فناوری فراصوت: رویکردی نوین در پایش، بهره‌برداری و بهینه‌سازی میادین نفت و گاز

پانیذ نخعی[1]، مهدی رضوی‌فر[2*]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه تبریز، تبریز ایران

۲. استادیار، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه تبریز، تبریز ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبات: m.razavifar@tabrizu.ac.ir

مقاله‌ی مروری

صفحه ۱۰ - ۲۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۷

چکیده

فناوری‌های مبتنی بر امواج فراصوت به‌عنوان روش‌هایی مقرون‌به‌صرفه و سازگار با محیط‌زیست، نقش مهمی در بهبود برداشت نفت از مخازن هیدروکربنی ایفا می‌کنند. این فناوری با استفاده از امواج فراصوت پرتوان، آسیب‌های سازند نزدیک چاه را کاهش داده و موانع جریان نفت به سمت چاه تولیدی را برطرف می‌کند. در همین راستا، طبق گزارشات میدانی موجود استفاده از امواج فراصوت به‌عنوان یک روش انگیزش چاه در چاه‌های نفت روسیه و آمریکا منجر به بهبود بازده تولید نفت در حدود ۳۰ درصد شده است. این مقاله مروری جامع بر مطالعات آزمایشگاهی، میدانی و مدل‌سازی مرتبط با کاربرد امواج فراصوت در بهبود برداشت نفت ارائه می‌دهد. همچنین، با تحلیل پژوهش‌های موجود، شکاف‌های تحقیقاتی موجود و بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی (مانند فرکانس و توان) و توسعه مدل‌های پیش‌بینی دقیق به‌عنوان عوامل کلیدی برای ارتقای بهره‌وری پیشنهاد شده‌اند. این مطالعه بر ضرورت استفاده از فناوری امواج فراصوت در چاه‌های نفت به‌منظور بهبود برداشت نفت و مزایای محیط زیستی و اقتصادی آن تأکید دارد. نتایج ارائه شده در این پژوهش، در عملیات بهره‌برداری از مخازن و مدیریت تولید در میدان‌های نفت کاربرد خواهد داشت.

کلیدواژه‌ها: امواج فراصوت، بهبود برداشت نفت، آسیب سازند، کاهش گرانروی[1]، رسوب آسفالتین

۱. مقدمه

کاهش تولید هیدروکربن‌ها در برابر تقاضای روبه رشد انرژی در جهان، چالشی اساسی در صنعت نفت و گاز ایجاد کرده است. در همین راستا، توسعه فناوری‌های نوین برای آزادسازی هیدروکربن‌های غیرقابل تولید و افزایش برداشت نفت از اهمیت بالایی برخوردار است [۱]. این موضوع به‌ویژه در مخازن با آسیب‌های سازند که ناشی از نفوذ مایعات حفاری، رسوب آسفالتین و واکس، یا جابه‌جایی ذرات ریز است، ضروری است. فناوری‌های متداول مانند ایجاد شکاف هیدرولیکی و تزریق اسید، گران‌قیمت بوده و نگرانی‌های زیست‌محیطی ایجاد می‌کنند [۲، ۳]. استفاده از امواج فراصوت با کاهش گرانروی نفت خام، بهبود نفوذپذیری سنگ مخزن و حذف رسوبات آلی و معدنی در محیط متخلخل سنگ، برداشت نفت را بهبود می‌بخشد [۴]. انتخاب این موضوع به دلیل نیاز صنعت به استفاده از روش‌های کم‌هزینه، کم‌خطر و سازگار با محیط‌زیست برای مقابله با چالش‌های تولید و افزایش بازیافت نفت بوده است.

در مورد مکانیزم‌های بهبود بازیافت نفت با استفاده از امواج فراصوت، نظرات مختلفی ارائه شده است؛ (۱) تغییر در

1. Viscosity

ترشـوندگی سنگ: امواج با فرکانس بالا باعث ارتعاش سنگ‌ها و سیالات می‌شوند. با این حال سرعت و شتاب ارتعاش در اجسام مختلف، متفاوت است، بنابراین می‌توانند منجر به حرکت نسبی سـطح سیال و سـنگ شـوند. وقتی این حرکت به‌شدت خاصی برسـد، به آن «تمایل به درهـم آمیختن[1]» گفته می‌شـود و در نتیجه نیروی جاذبه بین سیال و سـنگ کاهش یافته و سیال از سطح سـنگ جدا می‌شـود؛ (۲) کاهش گرانروی: سنگ مخزن تحت تأثیر ارتعاش امواج فراصوت قرار می‌گیرد که این امر باعث تغییـرات متناوب در تنش برشی و فشـار صوتی می‌شـود. برای هیدروکربن‌های سـنگین، گرانروی سیال با افزایش تنش برشی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، حرارتی که به دلیل ارتعاشات امواج فراصوت تولید می‌شود، می‌تواند منجر به کاهش گرانروی شود. ایـن پدیده بـه این دلیـل رخ می‌دهد که موج صوتی در سـنگ جذب شـده و انـرژی صوتی به انـرژی حرارتی تبدیل می‌شـود. همچنیـن، حفره‌زایی[2] مقـدار زیادی انرژی حـرارتی را از طریق فرآیند حفـره‌زایی (ترکیدن حباب‌ها)[3] آزاد می‌کند؛ (۳) کاهش تنش سـطحی: به دلیل اثر حـرارتی امواج فراصـوت و تغییر در خواص رئولوژی آن‌ها پس از تابش امواج (کاهش گرانروی نفت خـام)، تنش بین سـطحی آب و نفت در شـرایط مخزن کاهش می‌یابد؛ (۴) شکسـتن ترکیبات بـزرگ هیدروکربن: این پدیده می‌تواند به دلایل مختلفی مانند حفره‌زایی، ارتعاش و اثر تصادفی مکانیکی امواج فراصوت ایجاد شود. ارتعاشات مکانیکی ناشی از امواج با فرکانس بالا باعث ایجاد حرکت نسبی بین مولکول‌های مختلف می‌شود. این حرکت به دلیل تفاوت در شتاب مولکول‌ها رخ‌داده و درنهایـت منجـر بـه شکسـتن مولکول‌های سـنگین می‌گردد. این امر به همراه تأثیر حفره‌زایی باعث کاهش گرانروی نفت سنگین شده و بهبود برداشت از مخازن را در پی دارد؛ (۵) بهبود تخلخل و نفوذپذیری سـنگ به دلیل تغییر شکل منافذ، حذف پلاگ‌های ریز، حل شـدن پارافین و آسفالتین‌ها و ...؛ (۶) اتصال قطرات نفت به دلیل نیروی بیرکنس[4] که منجر به جریان پیوسته نفت می‌شود. علاوه براین، امواج فراصوت قطرات نفتی را که در حفرات ریز محبوس شده‌اند را به دلیل انرژی تولید شده توسـط حفره‌زایی و ارتعاشـات مکانیکی در سـنگ‌ها و سیالات، بـه حرکـت درمی‌آورنـد؛ (۷) انتقال پریسـتالتیک[5]: ارتعاشـات مکانیـکی می‌تواننـد باعث تغییر شـکل دیواره‌های منافذ شـده و سیـالات را به داخل حفرات مجاور منتقـل کنند. این فرآیند، انتقال پریستالتیک را آغاز می‌نماید؛ (۸) امولسیون‌سازی ناشی از ارتعاشـات صـوتی؛ (۹) امولسیـون‌زدایی: گرمای تولید شـده توسـط امواج فراصوت در مدت زمان طولانی، می‌تواند گرانروی امولسیون‌هـا را کم کرده و باعث شکسـتن آن‌ها، به‌خصوص در مخازن نفت سنگین، شود.

با توجه بـه مزایای بهبود بازیافت نفت با اسـتفاده از امواج فراصوت و تحقیقات مسـتمر در این زمینـه، مطالعات پیشین در ایـن حـوزه عمدتاً بـه موضوعات خـاصی محدود شـده‌اند. در ایـن مقالـه، پیشـرفت‌های اخیر در بهبـود بازیافت نفت که بـا به‌کارگیـری فناوری‌های مبتـنی بر امـواج فراصوت حاصل شـده‌اند، به‌طـور جامع بـررسی شـده‌اند. هم‌چنیـن، مطالعات آزمایشـگاهی و مدل‌سـازی مربوط به تأثیر امـواج فراصوت در تولید نفت، آسیب‌های سازند، جریان سیال و گرانروی سیالات بـررسی شـده‌اند. در ادامه، نتایـج مطالعات میـدانی مربوط به تابش امواج فراصوت در بهبود بازیافت نفت ارائه شده‌اند.

