E. Mohammadian, R. Junin. "Effects of sonication radiation on oil recovery by ultrasonic waves stimulated water-flooding". *Ultrasonics* 53 (2013) 607-614.
- [31] T. Hamida, T. Babadagli. "Effect of Ultrasonic Waves on the Capillary Imbibition Recovery of Oil". *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Jakarta, Indonesia* (2005).
- [32] Y. Jin, X. Zheng, X. Chu. "Oil Recovery from Oil Sludge through Combined Ultrasound and Thermochemical Cleaning Treatment". *Industrial & Engineering Chemistry Research* 51(2012) 9213-9217.
- [33] O. Abramov, V. Abramov, S.K. Myasnikov, M.S. Mullakaev. "Extraction of bitumen, crude oil and its products from tar sand and contaminated sandy soil under effect of ultrasound". *Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the Russian Academy of Sciences. Moscow* (2008).
- [34] T. Mason, A. Collings, A. Sumel. "Sonic and ultrasonic removal of chemical contaminants from soil in the laboratory and on a large scale". *Ultrason.Sonochem.*11 (2004) 205-210
- [35] Y. WANG. "The Pizinclean applications of ultrasonic wave technology in oil extraction". *Physics* 31 (11) (2002).
- [36] M. Mullakaev, V. Abramov, A. Abramova. "Development of ultrasonic equipment and technology for well stimulation and enhanced oil recovery". *Journal of Petroleum Science and Engineering* 125 (2015) 201 -208.
- [37] O. Vladimir, S. Marat. "Ultrasonic technology for enhanced oil recovery from failing oil wells and the equipment for its implementation". *Ultrasonics Sonochemistry* 20 (2013)1289-1295.
- [38] W. Ruifei, S.Wei, Y. Xiaojian, Zh. Rongjun. "Experimental study on ultrasonic effect in oil reservoir". *Petroleum Geology* (2006).