

کاربرد امواج الکترومغناطیسی و تأثیر آن بر برهم کنش های «سنگ-سیال» و «سیال-سیال» در فرایند ازدیاد برداشت نفت

حمزه شمسی ارمندی، آرزو جعفری^۱، رضا غریب شاهی، محمدرضا امیدخواه نسرین^۲، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

چکیده

تولید از مخازن نفت غیرمتعارف مانند: نفت سنگین، شیل ها و ماسه های نفتی مشکلات فراوانی دارد و استفاده از روش های حرارتی، جزء جدایی ناپذیر در تولید این مخازن محسوب می شود. باین حال این روش ها مشکلاتی هم چون تأمین سوخت، محدودیت عمق سازند، روش های اجرایی، تجهیزات و امکانات زیرزمینی و روزمینی و محدودیت های اقتصادی را به همراه دارد؛ لذا نیاز به فناوری های جدیدتر با کارایی بالاتر، بیش از پیش احساس می شود. امروزه امواج الکترومغناطیسی کارایی خود را در حوزه های مختلفی ثابت کرده و توجه متخصصان صنعت نفت را نیز به خود جلب کرده است. پژوهش های متعددی در حوزه تأثیر امواج الکترومغناطیسی در فرکانس های «رادئویی» و «ماکروویو» بر خصوصیات نفت و تولید از مخازن، در مقیاس آزمایشگاهی و میدانی انجام شده است. در این مطالعه ابتدا سازوکار حاکم بر گرمایش الکترومغناطیسی، توزیع دما در محیط متخلخل و تغییر تراوایی نسبی سیالات و کشش سطحی آن ها بررسی شد و سپس تأثیر این امواج بر خصوصیات فیزیکی نفت مانند: گرانروی و خصوصیات شیمیایی آن شامل ارتقای درجای نفت و در نهایت برهم کنش «سنگ-سیال» و «سیال-سیال» مورد مطالعه قرار گرفت.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۸/۰۵/۲۱

تاریخ ارسال به داور: ۹۸/۰۵/۲۷

تاریخ پذیرش داور: ۹۸/۰۸/۰۸

واژگان کلیدی:

امواج الکترومغناطیسی، ماکروویو، ارتقای درجا، برهم کنش «سنگ-سیال»، برهم کنش «سیال-سیال».

مقدمه

روش به دلیل افزایش کیفیت، افزایش تولید، کاهش هزینه ها و بازاریابی راحت تر آن، بر دیگر روش های برداشت برتری یافته است. یکی از روش های نوین ارتقا درجا نفت، استفاده از امواج الکترومغناطیسی است که اولین بار توسط «ریچی» [۱] در سال ۱۹۵۶ به صورت اختراع ثبت شده است. با گسترش روزافزون کاربرد «امواج ماکروویو»، متخصصان صنعت نفت به استفاده از این فناوری در حوزه های مختلف صنعت از قبیل «ازدیاد برداشت نفت»^۲ روی آوردند. این فناوری، ابتدا در بازرسی «لوله مغزی سیار»^۳ و خطوط لوله، اندازه گیری جریان چند فازی و نیز برای افزایش تحرک «نفت آسفالتینی» مورد استفاده قرار می گرفت. امواج الکترومغناطیسی می توانند بسته به خواص الکتریکی مواد، «جذب»، «بازتاب» یا «عبور» داده شوند. این امواج می توانند عکس العمل دی الکتریک مواد را تحت تأثیر قرار داده و اتم ها را «قطبیده» کنند که در نهایت منجر به تولید گرما می شود. امواج ماکروویو تنها به انتقال یا هدایت حرارت بسنده نمی کنند؛ بلکه مواد را از طریق جابجایی دوار مولکول های آن، گرم می کنند. میزان گرمای تولید شده در ماده ی مورد نظر به ضریب جذب امواج الکترومغناطیسی آن ماده بستگی دارد. هر چه ضریب جذب مواد بیشتر باشد آن ماده گرم تر می شود. هم چنین قابلیت انتقال انرژی امواج به ترکیبات مولکولی محیط بستگی دارد. اگر محیط شامل مولکول های متحرک دوقطبی مانند: آب و آسفالتین باشد،