۲. مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌سازی مربوط به تابش امواج فراصوت

۲-۱. تأثیر امواج فراصوت بر بهبود برداشت نفت از مخازن

مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهند که امواج فراصوت توانایی جابجایی نفت باقی‌مانده، افزایش نفوذپذیری سنگ مخزن و بهبود بازیافت نفت را دارند. آگی و همکاران تأثیر استفاده ترکیبی از امواج فراصوت و سورفکتانت را در عملیات ازدیاد برداشت نفت بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که استفاده هم‌زمان از سورفکتانت و امواج فراصوت (فرکانس ۴۰ کیلوهرتز، توان ۵۰۰ وات) منجر به بهبود حدود ۱۲ درصد بازده تولید نفت خام را می‌شود. تشکیل میکروامولسیون‌ها مکانیزم اصلی در تزریق سورفکتانت بود. امواج فراصوت در توان بالا و غلظت سورفکتانت بیشتر از غلظت بحرانی میسل، کارایی بیشتری نشان دادند[۵]. در مطالعه‌ای دیگر با استفاده از میکرومدل‌های شفاف دوبعدی (مدل هل-شاو[6]) و امواج فراصوت (۴۰ کیلوهرتز، ۵۰۰ وات)، آگی و همکاران نشان دادند که امواج متناوب نسبت به پیوسته برای بهبود برداشت نفت سنگین کاربردی‌تر هستند. ترکیب امواج متناوب، توان

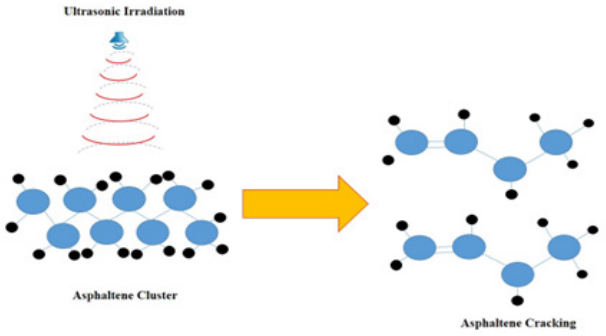
1. Mangling tendency
2. Cavitation
3. Bubble collapse
4. Bjerknes force
5. Peristaltic transport
6. Hele-Shaw model

بالا و فاصله کوتاه از منبع انرژی بهترین شرایط برای بهبود برداشت نفت خام را فراهم کرد [۶]. قمرطالع و همکاران تأثیر ساختار حفرات سنگ را در این عملیات بررسی کردند. پنج نمونه سنگ کربناته و ماسه‌سنگی با ساختارهای مختلف تحت تابش متناوب امواج (۲۰ کیلوهرتز، ۳۰۰ وات، ۱۰ دقیقه، ۷ ثانیه تابش و ۳ ثانیه استراحت) قرار گرفتند. تحلیل‌های پتروگرافی و میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که امواج فراصوت با ایجاد میکروشکاف‌ها یا جدا شدن ذرات، ریخت‌شناسی سنگ را تغییر می‌دهند. میکروشکاف‌ها نفوذپذیری را افزایش دادند، اما جدا شدن ذرات گاهی نفوذپذیری را کاهش داد. نفوذپذیری کربنات‌های اولیتیک به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت، اما نتایج در ماسه‌سنگ‌ها متفاوت بود [۷]. این یافته‌ها با مطالعات رضایی دهشیبی و همکاران در میکرومدل‌ها سازگار است. طبق نتایج این پژوهش، بازیافت نفت به هندسه میکرومدل وابسته است [۸].

هی و همکاران تأثیر امواج فراصوت بر بازیافت نفت از لجن نفتی و نمونه‌های ماسه اشباع‌شده با وازلین و نفت‌سفید را بررسی کردند. آزمایش‌های سیلاب‌زنی با فرکانس‌های ۲۵، ۴۰ و ۶۵ کیلوهرتز و توان ۵۰-۵۰۰ وات نشان داد که توان خروجی مهم‌ترین عامل در بازده عملیات است. افزایش توان امواج، بازیافت نفت را بهبود می‌دهد، درحالی‌که فرکانس بالاتر فرآیند را تسریع می‌کند. به‌عنوان مثال، بازده تولید نفت در امواج با توان‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ وات به ترتیب ۱۰ درصد، ۱۴ درصد و ۱۷ درصد افزایش یافت. حجم منافذ (PV، به معنای حجم قابل‌برداشت نفت در مخزن) معیاری کلیدی بود؛ بازیافت در ۱۰۰ وات و ۲۰۰ دقیقه تابش برای فرکانس ۲۵ کیلوهرتز ۵۱ درصد PV، برای ۴۰ کیلوهرتز ۵۳ درصد PV و برای ۶۵ کیلوهرتز ۵۷ درصد PV بود [۹]. وانگ و همکاران کاهش اشباع آب در مغزه‌های سنگی را با امواج فراصوت، تزریق شیمیایی و ترکیب این دو روش مقایسه کردند. امواج با فرکانس پایین‌تر و توان بالاتر بازده را بهبود دادند، اما اثر تابش با زمان کاهش یافت که نیاز به کنترل دقیق مدت تابش را نشان می‌دهد. فناوری ترکیبی فراصوت-شیمیایی بیشترین بهبود نفوذپذیری را نسبت به روش‌های تکی داشت. این فناوری به‌عنوان روشی مکمل، نه جایگزین روش‌های موجود معرفی شد [۱۰]. وانگ و همکاران کاهش گرانروی نفت فوق‌سنگین (با گرانروی اولیه ۱۲۵۰ مگاپاسکال‌ثانیه) را بررسی کردند. امواج با فرکانس‌های ۱۸، ۲۰ و ۲۵ کیلوهرتز و توان ۱۰۰-۱۰۰۰ وات گرانروی نفت خام را به‌ترتیب به ۴۸۰، ۸۹۰ و ۹۲۰ مگاپاسکال‌ثانیه کاهش دادند. طبق نتایج، حفره‌زایی ناشی از امواج فراصوت مولکول‌های سنگین نفت را به هیدروکربن‌های سبک‌تر تجزیه کرد. همچنین، فرکانس، توان و زمان تابش امواج عوامل کلیدی در بازده عملیات معرفی شدند [۱۱]. مولاکایف و همکاران تأثیر امواج فراصوت بر گرانروی نفت با ترکیبات مختلف را بررسی کردند. طبق نتایج، نفت‌های دارای پارافین کم یا آسفالتین بالا، کاهش گرانروی قابل‌توجهی را نشان دادند [۱۲]. افزایش زمان تابش امواج، بازده عملیات را بهبود داد. این یافته‌ها با نتایج ارائه شده در پژوهش‌های رحیمی و همکاران [۱۳] و علی‌یف و همکاران [۱۴] سازگار است. نادری و باباداغلی تأثیر امواج فراصوت بر بازده تولید نفت و برهم‌کنش سیال-سنگ را در شرایط مختلف ترشوندگی سنگ مخزن بررسی کردند. سطوح نفت‌دوست بازده تولید نفت بیشتری را در فرکانس‌های بالاتر امواج فراصوت نشان دادند، اما ضریب بازده تولید نهایی تغییر چندانی نداشت [۱۵، ۱۶]. موسوی و همکاران رفتار رئولوژیکی نفت خام را بررسی کردند. طبق نتایج، امواج فراصوت (۴۵ کیلوهرتز) اجزای سنگین نفت خام (به‌ویژه آسفالتین) را حل کردند. همچنین، نفت خام کوه‌موند پس از ۴۰ دقیقه تابش امواج فراصوت، رفتار شبه‌پلاستیک نشان داد. در همین راستا، شناسایی زمان بهینه تابش امواج فراصوت برای جلوگیری از رسوب آسفالتین ضروری است [۱۷]. شماتیکی از شکستن توده-های آسفالتین موجود در نفت خام تحت تابش امواج فراصوت در (شکل ۱) ارائه شده است.

محمدیان و همکاران تزریق آب هم‌زمان با تابش امواج فراصوت (۴۰ کیلوهرتز، ۱۰۰-۵۰۰ وات) را بررسی کردند. طبق نتایج آزمایشگاهی، حفره‌زایی ناشی از امواج فراصوت، کاهش گرانروی نفت خام و امولسیون‌سازی مکانیزم‌های اصلی در بهبود برداشت نفت بودند. همچنین، افزایش دمای نفت خام، گرانروی و کشش سطحی را کاهش داد [۱۸]. حمیدی و همکاران افت فشار و گرانروی نفت خام در محیط متخلخل را بررسی کردند. طبق نتایج، گرمای ایجاد شده در مقیاس حفرات سنگ، حفره‌زایی و کاهش گرانروی نفت خام از مکانیزم‌های اصلی در بهبود برداشت نفت تحت تابش امواج فراصوت بودند [۱۹]. الهمذی و همکاران تحرک‌پذیری نفت را در مغزه‌های سنگی بررسی کردند. امواج فراصوت (۵۰ کیلوهرتز) نفوذپذیری نسبی و نرخ تولید نفت خام را در حالت‌های افقی و عمودی بهبود دادند [۲۰]. حمیدی و همکاران تأثیر تابش امواج فراصوت و تزریق هم‌زمان سورفکتانت را در یک مدل هل-شاو بررسی کردند. طبق نتایج، امولسیون‌سازی و کاهش سورفکتانت موردنیاز تحت تابش امواج فراصوت مشاهده شد [۲۱، ۲۲].

همچنین آن‌ها تزریق گاز CO_2 هم‌زمان با تابش امواج فراصوت را بررسی کردند. طبق نتایج، بازده تولید نفت در شرایط دمایی کنترل‌نشده بیشتر بهبود یافت. همچنین، کاهش گرانروی نفت خام و فشار مویینگی در محیط متخلخل سنگ تحت تابش امواج فراصوت اثبات شد [۲۳]. موصین و مریبوت بازده تولید نفت حدود ۸۰ درصد را پس از ۳۰ دقیقه تابش (۲۰ کیلوهرتز، ۱۰۰-۳۵۰ وات) گزارش کردند که نشانگر تأثیر محسوس امواج فراصوت در بهبود برداشت نفت از مخازن است [۲۴].



شکل ۱: شماتیک شکستن توده‌های آسفالتین موجود در نفت خام تحت تابش امواج فراصوت

۲-۲. تأثیر امواج فراصوت در کاهش آسیب‌های سازند

آسیب سازند مانعی در تولید نفت از مخازن است. تابش امواج فراصوت با تحریک (انگیزش) نواحی نزدیک به چاه، آسیب‌های ناشی از انتقال ذرات ریز، رسوب آسفالتین، واکس و رسوبات معدنی را کاهش می‌دهند. پو و همکاران تأثیر توان، فرکانس و زمان تابش امواج فراصوت بر حذف رسوبات معدنی نزدیک چاه را بررسی کردند. طبق نتایج، افزایش توان و زمان تابش امواج (۸۰-۱۲۰ دقیقه) بازده کاهش آسیب سازند (تمیزکاری چاه) را بهبود می‌دهد [۲۵]. طاهری شکیب و همکاران از امواج فراصوت برای حذف رسوبات NaCl و بازگرداندن نفوذپذیری ناحیه نزدیک به چاه استفاده کردند. طبق نتایج، استفاده ترکیبی از امواج فراصوت و تزریق آب، نفوذپذیری (تراوایی) مغزه‌های سنگی آسیب‌دیده را حدود ۸۰ درصد بازگرداند، درحالی‌که تزریق آب به‌تنهایی حدود ۳۰ درصد در بازگردانی نفوذپذیری سنگ مؤثر بود. هم‌افزایی امواج فراصوت و تزریق آب در مخازن با نفوذپذیری کم تأثیر قابل‌توجهی در بهبود برداشت نفت داشت [۲۶]. نتایج مشابهی برای حذف رسوبات KCl با این روش گزارش شده است [۲۷]. کونانز و ولفل حذف رسوبات ژیپس در لوله‌ها را با امواج فراصوت بررسی کردند. طبق نتایج، دامنه ارتعاشات و زمان تابش امواج فراصوت بازده حذف این رسوبات معدنی را افزایش می‌دهد. این روش به‌عنوان رویکردی سازگار با محیط‌زیست، مکمل فناوری‌های سنتی معرفی شد [۲۸]. آزمایش‌ها روی مغزه‌های آسیب‌دیده توسط پارافین و رسوبات معدنی نشان داد که امواج فراصوت (با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز، ۱۰۰۰ وات) نفوذپذیری سنگ را بهبود می‌بخشد [۲۹, ۳۰]. فرکانس‌های بالاتر از ۴۰ کیلوهرتز ممکن است به مغزه آسیب برسانند که محدودیتی کلیدی در این عملیات است. مطالعات انجام شده به روش تصویربرداری از میکرومدل‌های شفاف دوبعدی در فرکانس‌های ۲۰ کیلوهرتز (۴۰ وات) و ۳۰ کیلوهرتز (۱۰۰ وات) نشان داد که امواج فراصوت رسوب آسفالتین را کاهش داده و از تشکیل آن در محیط متخلخل سنگ جلوگیری می‌کند [۳۱، ۳۲]. ارتعاشات مکانیکی ایجاد شده توسط امواج فراصوت، مکانیزم اصلی این فرآیند است. امواج فراصوت با فناوری‌های دیگر برای حذف آسیب‌های ناشی از سیالات حفاری، رسوبات آلی، ذرات گل و پلی‌آکریل‌آمید ترکیب شده‌اند [۳۳-۳۶]. موحسین و مریبوت مدلی صوتی-حرارتی برای تخمین تأثیر امواج فراصوت در برداشت نفت تک‌فازی توسعه دادند. طبق نتایج این مدل، افزایش فشار ناشی از تابش امواج فراصوت بازده تولید نفت خام را بهبود می‌دهد [۲۴]. گوو و همکاران ارتعاشات فرکانس بالا را مدل‌سازی کردند. استفاده از این روش در چاه نفتی در چین غربی نفوذپذیری سنگ مخزن را از ۱۱/۴ میلی‌دارسی به ۲۲ میلی‌دارسی، گرانروی نفت خام را از ۶۳/۵ مگاپاسکال‌ثانیه به ۳۷ مگاپاسکال‌ثانیه کاهش داد [۳۴]. خلاصه برخی مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌سازی‌های انجام شده در مورد استفاده از امواج فراصوت در بهبود برداشت نفت و همچنین، خلاصه مطالعات انجام شده در مورد استفاده از این امواج در کاهش آسیب سازند به ترتیب در (جدول‌های ۱ و ۲) ارائه شده‌اند.

جدول ۱: خلاصه برخی مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌سازی انجام شده در مورد تأثیر امواج فراصوت

فرکانس امواج	توان امواج	زمان تابش	نتیجه اصلی	پژوهشگران
۴۰ کیلوهرتز.	۵۰۰ وات	۳-۹۰ دقیقه	استفاده ترکیبی از امواج فراصوت و تزریق سورفکتانت منجر به بهبود برداشت نفت از مخازن هیدروکربنی می‌شود.	آگی و همکاران [۵]
۱۲۵-۲۵ کیلوهرتز	۳۰۰-۱۲۰ وات	۱۵-۱۲۰ دقیقه	توان امواج فراصوت نسبت به سایر پارامترها مانند فرکانس، زمان، دما و pH، مهم‌ترین عامل در بهبود بازیافت نفت است.	تان و همکاران [۹]
۲۵-۱۸ کیلوهرتز	۱۰۰۰-۱۰۰ وات	۶۰-۵ دقیقه	مهم‌ترین عوامل برای کاهش گرانروی نفت سنگین، فرکانس امواج فراصوت، توان و زمان تابش امواج فراصوت هستند.	وانگ و همکاران [۱۱]
۲۴/۳ کیلوهرتز	۴۰۰۰ وات	تا ۱۵ دقیقه	کارایی تابش امواج فراصوت بر روی نفت خام بستگی به ترکیب نفت دارد.	مولاکایف و همکاران [۱۲]
۴۵ کیلوهرتز	۷۲ وات	۲۴۰-۵ دقیقه	تابش امواج فراصوت انحلال اجزاء سنگین در نفت خام را افزایش می‌دهد.	موسوی و همکاران [۱۷]
۶۸-۴۰-۲۵ کیلوهرتز	۵۰۰-۱۰۰ وات	۶۰ دقیقه	بهبود برداشت نفت تحت تابش امواج فراصوت ناشی از حفره‌زایی، تولید گرما و کاهش گرانروی نفت خام است.	حمیدی و همکاران [۱۹]
۴۰ کیلوهرتز	۵۰۰ وات	تا ۳۰ دقیقه	امواج فراصوت باعث پخش فازهای آب شور-نفت و همچنین تولید امولسیون‌ها شد. درحالی‌که امولسیون‌زدایی در تابش طولانی امواج فراصوت رخ داد.	حمیدی و همکاران [۲۱]
۴۰ کیلوهرتز	۵۰۰ وات	تا ۶۰ دقیقه	استفاده ترکیبی از امواج فراصوت و تزریق گاز کربن دی‌اکسید در مخازن نفتی منجر به بهبود برداشت نفت می‌شود. کاهش گرانروی نفت خام به‌عنوان مکانیسم اصلی در این عملیات ارائه شده است.	حمیدی و همکاران [۲۳]
۵۰-۱۸ کیلوهرتز	۱۰۰۰-۶۰وات	۱۲۰-۸۰ دقیقه	انسداد حفرات سنگ مخزن با افزایش توان و زمان تابش امواج فراصوت کاهش پیدا می‌کند.	پوو و همکاران [۲۵]
۲۲ کیلوهرتز	۱۰۰۰ وات	تا ۸۰ دقیقه	اثر ترکیبی تحریک توسط امواج فراصوت و تزریق آب، حذف رسوبات NaCl تشکیل‌شده در مغزه‌های سنگی را بهبود بخشید.	طاهری شکیب و همکاران [۲۶]
۲۰ کیلوهرتز	۲۰۰۰ وات	۱۰-۵ دقیقه	رسوب گچ ایجاد شده در محیط متخلخل سنگ، می‌تواند توسط امواج فراصوت حذف شود. این موضوع به دامنه ارتعاشات و مدت‌زمان تابش امواج فراصوت بستگی دارد.	کونانز و ولفل [۲۸]