نیاز به انرژی به علت پیشرفت فناوری و صنعت و رشد جمعیت باگذشت زمان رو به افزایش بوده و هم چنان سوخت های فسیلی از منابع اصلی تأمین انرژی در جهان محسوب می شوند. از طرفی میزان ذخیره ی منابع نفت سبک رو به کاهش است؛ بنابراین در سال های اخیر بر اساس روند رو به رشد تقاضای انرژی و سوخت، تولید از مخازن نفتی غیرمتعارف، شامل نفت سنگین و فوق سنگین، «بیتومن»، ماسه و شیل های نفتی افزایش یافته است. تحرک بسیار پایین مخازن نفتی غیرمتعارف باعث کاهش بازدهی تولید و افزایش هزینه های انتقال و پالایش شده است که در صورت عدم انتخاب فناوری و ابزار مناسب می تواند از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نباشد. یکی از روش های نوین برای تولید از این نوع مخازن، ارتقای نفت و سبک سازی آن در مخزن است؛ به این صورت که نفت موجود در مخزن را به روش های مختلف سبک کرده تا گرانروی آن کاهش و تحرک آن افزایش یابد، هم چنین با شکستن پیوندهای سنگین و تبدیل آن ها به ترکیب های سبک تر و جداسازی «هیدروژن سولفید»، کیفیت نفت افزایش یافته و بازار فروش مناسب تری پیدا نماید؛ از طرفی دیگر، هزینه های پالایش این نوع نفت و آلودگی زیست محیطی آن کاهش خواهد یافت. ارتقای «درجای نفت خام» عمدتاً توسط روش های حرارتی شامل تزریق بخار، «احتراق درجا»^۱، تزریق آب داغ، روش های الکتریکی و فرکانس های رادیویی انجام می شود. این

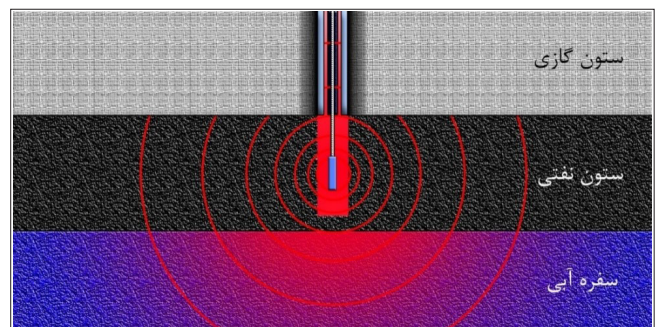
* نویسندگان عهده دار مکاتبات (omidkhan@modares.ac.ir؛ ajafari@modares.ac.ir)

امواج عبوری، نیروی گشتاوری بر مولکول‌ها اعمال می‌کنند [۲] که این گشتاور باعث جهت‌گیری مولکول‌ها در راستای میدان الکتریکی ناشی از امواج الکترومغناطیسی می‌شود. از آنجا که میدان الکتریکی حاصل از این امواج از نوسان‌های زیادی برخوردارند، مولکول‌ها دائماً در حال تغییر جهت هستند. این جهت‌گیری‌ها و جنبش‌ها باعث برخورد و ساییش دو مولکول کناره‌هم شده و در نتیجه منجر به تولید گرمای اصطکاکی می‌شود. میزان گرمای تولیدشده به میزان جذب امواج توسط محیط بستگی دارد. مانند روش «گرمایش مقاومتی»^۴ که به وجود آب (ترکیب دوقطبی) وابسته است، روش «گرمایش الکترومغناطیسی»^۵ نیز از آب موجود در مخازن استفاده کرده و آن را تبدیل به بخار می‌کند و باعث ایجاد ناحیه خشک و افزایش فشار در نواحی اطراف چاه می‌شود که این عمل می‌تواند دما را به ۳۰۰-۴۰۰ درجه سانتی‌گراد برساند. می‌توان با فرستادن آنتن گسیل‌کننده‌ی امواج الکترومغناطیسی به درون چاه (شکل-۱) و یا هدایت این امواج