جدول ۲: خلاصه برخی پژوهش‌های انجام شده در مورد تأثیر امواج فراصوت بر روی آسیب سازند

فرکانس امواج	نوع آسیب	نتیجه اصلی	پژوهشگران
۴۰-۲۰ کیلوهرتز	تغییر ساختار منافذ سنگ	امواج فراصوت ساختار منافذ سنگ را اصلاح کرده و نفوذپذیری آن را افزایش می‌دهد.	قمرطالع و همکاران[۷]
۴۴-۲۲ کیلوهرتز	گرانروی بالای نفت خام و رسوب ترکیبات آلی	امواج فراصوت گرانروی نفت خام را کاهش داده و نفوذپذیری سنگ مخزن را بهبود می‌بخشد.	مولاکایف و همکاران[۱۲]
۴۰-۲۰ کیلوهرتز	رسوب آسفالتین	امواج فراصوت با کاهش رسوبات آسفالتین، تراوایی سنگ را بهبود داده و برداشت نفت را افزایش می‌دهد.	رضوی‌فر و همکاران[۳۷]
۲۰ کیلوهرتز	گرفتگی حفرات با رسوب کربنات کلسیم	امواج فراصوت با توان بالا، انسداد حفرات سنگ ناشی از رسوب کربنات کلسیم را به‌طور مؤثری حذف می‌کند.	ژانگ و همکاران[۳۸]
۲۵-۲۰ کیلوهرتز	رسوبات کلوئیدی در محیط متخلخل سنگ	امواج فراصوت رسوبات کلوئیدی را تجزیه کرده و گرفتگی حفرات سنگ را برطرف می‌کند.	مو و همکاران[۳۹]
۳۰-۲۰ کیلوهرتز	انسداد معدنی حفرات سنگ	ترکیب امواج فراصوت با روش تزریق اسید، انسداد معدنی را بهتر از سایر روش‌ها حذف می‌کند.	خان و همکاران[۴۰]
۲۰ کیلوهرتز	کاهش تراوایی سازند	تابش امواج فراصوت آسیب‌های نزدیک چاه را کاهش داده و تولید از چاه را افزایش می‌دهد.	شو و همکاران[۴۱]
۲۵-۱۵ کیلوهرتز	کاهش تراوایی سازند	تابش امواج صوتی با فرکانس بالا تراوایی سازند را بازیابی کرده و تحریک چاه را بهبود می‌بخشد.	وانگ و همکاران[۴۲]

۲-۳. چالش‌ها و محدودیت‌های استفاده از امواج فراصوت در مخازن نفتی

مطالعات آزمایشگاهی امواج فراصوت، در بازه فرکانسی ۲۰ تا ۱۲۵ کیلوهرتز، توان ۳۰ تا ۲۰۰۰ وات و زمان تابش تا ۲۴۰ دقیقه، روی نمونه‌های مغزه سنگی و میکرومدل‌های شفاف دوبعدی انجام شده‌اند. با این حال، این آزمایش‌ها اغلب در شرایط محیطی استاندارد اجرا شده‌اند که با فشار و دمای بالای مخازن واقعی هیدروکربنی تفاوت دارند. فشار و دما، به‌عنوان عوامل کلیدی در بازیافت نفت، می‌توانند اثر امواج فراصوت را تقویت یا تضعیف کنند، اما این تأثیر به‌طور جامع بررسی نشده است. برای مثال، مشخص نیست آیا افزایش دما باعث تشدید پدیده حفره‌زایی می‌شود یا تغییرات فشار مویینگی را مختل می‌کند. این شکاف تحقیقاتی، کاربرد صنعتی امواج فراصوت را با تردید مواجه می‌کند.

یکی از محدودیت‌های اصلی، تمرکز مطالعات روی شرایط آزمایشگاهی غیرواقعی است. آزمایش‌ها معمولاً نفوذپذیری یا بازیافت نفت را در نمونه‌های کوچک و تحت شرایط کنترل‌شده بررسی کرده‌اند، اما مخازن واقعی دارای پیچیدگی‌های هندسی، ناهمگنی سنگ و جریان‌های چندفازی هستند. نبود آزمایش‌های مقیاس‌پذیر در شرایط مخزنی، قابلیت تعمیم نتایج را کاهش داده است. برای رفع این مشکل، لازم است آزمایش‌هایی در محیط‌های شبیه‌سازی‌شده با فشار و دمای بالا انجام شود تا اثرات واقعی امواج فراصوت مشخص گردد.

طراحی تابشگرهای فراصوت نیز چالش دیگری است که کمتر مورد توجه قرار گرفته. اندازه، محل قرارگیری و نحوه انتقال امواج در چاه‌ها بر کارایی، هزینه تعمیرات و جریان نفت خام تأثیر می‌گذارند، اما این جنبه‌ها به‌صورت سیستماتیک بررسی نشده‌اند. برای مثال، ابزارهای بزرگ ممکن است جریان سیال درون چاه را مختل کنند، درحالی‌که ابزارهای کوچک ممکن است عمق نفوذ کافی نداشته باشند. این عدم توجه به طراحی ابزار، مانع از تبدیل نتایج آزمایشگاهی به فناوری‌های عملیاتی شده است.

آسیب‌های سازند، مانند رسوب آسفالتین یا تورم ذرات گل، اغلب نتیجه چندین مکانیزم هم‌زمان هستند. مطالعات فعلی تأثیر امواج فراصوت را روی مکانیزم‌های جداگانه

بررسی کرده‌اند، اما اثر آن‌ها روی ترکیب مکانیزم‌ها (مثل مسدود شدن حفرات همراه با رسوب معدنی) ناشناخته است. این شکاف می‌تواند کارایی امواج فراصوت را در شرایط واقعی مخزن محدود کند. تحقیقات آینده باید آزمایش‌هایی با سناریوهای چندگانه آسیب سازند را طراحی کنند تا اثرات متقابل این مکانیزم‌ها روشن شود.

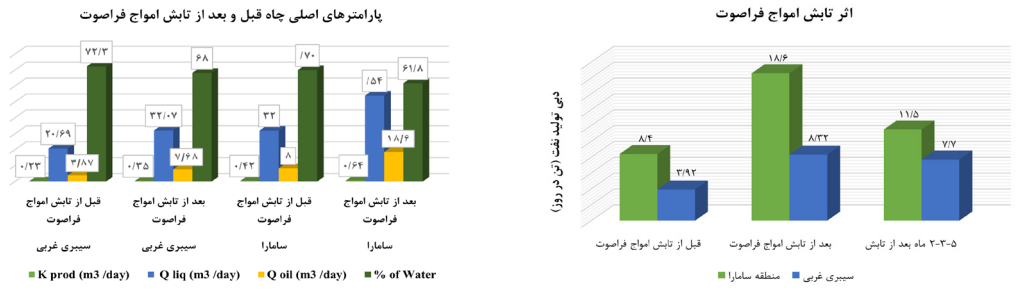
پرتودهی طولانی‌مدت امواج فراصوت نیز می‌تواند مشکل‌ساز باشد. تابش بیش از حد ممکن است به ساختار سنگ مخزن آسیب برساند یا امولسیون‌های ناخواسته ایجاد کند که جریان نفت را مختل می‌کنند. تعیین زمان بهینه تابش، با توجه به نوع سنگ و سیالات مخزن، ضروری است اما به‌طور کامل بررسی نشده است.

امواج فراصوت با کاهش فشار مویینگی، کشش سطحی و گرانروی نفت خام، نفوذ سیال در محیط‌های متخلخل را بهبود می‌دهند، اما مکانیزم‌های دقیق این فرآیند همچنان مورد اختلاف است. ارتعاش مکانیکی، حفره‌زایی، تولید حرارت و امولسیون‌سازی به‌عنوان مکانیزم‌های احتمالی مطرح شده‌اند، اما وابستگی آن‌ها به ویژگی‌های مخزن (مثل تخلخل یا ترشوندگی سنگ مخزن) و پارامترهای موج (مثل فرکانس و توان) به‌طور کامل درک نشده است. این نبود اجماع، طراحی عملیات بهینه را در شرایط واقعی دشوار می‌کند. برای کاربرد موفق امواج فراصوت، باید عوامل کلیدی مانند هندسه مخزن، ویژگی‌های سیال، عمق نفوذ امواج و روش تابش (پیوسته یا متناوب) به‌دقت بررسی شوند. بدون این تحلیل‌ها، فناوری امواج فراصوت ممکن است در مقیاس صنعتی ناکارآمد یا پرهزینه باشد.