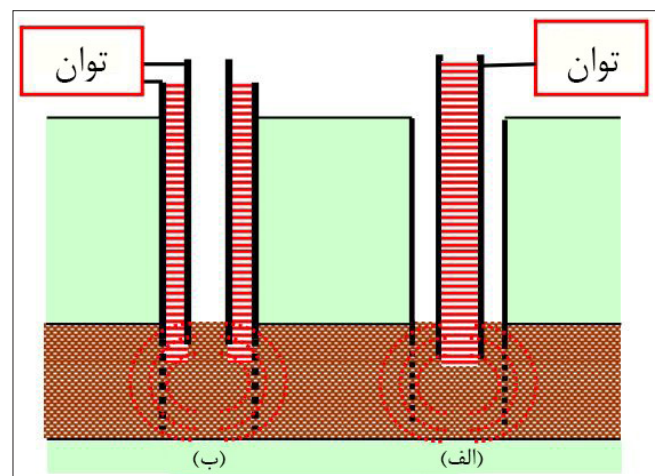
از سطح به درون مخزن از طریق لوله‌های جداری (شکل-۲)، این امواج را در مخزن منتشر کرد. در روش اول که در شکل-۱ نشان داده شده است، آنتن تولیدکننده امواج الکترومغناطیسی توسط سیم حامل جریان الکتریکی به درون چاه هدایت شده و با گسیل امواج به درون مخزن، محیط متخلخل (شامل سنگ و سیال) را گرم می‌کند. از معایب این روش می‌توان به خوردگی آنتن توسط سیالات درون چاه و هزینه‌ی بالای ساخت یا خرید آن‌ها اشاره کرد. برای عبور از این موانع، در روش دوم که در شکل-۲ نشان داده شده است، منبع گسیل‌کننده امواج در سطح قرار داده می‌شود و امواج از طریق «تابش» و «بازتابش» به کمک «لوله‌ی جداری»^۶ به درون لایه‌ی مخزن هدایت می‌شوند. لازم به ذکر است که لوله‌ی جداری به مقدار بسیار کم امواج را جذب کرده و انرژی باقی‌مانده را بازتاب می‌دهد؛ جذب کم این امواج ناشی از «جریان‌های گردابه‌ای»^۷ است که بر اثر حرکت میدان یا وجود میدان مغناطیسی متغیر درون مواد رسانا ایجاد شده و در اثر اعمال میدان مغناطیسی مخالف آن، اثر میدان صفر می‌شود [۳]؛ لذا مشکل اصلی در این روش نیز کاهش انرژی امواج از سطح تا عمق مورد نظر است.

با انتشار این امواج در مخزن، نفت گرم شده، گرانی‌تر می‌شود و با کاهش یافته و در نهایت تحرک آن افزایش می‌یابد. با افزایش فشار ناشی از گرم شدن آب اطراف چاه تزریقی، نفت به سمت چاه تولیدی حرکت کرده و میزان تولید نفت بهبود می‌یابد. از دیگر اثرات تابش الکترومغناطیسی، تغییر تنش‌های بین سیالات درون مخزن و نیز تغییر خصوصیات سطحی سنگ است. لذا استفاده از تابش امواج الکترومغناطیسی می‌تواند کاربرد وسیعی در برداشت از مخازن نفت سنگین و فوق سنگین داشته باشد.