۳. نتایج مطالعات میدانی استفاده از امواج فراصوت

کاربرد امواج فراصوت در تحریک چاه‌ها و بهبود بازیافت نفت در چندین آزمایش میدانی، به‌ویژه در کشور روسیه بررسی شده است. آبراموف و همکاران اثر تحریک چاه‌های آسیب‌دیده را با امواج فراصوت (فرکانس ۲۵ کیلوهرتز) در مخازنی با نفوذپذیری ۲۰ میلی‌دارسی و تخلخل ۱۵ درصد بررسی کردند. نتایج میدانی نشان داد که تابش امواج فراصوت، دبی تولید نفت را حدود ۵۰ درصد افزایش می‌دهد و در مخازن با نفوذپذیری و تخلخل بالاتر بهبود برداشت نفت تا حدود ۸۰ درصد مشاهده شد. با این حال، در مخازن با نفوذپذیری و تخلخل پایین‌تر، تأثیر امواج فراصوت به‌طور قابل‌توجهی کمتر بود که نشان‌دهنده وابستگی شدید بازده این عملیات به ویژگی‌های سنگ مخزن است[۳۵]. این محدودیت کاربرد فناوری در مخازن با تراوایی کم را با چالش مواجه می‌کند.

همچنین آن‌ها اجرای فناوری امواج فراصوت را در بیش از ۱۰۰ چاه در دو منطقه با شرایط زمین‌شناسی متفاوت، یعنی سیبری غربی و ساماراء بررسی کردند. طبق نتایج، امواج با فرکانس ۱۳-۲۶ کیلوهرتز بازده موفقیت ۹۰ درصد و افزایش تولید نفت بین ۴۰ درصد تا ۱۰۰ درصد ایجاد کردند. این فناوری به‌دلیل توانایی در بهبود نفوذپذیری سنگ مخزن آسیب‌دیده و کاهش تولید آب، به‌عنوان روشی کارآمد معرفی شد [۳۶]. (شکل ۲)، افزایش دبی تولید نفت خام (Qoil) و تغییر در پارامترهای چاه (نفوذپذیری سنگ و درصد آب تولیدی) را پس از تابش امواج فراصوت در بازه زمانی سه‌ساله نشان می‌دهد. با این حال، نبود داده‌های بلندمدت‌تر (بیش از سه سال) و عدم بررسی تأثیر امواج در مخازن عمیق‌تر، تعمیم نتایج را محدود می‌کند.



(الف) (ب)

شکل ۲: تأثیر تابش امواج فراصوت در بازده تولید نفت خام (الف) و در سایر پارامترهای تولید از چاه (ب)، برای چاه‌های سیبری غربی و ساماراء[۳۶]

آبراموف و همکاران از تجهیزات ویژه‌ای برای انجام یک آزمایش میدانی بر روی چاه‌های عمودی در دو منطقه از روسیه استفاده کردند. این تجهیزات شامل یک مولد امواج فراصوت ارتقاءیافته بود که به ابزار درون‌چاهی با محدوده فرکانس

عملیاتی ۱۵ تا ۳۰ کیلوهرتز و توان خروجی ۱۰ کیلووات متصل شده بود. تجهیزات درون‌چاهی که در شرایط دما و فشار بالا[1] کار می‌کردند (با دمایی تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و حداکثر فشار ۸۷۰۲ psi)، یک سیستم تزریق مواد شیمیایی (برای عملیات سونوشیمیایی) و یک پروب جهت اندازه‌گیری ویژگی‌های درون‌چاهی از جمله فشار و جریان بود. این آزمایش میدانی برای مقایسه بین دو روش تابش امواج فراصوت و سونوشیمیایی (ترکیب امواج فراصوت با تزریق مواد شیمیایی) طراحی شده بود. در فاصله سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۳، بیش از ۱۰۰ عملیات مرتبط با امواج فراصوت و سونوشیمیایی انجام شد. (جدول ۳) میزان تولید نفت خام قبل و بعد از تحریک چاه توسط روش‌های سونوشیمیایی و تابش امواج فراصوت را نشان می‌دهد [۴۳].

جدول ۳: تأثیر تحریک چاه توسط روش‌های سونوشیمیایی و تابش امواج فراصوت بر تولید نفت خام

منطقه	روش تحریک چاه	زمان تابش امواج (دقیقه)	تولید نفت (تن بر روز)		
			۳ ماه بعد از تابش	بعد از تابش	قبل از تابش
سیبری غربی	سونوشیمی	۳۰	۸/۴	۹/۱	۳/۹۲
	امواج فراصوت	۶۰	۷/۷	۸/۳۲	۳/۹۲
منطقه سامارا	سونوشیمی	۴۰	۱۵/۸	۱۹/۸	۸/۴
	امواج فراصوت	۶۰	۱۱/۵	۱۸/۶	۸/۴

طبق نتایج، پس از استفاده از روش سونوشیمیایی، تولید نفت بهبود یافت و اثر آن برای مدت طولانی‌تری پایدار ماند. این بهبود می‌تواند ناشی از تأثیر هم‌افزایی امواج فراصوت و مواد شیمیایی تزریق‌شده باشد. تابش امواج فراصوت به‌تنهایی به‌طور متوسط تولید نفت را حدود ۲۰۰ درصد افزایش داد، اما ترکیب امواج فراصوت با تزریق مواد شیمیایی افزایش تولید بیشتری (تا ۰/۴ تن در روز) با نصف زمان تابش امواج فراهم کرد که نشان‌دهنده کارایی بالاتر این روش است. با این حال، وابستگی بازده عملیات به ویژگی‌های مخزن (مثل نفوذپذیری سنگ و خواص سیال) و نبود داده‌های بلندمدت، تعمیم این یافته‌ها را به سایر میدان‌های نفتی محدود می‌کند.

آبراموف و همکاران آزمایش‌های میدانی در میدان نفتی تاتارستان انجام دادند تا اثر امواج فراصوت بر گرانروی سیال در شرایط مخزنی بررسی شود. در همین راستا، تابش ۲۴ ساعته با مولد فراصوت سطحی (توان ۹ کیلووات، فرکانس ۱۹ کیلوهرتز) انجام شد. ابزار درون‌چاهی مقابل نواحی مشبک‌کاری‌شده قرار گرفت و به حسگر دما مجهز بود. نتایج نشان داد که دبی تولید نفت خام، ۰/۴ تن در روز افزایش یافت و گرانروی نفت خام پس از ۴ ساعت تابش از ۱۸۳ میلی‌پاسکال‌ثانیه به ۱۵۴ میلی‌پاسکال‌ثانیه کاهش یافت. این نتایج به شرایط مخزن (مثل تراوایی سنگ و دما) وابسته بود [۴۴]

مطالعات میدانی نشان داده‌اند که رسوب آسفالتین، تحت تابش امواج فراصوت کاهش می‌یابد. این نتیجه به مکانیزم‌هایی مثل ارتعاش مکانیکی وابسته است. با این حال، کارایی این روش در مخازن عمیق یا با آسفالتین پیچیده‌تر هنوز به‌طور کامل بررسی نشده است. شباهتی بین اثرات زلزله و امواج فراصوت وجود دارد، زیرا هر دو ارتعاش مکانیکی ایجاد می‌کنند. اوتانی و همکاران در میدان نفتی ژاپن ارتباطی بین زلزله و کاهش مشکلات رسوب آسفالتین در میدان‌های نفتی پیشنهاد کردند. این میدان دچار رسوب شدید آسفالتین و کاهش فشار سیال تولیدی بود. پس از زلزله‌های با شدت بیش از ۳ ریشتر، تولید چاه‌ها افزایش یافت [۴۵]. این افزایش در تولید نفت خام به تحریک ارتعاشی ناشی از زلزله نسبت داده شد، اما نبود داده‌های کنترل‌شده، تحلیل دقیق این نتایج را دشوار می‌کند. این یافته‌ها کاربرد بالقوه امواج فراصوت برای رفع مشکلات آسفالتین را تقویت می‌کند. برای تأیید این مکانیسم، آزمایش‌های میدانی با امواج فراصوت در مناطق با رسوب شدید آسفالتین ضروری است.