از طرفی تولید نفت از مخازن نفت سبک کشور رو به پایان بوده و به ناچار در سال‌های اخیر به تولید از مخازن نفت سنگین و فوق سنگین روی آورده شده است. لذا باید از روش‌های نوین تولید برای افزایش تولید و بهبود کیفیت نفت این‌گونه مخازن بهره برد تا علاوه بر کاهش هزینه‌های پالایشگاهی، میزان صرفه و توجیه اقتصادی تولید از این‌گونه مخازن را نیز افزایش داد. با توجه به پتانسیل بالا و گسترش روزافزون کاربرد امواج الکترومغناطیسی به‌منظور استفاده در فرایندهای ازدیاد برداشت نفت و بهبود درجای کیفیت نفت خام، بسیاری از جوانب و مسائل این فرایند هنوز کاملاً روشن نبوده و یک مطالعه مروری جامع و دقیق بر روی پژوهش‌های مرتبط انجام شده تاکنون صورت نگرفته است. لذا، در این مطالعه سعی شده است تا ابتدا



شکل ۱ | انتشار امواج الکترومغناطیسی به درون مخزن از طریق آنتن فرستاده‌شده به درون چاه.



شکل ۲ | نمایش انتقال امواج الکترومغناطیسی به سمت لایه نفتی (الف) ارسال امواج از طریق لوله درون چاه. (ب) ارسال امواج از طریق فضای حلقوی بین لوله داخلی و لوله‌ی جداری [۴].

مروری کامل و نگاهی کاربردی بر پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه‌ی اثرات امواج الکترومغناطیس بر برهم‌کنش‌های سنگ-سیال و سیال-سیال و هم‌چنین بررسی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن‌ها برای اولین بار صورت گیرد و در نهایت به چالش‌های موجود در این حوزه و افق پیش روی محققین و متخصصین صنعت نفت برای استفاده از این روش در مقیاس‌های میدانی پرداخته شود.

۱- ساز و کار گرمایش الکترومغناطیسی

مولکول‌های قطبی با قرار گرفتن تحت یک میدان الکتریکی نوسان کننده (به دلیل وجود امواج الکترومغناطیسی)، شروع به هم سوشدن در جهت میدان کرده و به دلیل نوسان میدان، «ممان دوقطبی الکتریکی»^۵ به وجود می‌آید [۵]. این امر باعث افزایش انرژی جنبشی مولکول‌ها و ایجاد اصطکاک بین آن‌ها و در نتیجه تولید گرما و افزایش دما می‌شود. این افزایش دما باعث شکستن پیوندهای هیدروکربنی و پیوند مجدد آن‌ها می‌شود. بر اساس نوع مولکول‌های موجود در محیط، امواج الکترومغناطیسی می‌توانند به سه صورت در محیط منتشر شوند. این امواج می‌توانند توسط مولکول‌های قطبی مانند: آب، آسفالتین، الکل، نانوذرات مغناطیسی مانند اکسید آهن (Fe_3O_4)، مواد دی‌الکتریک مانند تیتانیوم، جذب و یا توسط فلزات بازتاب و یا عبور داده شوند [۲]؛ بسته به نوع نفت، میزان جذب امواج نیز متفاوت است. با افزایش قطبیت نفت میزان جذب امواج و در نتیجه تولید گرما و افزایش دما نیز بیشتر می‌شود. انرژی امواج الکترومغناطیسی با ضریب متفاوتی به گرما تبدیل می‌شود؛ زیرا درون نفت، اجزاء مختلف با ضریب جذب‌های مختلفی وجود دارد. بنابراین، توزیع دما در سیستم سنگ و سیال یکنواخت نبوده و باعث به وجود آمدن «نقاط گرم»^۶ در مخزن می‌شود. گرمای تولیدشده در این نقاط گرم به وسیله‌ی روش‌های «همرفتی و هدایت»^۱ به دیگر نقاط سیستم انتقال داده می‌شود [۴]. به‌طور کلی تغییرات گرانشی مایعات با دما، از رابطه‌ی خطی پیروی می‌کند، به‌طوری‌که با افزایش دمای محیط، گرانشی مایعات به‌واسطه‌ی تورم و افزایش حجم کاهش یافته و گرانشی گازها بسته به فشار محیط ممکن است کاهش و یا افزایش داشته باشد.