آبراموف و همکاران استفاده از روش تابش امواج فراصوت را برای چاه‌های افقی با تولید آب شدید پیشنهاد کردند. این روش شامل شناسایی نواحی هدف با مطالعات ژئوفیزیکی، تحریک فراصوتی و تخلیه با پمپ جت بود. مدل‌سازی نشان داد که قرارگیری ابزار فراصوت نزدیک دیواره چاه، نفوذ امواج را افزایش می‌دهد. در آزمایش روی چاه افقی در سیبری

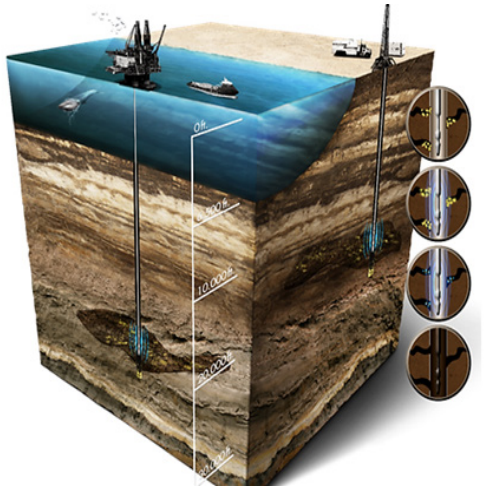
1. Mangling tendency

غـربی، تولید آب تا حدود ۲۰ درصد کاهش یافت و همچنین، تولیـد نفت خـام در نواحی با آب کـم ۹۱ درصد افزایش یافت [۴۶]. بـا ایـن حال، وابسـتگی نتایج به شکسـتگی‌های مخزن (ناهمگونی سنگ مخزن) و شرایط مخزن، نیاز به آزمایش‌های گسترده‌تر را نشان می‌دهد.

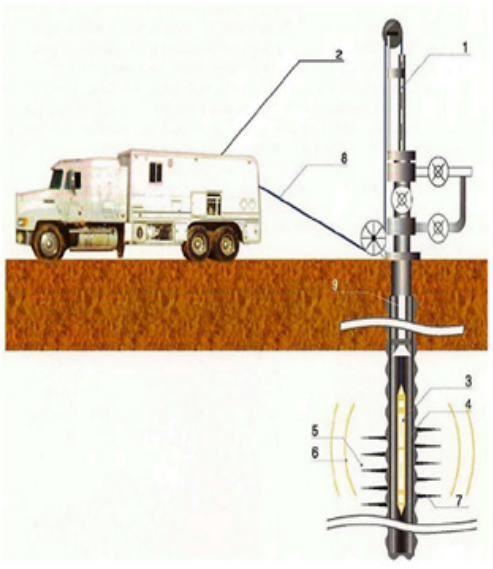
مولاکایـف و همـکاران، فنـاوری گرماصـوتی (ترکیـب امواج فراصـوت، ایجاد حـرارت و تزریق مواد شیمیـایی) را در ۱۴ چاه میـدان ساموتلورسـک و ۳ چاه منطقه سـامارا آزمایـش کردند. استفاده از این روش، دبی تولید نفت خام در میدان ساموتلورسک را از ۳/۹۹ به ۷ تن در روز و در منطقه سامارا از ۱۰ به ۲۰ تن در روز افزایش داد [۴۷]. این نتایج به شـرایط زمین‌شناسی منطقه وابسته بود و تعمیم آن‌ها نیازمند آزمایش در مخازن متنوع است.

در مطالعـه دیگری توسـط مولاکایف و همـکاران، فناوری فراصـوت برای بهبـود بازیافت نفت در سیبری غربی و سـامارا آزمایش شدند. میانگین افزایش دبی تولید نفت خام در سامارا ۲/۱۰ تـن در روز و در سیبـری غـربی ۴/۴ تـن در روز بود. در سـازند گرین ریـور (یوتا)، اسـتفاده از امواج فراصـوت بر روی ۳ چـاه، دبی تولیـد نفت خـام را ۴/۴۵ تـن در روز افزایش داد [۴۸]. نبـود داده‌های بلندمـدت و هزینه‌های عملیـاتی بالا، از محدودیت‌هـای ایـن روش مطـرح شـدند. همچنیـن تحریک فراصـوتی را در ۲۷ چاه میدان ساموتلورسـک آزمایش کردند. ایـن فنـاوری دبی تولید نفـت خـام را به‌طور میانگیـن ۴/۴ تا ۲/۱۰ تن در روز افزایش داد و به‌دلیل کاهش رسـوبات آلی در محیط متخلخل سنگ و بهبود تراوایی سنگ مخزن، مؤثر بود [۴۹]. در همین راستا، برای کاربردهای میدانی گسترده از این فناوری، آزمایش در مخازن عمیق یا کربناته ضروری است.

وانگ و همکاران توسعه فناوری امواج فراصوت برای بهبود بازیافت نفت در چین را بررسی کردند. این تحقیقات بر کاهش گرانروی نفت خام، امولسیون‌زدایی، حذف آسیب‌های مکانیکی (انسـداد یـا تخریـب سـازند) و رفـع رسـوبات آلی در مقیاس حفرات سنگ متمرکز بود [۵۰]. مطالعات میدانی نشان دادند که این فناوری بازده تولید نفت خام را در برخی مخازن تا ۴۰ درصـد افزایش داد، اما وابسـتگی نتایج بـه ویژگی‌های مخزن (مثل تراوایی سـنگ و خواص سیالات مخزن) و نبود داده‌های میدانی گسـترده، کاربرد آن را محدود می‌کند. برای پیشرفت ایـن فناوری، توسـعه تجهیـزات بهینـه و آزمایـش در مخازن متنـوع (مثـل مخـازن کربناته یا عمیق) و شناسـایی شـرایط بهینـه انجام عملیات ضروری اسـت. (شـکل ۳)، شـماتیکی از به‌کارگیـری فنـاوری امواج فراصـوت درون‌چاهی بـرای بهبود برداشـت نفت را نشان می‌دهد. در این سامانه، یک مولد امواج فراصوت در مقابل چاه مشـبک کاری شـده، نصب شده و برق را از طریـق میله‌ای به انتهای چاه منتقـل می‌کنند. این تابش امواج فراصوت منجر به تحریک مکانیکی سنگ مخزن، کاهش گرانروی نفت خام، از بین بردن انسـدادهای ناشی از رسـوبات آلی و درنتیجه بهبود نفوذپذیری سـنگ می‌شـود. (شـکل ۴)، شـماتیکی از تجهیزات مورد استفاده در انگیزش چاه‌های نفت با استفاده از امواج فراصوت را نمایش می‌دهد.



شکل ۳: شماتیکی از به‌کارگیری فناوری امواج فراصوت درون‌چاهی برای بهبود برداشت نفت



شکل ۴: شماتیکی از تجهیزات مورد استفاده در انگیزش چاه‌های نفت با استفاده از امواج فراصوت

1. Lubricator; 2. Well logging truck hoist; 3. Downhole tool; 4. Casing; 5. Oil formation; 6. Zone of acoustic stimulation; 7. Perforated zone; 8. Cable and 9. Tubing

مطالعـات میـدانی امـواج فراصـوت در بـازه فرکانـسی ۱۳ تـا ۳۰ کیلوهرتـز و توان ۱۰۰۰ تـا ۱۵۰۰ وات انجام شـده‌اند. تنـوع ویژگی‌هـای مخـزن، ماننـد تـراوایی و ناهمگنی سـنگ مخـزن، ایجـاب می‌کند کـه فرکانس و تـوان بهینه بـرای هر مخزن به‌صورت جداگانه تعیین شـود، اما ایـن فرآیند به‌دلیل هزینه‌هـای بـالا و پیچیدگی‌های آزمایشـگاهی اغلب با چالش همراه است.

امـواج فراصوت در برخی موارد تولید نفـت را تا ۳۵ درصد افزایـش داده و آب تولیدی را کاهش داده‌اند. با این حال، نفوذ ایـن امـواج به‌دلیل طـول موج کوتـاه (حداکثـر ۰/۵ فوت) در مخازن عمیق یا با تراوایی کم، ناکافی است. علاوه بر این، نبود داده‌هـای بلندمدت دربـاره پایداری این بهبـود در بازده تولید نفت خـام، قابلیت اطمینان فنـاوری را در مقیاس صنعتی زیر سـؤال می‌برد. بـرای مثال، در مخـازن ناهمگـن، امواج ممکن اسـت تنها به نـواحی نزدیک چاه اثر کننـد و بخش‌های دورتر دست‌نخورده باقی بمانند.

روش سـونوشیمی با بهبود نفـوذ مواد شیمیـایی به منافذ کوچـک، کارایی تزریـق شیمیـایی را افزایـش داده و مصـرف مـواد را کاهـش داده اسـت؛ امـا هزینه‌های بـالای تجهیزات و نبـود آزمایش‌هـای میـدانی در مخـازن متنوع (مثـل مخازن عمیـق یـا کربناتـه) مانـع از کاربرد گسـترده این روش شـده است. همچنین، اثرات سونوشیمی در شرایط فشار و دمای بالا ممکن است با نتایج آزمایشگاهی متفاوت باشد که این شکاف تحقیقاتی هنوز بررسی نشده است.