با تابش امواج الکترومغناطیسی و افزایش دمای محیط، انرژی تولیدشده جذب مولکول‌ها شده و با گذر از انرژی پیوندی باعث شکستن پیوندهای هیدروکربنی می‌شود، که فرایندهایی مانند: «کراکینگ»، «سولفورزدایی»^{۱۱}، «فلززدایی»^{۱۲} و ... اتفاق می‌افتد. در فرایند کراکینگ، مولکول‌های سنگین نفت خام مانند: «رزین»

و «آسفالتین» به مولکول‌های سبک‌تر شکسته می‌شوند، دمای بالا و شکستن مولکول‌های آسفالتین و رزین، سبب پایداری و حلالیت بیشتر این مولکول‌ها در نفت شده و با افزایش «نقطه تشکیل»^{۱۳} آسفالتین، تشکیل این رسوب را به تأخیر می‌اندازد [۶]؛ هم‌چنین با سبک شدن نفت سنگین، کشش بین سطحی نفت و آب کاهش می‌یابد که به تبع آن تراوایی نسبی نفت افزایش می‌یابد.

کشش بین سطحی دو سیال به چگالی سیال تر و غیر تر، قطر و ارتفاع حفره و زاویه تماس بین سیال تر و سنگ مخزن بستگی دارد؛

$$\sigma = \frac{rh(\rho_w - \rho_{nw})g}{2\cos\theta} \quad \text{معادله-۱}$$

که در آن r قطر حفره، ρ_w چگالی «سیال تر»^{۱۴} (فازی که بر روی سطح سنگ پخش می‌شود)، ρ_{nw} چگالی «سیال غیر تر»^{۱۵} (فازی که بر روی سطح سنگ پخش نمی‌شود) و θ زاویه تماس بین سنگ و سیال تر است. با کاهش چگالی سیال تر یا کاهش زاویه تماس فاز تر با سنگ، میزان کشش بین سطحی دو سیال کاهش می‌یابد. با توجه به تحقیقات انجام‌شده، امواج الکترومغناطیسی می‌توانند بر «ترشوندگی» سنگ مخزن تأثیر داشته باشند و با جدا کردن عناصر یا المان‌های کربن، سولفور، نیتروژن و اکسیژن از سطح سنگ و تغییر بارهای سطحی آن، «نفت‌دوستی» سنگ را به حالت خنثی تا آب‌دوست تغییر دهند؛ از طرفی همان‌طور که ذکر شد امواج الکترومغناطیسی می‌توانند باعث شکستن مولکول‌های بزرگ نفت سنگین شده و در نتیجه میزان گرانشی و چگالی نفت (سیال تر) کاهش می‌یابد. بنابراین با کاهش چگالی فاز تر و نیز کاهش زاویه‌ی تماس آن با سنگ، میزان کشش بین سطحی آب و نفت کاهش می‌یابد؛ در حالی‌که با افزایش دمای محیط میزان کشش سطحی بین دو سیال کاهش می‌یابد. بنابراین نمودار تراوایی نسبی دو فاز نفت و آب و در نتیجه‌ی آن بازدهی تولید تغییر می‌کند. از جمله شرایطی که بر افزایش دمای مخزن و هم‌چنین بر «برهم‌کنش» سیالات تأثیر دارد، نوع و اشباع سیالات و سرعت حرکت سیال است، به‌طوری‌که هرچه محیط قطبی‌تر، اشباع سیال قطبی بیشتر و سرعت حرکت سیال کمتر باشد، میزان گرمایش افزایش می‌یابد؛ لازم به ذکر است که پس از تغییر تراوایی نسبی سیالات سرعت حرکت آن‌ها نیز تغییر می‌کند.

«تغییر تراوایی نسبی»، به نیروهای بین سنگ با سیال و نیز سیال با سیال بستگی دارد و با تغییر این نیروها، نمودار تراوایی نسبی و توزیع سیالات تغییر می‌کند. این پارامتر، به دما نیز بستگی دارد که با به دست آوردن مدل‌های انتقال حرارت در نفت خام و در مخزن

دارد. لذا با استفاده از فناوری‌های جدید می‌توان ذخائر موجود را به صورت بهینه و با بازدهی بیشتری تولید کرد. امواج الکترومغناطیسی از جمله تکنولوژی‌های نوینی است که می‌تواند جایگزین مناسبی برای دیگر روش‌های حرارتی باشد. تولید بیشتر نفت از این مخازن دارای سازوکارهای متفاوتی است که از بین آنها می‌توان به تأثیر تابش امواج الکترومغناطیس بر خواص سیالات مخزن و برهم‌کنش سنگ و سیالات موجود اشاره کرد که در ادامه به صورت کامل هر کدام توضیح داده شده است.

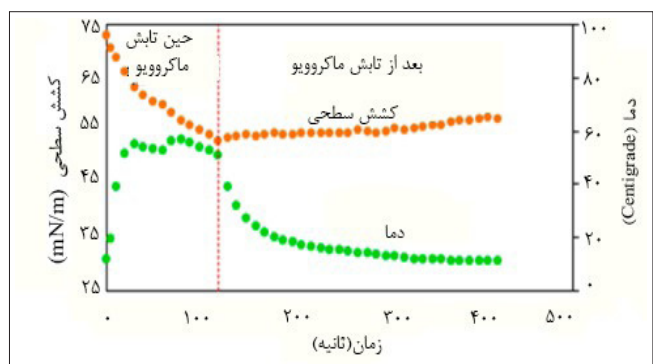
۲-۱- تأثیر امواج الکترومغناطیسی بر برهم‌کنش بین «سنگ-سیال»

توزیع و جابجایی سیالات در مخازن نفتی به مقدار بسیار زیاد به نیروهای موینگی در حفره‌ها، خصوصیات سطحی سنگ و نیروهای بین سطحی سیالات بستگی دارد. هنگامی که سنگ خصوصیات آب‌دوستی از خود نشان دهد، آب درون حفره‌های با قطر کمتر قرار گرفته و نفت و گاز حفره‌های بزرگ‌تر را اشغال می‌کنند. در این حالت، نفت راحت‌تر درون حفرات جریان یافته و با تحمل نیروهای بازدارنده (نیروی موینگی) کمتر، از حفرات خارج می‌شود. با تغییر «ترشوندگی» سنگ و نیز تغییر نیروهای بین سطحی می‌توان این توزیع سیالات را در راستای بهبود تولید از مخازن نفتی تغییر داد. برای این کار از مواد مختلفی از جمله: «سورفکتانت‌ها» و «تانوذرات» استفاده می‌شود که سازوکار تأثیر آن‌ها بر تولید متفاوت است. در سال‌های اخیر ثابت شده است که امواج الکترومغناطیسی می‌توانند بر کشش سطحی بین سیالات و نیز خصوصیات سطحی سنگ مخزن تأثیرگذار باشند. با این حال منابع و تحقیقات گسترده در این زمینه صورت نگرفته است و نیاز به بررسی‌های بیشتری دارد. «پارمار و همکاران» [۱۰] تأثیر ماکروویو بر کشش سطحی آب و