برای غلبه بر این چالش‌ها، لازم اسـت آزمایش‌های میدانی در شـرایط واقعی مخزن، با تأکید بر نفوذ عمیق‌تر امواج، انجام شـود. طراحی ابزارهای فراصوت با هزینه کمتر و کارایی بالاتر، همراه با مدل‌سـازی عـددی برای پیش‌بینی اثـرات در مخازن ناهمگن، می‌تواند فناوری را کاربردی‌تر کند.

۴. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

مطالعـات آزمایشـگاهی و میـدانی پتانسیـل بـالای امواج فراصـوت را بـرای بهبـود بازیافـت نفـت نشـان داده‌انـد. در آزمایشـگاه، فرکانس‌هـای ۲۰ تـا ۱۲۵ کیلوهرتـز و توان‌های ۴۰ تـا ۴۰۰۰ وات، از طریق مکانیزم‌هـایی مانند حفره‌زایی و کاهش گرانروی نفت خام، نفوذ سیال در محیط‌های متخلخل را افزایـش داده‌اند. در مطالعات میـدانی با فرکانس ۱۳ تا ۳۰ کیلوهرتـز و تـوان ۱۰۰۰ تـا ۱۵۰۰ وات، کارایی ایـن فناوری در مخـازن خاص تأیید شـده و تولید نفت در بـرخی موارد تا ۳۵ درصـد افزایـش یافتـه و آب تولیدی کاهش یافته اسـت. روش سـونوشیمی نیز بـا بهبود نفوذ مواد شیمیـایی به منافذ کم‌تـراوا، اثربخـشی تزریق شیمیـایی را بهبـود داده و مصرف مواد را کاهش داده است.

بـا این حـال، محدودیت‌هـای کلیدی کاربرد ایـن فناوری را در مقیـاس صنعتی چالش‌برانگیز کرده اسـت. نفوذ محدود امـواج فراصوت (حداکثر ۰/۵ فوت) کارایی آن‌ها را در مخازن عمیـق یـا ناهمگن کاهـش می‌دهـد. در همیـن راسـتا، نبود داده‌های بلندمـدت درباره پایداری نتایج، اطمینان به فناوری را کـم می‌کنـد. هزینه‌های بـالای تجهیزات، به‌ویـژه در روش سـونوشیمی و وابسـتگی نتایـج بـه ویژگی‌های مخـزن (مثل تراوایی سـنگ مخزن و خواص سیالات مخزن) از موانع اصلی هسـتند. همچنیـن، کمبـود آزمایش‌های میـدانی در مخازن پیچیـده (مثـل کربناتـه یا عمیـق) و ناشـناخته بـودن اثرات سونوشیمی در شرایط فشار و دمای بالا، شکاف‌های تحقیقاتی مهمی را نشان می‌دهد.

برای رفـع محدودیت‌هـای امواج فراصوت و سـونوشیمی، آزمایش‌هـای میـدانی در شـرایط واقـعی مخزن، بـا تأکید بر نفـوذ عمیق‌تـر امواج و کاهـش هزینه‌های عملیـاتی، ضروری اسـت. طراحی ابزارهای فراصـوت کارآمدتـر و ارزان‌تر، همراه بـا توسـعه مدل‌های عددی پیشـرفته بـرای پیش‌بیـنی رفتار امـواج در مخازن ناهمگـن، می‌تواند این فنـاوری را به مرحله عملیاتی نزدیک‌تر کند. امواج فراصوت و سونوشیمی به‌عنوان مکمل روش‌های موجود ازدیاد برداشـت نفت پتانسیل بالایی دارند، اما بدون این اقدامات، کاربرد صنعتی آن‌ها ممکن است پرهزینه و غیر بهینه باقی بماند.

مراجع:

[1]. Hamidi, H., Rafati, R., Junin, R. B., & 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.

[2]. Hays, J., Finkel, M. L., Depledge, M., Law, A., & Shonkoff, S. B. (2015). Considerations for the development of shale gas in the United Kingdom. Science of The Total Environment, 512, 36-42.

chemical agent for enhanced oil recovery. Ultrasonics Sonochemistry, 42, 754-758.

[11]. Wang, Z., Xu, Y., & Gu, Y. (2015). Lithium niobate ultrasonic transducer design for Enhanced Oil Recovery. Ultrasonics Sonochemistry, 27, 171-177.

[12]. Mullakaev, M. S., Volkova, G. I., & Gradov, O. M. (2015). Effect of ultrasound on the viscosity-temperature properties of crude oils of various compositions. Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 49, 287-296.

[13]. Rahimi, M. A., Ramazani SA, A., Alijani Alijanvand, H., Ghazanfari, M. H., & Ghanavati, M. (2017). Effect of ultrasonic irradiation treatment on rheological behaviour of extra heavy crude oil: A solution method for transportation improvement. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 95(1), 83-91.

[14]. Aliev, F., Mukhamatdinov, I., & Kemalov, A. (2017). The influences of ultrasound waves on rheological and physico-chemical properties of extra heavy oil from Ashalcha field. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 941-948.

[15]. Naderi, K., & Babadagli, T. (2011). Visual analysis of immiscible displacement processes in porous media under ultrasound effect. Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 83(5), 056323.

[16]. Naderi, K., & Babadagli, T. (2010). Influence of intensity and frequency of ultrasonic waves on capillary interaction and oil recovery from different rock types. Ultrasonics sonochemistry, 17(3), 500-508.

[3]. Werner, A. K., Vink, S., Watt, K., & Jagals, P. (2015). Environmental health impacts of unconventional natural gas development: a review of the current strength of evidence. Science of the Total Environment, 505, 1127-1141.

[4]. Mullakaev, M. S., Abramov, V. O., & Abramova, A. V. (2017). Ultrasonic automated oil well complex and technology for enhancing marginal well productivity and heavy oil recovery. Journal of petroleum science and engineering, 159, 1-7.

[5]. Agi, A., Junin, R., Shirazi, R., Afeez, G., & Yekeen, N. (2019). Comparative study of ultrasound assisted water and surfactant flooding. Journal of King Saud University-Engineering Sciences, 31(3), 296-303.

[6]. Agi, A., Junin, R., & Chong, A. S. (2018). Intermittent ultrasonic wave to improve oil recovery. Journal of Petroleum Science and Engineering, 166, 577-591.

[7]. Ghamartale, A., Escrochi, M., Riazi, M., & Faghih, A. (2019). Experimental investigation of ultrasonic treatment effectiveness on pore structure. Ultrasonics sonochemistry, 51, 305-314.

[8]. Dehshibi, R. R., Mohebbi, A., Riazi, M., & Danafar, F. (2019). Visualization study of the effects of oil type and model geometry on oil recovery under ultrasonic irradiation in a glass micro-model. Fuel, 239, 709-716.

[9]. He, S., Tan, X., Hu, X., & Gao, Y. (2019). Effect of ultrasound on oil recovery from crude oil containing sludge. Environmental Technology, 40(11), 1401-1407.

[10]. Wang, Z., & Huang, J. (2018). Research on removing reservoir core water sensitivity using the method of ultrasound-

CO2 flooding to improve oil recovery. Ultrasonics sonochemistry, 35, 243-250.

[24]. Mohsin, M., & Meribout, M. (2015). An extended model for ultrasonic-based enhanced oil recovery with experimental validation. Ultrasonics sonochemistry, 23, 413-423.

[25]. Pu, C., Shi, D., Zhao, S., Xu, H., & Shen, H. N. (2011). Technology of removing near wellbore inorganic scale damage by high power ultrasonic treatment. Petroleum Exploration and Development, 38(2), 243-248.

[26]. Taheri-Shakib, J., Naderi, H., Salimidelshad, Y., Teymouri, A., & Shekarifard, A. (2018). Using ultrasonic as a new approach for elimination of inorganic scales (NaCl): an experimental study. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 8, 553-564.

[27]. Taheri-Shakib, J., Naderi, H., Salimidelshad, Y., Kazemzadeh, E., & Shekarifard, A. (2018). Application of ultrasonic as a novel technology for removal of inorganic scales (KCl) in hydrocarbon reservoirs: An experimental approach. Ultrasonics sonochemistry, 40, 249-259.

[28]. Kunanz, H., & Wölfel, S. (2014, May). Scale removal with ultrasonic waves. In SPE International Oilfield Scale Conference and Exhibition (p. D022S012R004). SPE.

[29]. Wang, Z., Zeng, J., Song, H., & Li, F. (2017). Research on ultrasonic excitation for the removal of drilling fluid plug, paraffin deposition plug, polymer plug and inorganic scale plug for near-well ultrasonic processing technology.

[17]. Mousavi, S. M., Ramazani, A., Najafi, I., & Davachi, S. M. (2012). Effect of ultrasonic irradiation on rheological properties of asphaltenic crude oils. Petroleum science, 9, 82-88.

[18]. Mohammadian, E., Junin, R., Rahmani, O., & Idris, A. K. (2013). Effects of sonication radiation on oil recovery by ultrasonic waves stimulated water-flooding. Ultrasonics, 53(2), 607-614.

[19]. Hamidi, H., Mohammadian, E., Junin, R., Rafati, R., Manan, M., Azdarpour, A., & Junid, M. (2014). A technique for evaluating the oil/heavy-oil viscosity changes under ultrasound in a simulated porous medium. Ultrasonics, 54(2), 655-662.

[20]. Alhomadhi, E., Amro, M., & Almobarky, M. (2014). Experimental application of ultrasound waves to improved oil recovery during waterflooding. Journal of King Saud University-Engineering Sciences, 26(1), 103-110.

[21]. Hamidi, H., Mohammadian, E., Asadullah, M., Azdarpour, A., & Rafati, R. (2015). Effect of ultrasound radiation duration on emulsification and demulsification of paraffin oil and surfactant solution/brine using Hele-shaw models. Ultrasonics sonochemistry, 26, 428-436.

[22]. Hamidi, H., Mohammadian, E., Rafati, R., Azdarpour, A., & Ing, J. (2015). The effect of ultrasonic waves on the phase behavior of a surfactant–brine–oil system. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 482, 27-33.

[23]. Hamidi, H., Haddad, A. S., Mohammadian, E., Rafati, R., Azdarpour, A., Ghahri, P., ... & Zink, A. (2017). Ultrasound-assisted

Dmitriy Pashin. “Ultrasonic technology for enhanced oil recovery.” Engineering 2014 (2014).

[37]. Razavifar, M., Yunusov, T., Mukhametdinova, A., Bakulin, D., Qajar, J., Cheremisin, A., & Riazi, M. (2025). Improving oil recovery with ultrasound: mitigating asphaltene-induced formation damage. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 15(4), 78.

[38]. Zhang, X., Zang, C., Ma, H., & Wang, Z. (2020). Study on removing calcium carbonate plug from near wellbore by high-power ultrasonic treatment. Ultrasonics Sonochemistry, 62, 104515.

[39]. Mo, L., Sun, W., Jiang, S., Zhao, X., Ma, H., Liu, B., & Feng, L. (2020). Removal of colloidal precipitation plugging with high-power ultrasound. Ultrasonics Sonochemistry, 69, 105259.

[40]. Khan, N., Pu, J., Pu, C., Li, X., Zhang, L., Gu, X., & Zheng, H. (2017). Comparison of acidizing and ultrasonic waves, and their synergetic effect for the mitigation of inorganic plugs. Energy & Fuels, 31(10), 11134-11145.

[41]. Xu, H., & Pu, C. (2013). Removal of near-wellbore formation damage by ultrasonic stimulation. Petroleum science and technology, 31(6), 563-571.

[42]. Wong, S. W., van der Bas, F., Zuiderwijk, P., Birchak, B., Han, W., Yoo, K., & van Batenburg, D. (2004). High-power/high-frequency acoustic stimulation: a novel and effective wellbore stimulation technology. SPE Production & Facilities, 19(04), 183-188.

[43]. Abramov, V. O., Abramova, A. V., Bayazitov, V. M., Altunina, L. K., Gerasin, Ultrasonics sonochemistry, 36, 162-167.

[30]. Xu, H., & Pu, C. (2013). Removal of near-wellbore formation damage by ultrasonic stimulation. Petroleum science and technology, 31(6), 563-571.

[31]. Salehzadeh, M., Akherati, A., Ameli, F., & Dabir, B. (2016). Experimental study of ultrasonic radiation on growth kinetic of asphaltene aggregation and deposition. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 94(11), 2202-2209.

[32]. Dehshibi, R. R., Mohebbi, A., Riazi, M., & Niakousari, M. (2018). Experimental investigation on the effect of ultrasonic waves on reducing asphaltene deposition and improving oil recovery under temperature control. Ultrasonics Sonochemistry, 45, 204-212.

[33]. Khan, N., Pu, C., Li, X., He, Y., Zhang, L., & Jing, C. (2017). Permeability recovery of damaged water sensitive core using ultrasonic waves. Ultrasonics Sonochemistry, 38, 381-389.

[34]. Guo, X., Du, Z., & Li, Z. (2010, June). Computer modeling and simulation of high frequency vibration recovery enhancement technology in low-permeability reservoirs. In SPE Trinidad and Tobago Section Energy Resources Conference (pp. SPE-132866). SPE.

[35]. Abramov, V. O., Mullakaev, M. S., Abramova, A. V., Esipov, I. B., & Mason, T. J. (2013). Ultrasonic technology for enhanced oil recovery from failing oil wells and the equipment for its implemention. Ultrasonics sonochemistry, 20(5), 1289-1295.

[36]. Abramova, Anna, Vladimir Abramov, Vadim Bayazitov, Artyom Gerasin, and

A. S., Pashin, D. M., & Mason, T. J. (2015). Sonochemical approaches to enhanced oil recovery. Ultrasonics sonochemistry, 25, 76-81.

[44]. Abramov, V. O., Abramova, A. V., Bayazitov, V. M., Mullakaev, M. S., Marnosov, A. V., & Ildiyakov, A. V. (2017). Acoustic and sonochemical methods for altering the viscosity of oil during recovery and pipeline transportation. Ultrasonics sonochemistry, 35, 389-396.

[45]. Uetani, T., Matsuoka, T., & Honda, H. (2014, February). Removal of Plugged Asphaltene in a Reservoir by Earthquakes. In SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control (p. D011S004R006). SPE.

[46]. Abramov, V. O., Abramova, A. V., Bayazitov, V. M., Marnosov, A. V., Kuleshov, S. P., & Gerasin, A. S. (2016). Selective ultrasonic treatment of perforation zones in horizontal oil wells for water cut reduction. Applied Acoustics, 103, 214-220.

[47]. Mullakaev, M. S., Abramov, V. O., & Prachkin, V. G. (2015). Development of a combined technology and ultrasonic scheme for stimulation of oil recovery. Chemical and Petroleum Engineering, 51, 237-242.

[48]. Mullakaev, M. S., Abramov, V. O., & Abramova, A. V. (2015). Development of ultrasonic equipment and technology for well stimulation and enhanced oil recovery. Journal of petroleum science and engineering, 125, 201-208.

[49]. Mullakaev, M. S., Abramov, V. O., & Abramova, A. V. (2017). Ultrasonic piezoceramic module and technology for stimulating low-productivity wells. Journal of Petroleum Science and Engineering, 158, 529-534.

[50]. Wang, Z., Xu, Y., & Suman, B. (2015). Research status and development trend of ultrasonic oil production technique in China. Ultrasonics Sonochemistry, 26, 1-8.

IRANIAN JOURNAL OF GAS ENGINEERING

Volume 12 / Issue 3 / NO. 23 / Autumn 2025 / Pages 10-24

Journal Homepage: www.ijge.irangi.org

Ultrasonic Technology: A Novel Approach to Monitoring, Production and Optimization of Oil and Fields

Paniz Nakhaei[1], Mahdi Razavifar[2*]

1. M.Sc. Student, Faculty of Chemical and Petroleum Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
2. Assistant Professor, Faculty of Chemical and Petroleum Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

REVIEW ARTICLE

Article History:
Received: 19 April 2025
Revised: 21 May 2025
Accepted: 07 June 2025

Keywords:
Ultrasonic waves
Enhanced oil recovery
Formation damage
Viscosity reduction Asphaltene deposition

ABSTRACT

Ultrasound-based technologies, as cost-effective and environmentally friendly methods, play a significant role in enhancing oil recovery from hydrocarbon reservoirs. By utilizing high-power ultrasonic waves, this technology reduces formation damage near the wellbore and removes obstacles to oil flow toward production wells. In this context, according to existing field reports, the application of ultrasound as a well stimulation method in Russian and American oil wells has led to a 30% improvement in oil production efficiency. This paper provides a comprehensive review of laboratory studies, field applications, and modeling related to the use of ultrasonic waves in oil recovery enhancement. Furthermore, by analyzing existing research, it identifies critical research gaps and proposes optimizing operational parameters (such as frequency and power) and developing accurate predictive models as key factors for improving productivity. This study emphasizes the necessity of adopting ultrasonic technology in oil wells to boost recovery rates and highlights its environmental and economic benefits. The findings presented in this research will have practical applications in reservoir management and production optimization in oil fields.

DOR: 20.1001.1.2504.1094.1404.01.30

How to cite this article
P. Nakhaei, M.razavifar, Ultrasonic Technology: A Novel Approach to Monitoring, Production and Optimization of Oil and Fields. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2025; 12(3): 10-24. (https://ijge.irangi.org/article_735121.html)

* Corresponding Author.
E-mail address: m.razavifar@tabrizu.ac.ir, (M.razavifar).

Available online 21 December 2025
25885-5251/© 2014 The Authors. Published by Iranian Gas Institute.
This is an open access article under the CC BY license. (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0)