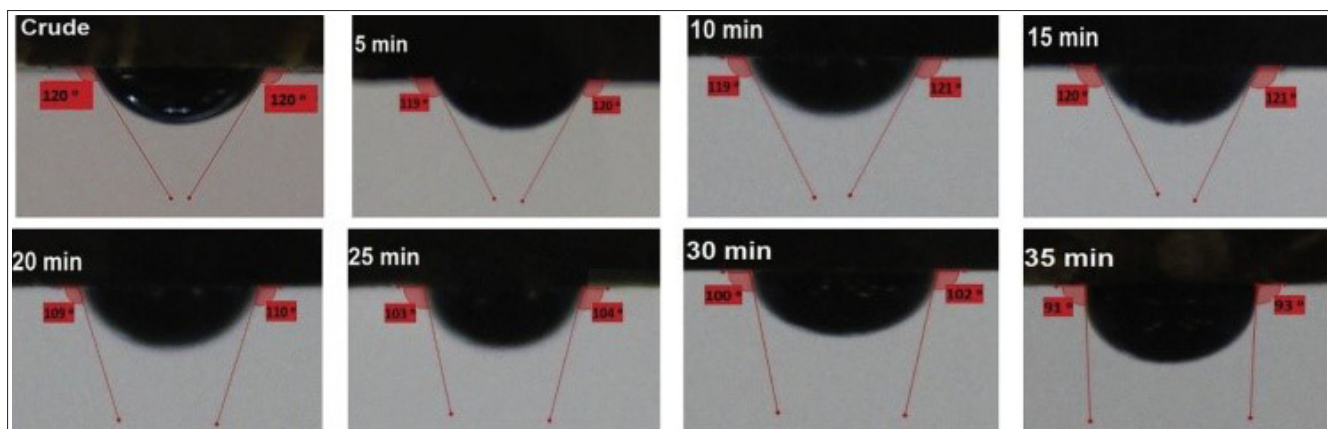
[۷، ۸] توسط امواج الکترومغناطیسی [۲] و همچنین مدل‌سازی ارتقاء در جای نفت توسط این روش [۹]، می‌توان چگالی، گرانیوی نهایی سیال مخزن و تراوایی سیالات مختلف و نیز دیگر پارامترها را به دست آورد. به کمک روند توزیع دما، تغییرات چگالی و گرانیوی نفت و آب سازندی و همچنین یافتن اختلاف فشار دو سیال آب و نفت و میزان ترشوندگی سنگ می‌توان تراوایی نسبی سیالات را محاسبه کرد. با این حال، با تمام تلاش‌های صورت گرفته، تاکنون معادلات حاکم بر تغییر ترشوندگی سنگ و نیز ارتقاء درون مخزن به کمک امواج الکترومغناطیسی توسعه داده نشده‌اند؛ لذا بررسی‌های آزمایشگاهی و عددی متعددی در این حوزه کاملاً احساس می‌شود.

۲-۲ مروری بر مطالعات انجام شده

با توجه به رشد روزافزون تقاضا برای انرژی، اکتشاف منابع جدید و همچنین استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به جای سوخت‌های فسیلی، از جمله روش‌هایی هستند که تحقق آن‌ها به زمان زیادی نیاز



شکل ۳ | تغییرات کشش سطحی و دمای آب مقطر با گذشت زمان (قبل و بعد از تابش ماکروویو). کشش سطحی آب بعد از تابش، با کاهش دما افزایش می‌یابد، ولی به حالت اولیه خود بر نمی‌گردد [۱۰].



شکل ۴ | اثر زمان تابش ماکروویو بر «ترشوندگی» سنگ کلسیت [۱۴]

بیشتر امواج، خروج بیشتری را نشان داد. شکل ۴- اثر تغییرات زمان، بر «ترشوندگی» سنگ کلسیت را نشان می‌دهد. هم‌چنین کاهش میزان گروه‌های عاملی «کربوکسیلیک اسید» و «سولفوکسید» نفت- از عوامل افزایش دهنده‌ی نفت دوستی سنگ- در تغییر ترشوندگی سنگ موثرند. تغییر ترشوندگی سنگ در شرایط مخزن، سازوکار تغییر آن توسط امواج الکترومغناطیسی و تأثیر سیالات مختلف اعم از آب سازندی و سیالات تزریقی بر آن، از جمله مواردی است که نیاز به بررسی‌های بیشتری دارد.

۲-۲- تأثیر امواج الکترومغناطیسی بر برهمکنش بین «سیال-سیال»

یکی از مشکلات تولید نفت، تشکیل امولسیون آب-نفت درون مخزن است که با افزایش گرانیوی سیال تولیدی، میزان برداشت نفت را کاهش می‌دهد. از این رو جلوگیری از تشکیل امولسیون و یا جداسازی آب از نفت در امولسیون می‌تواند کمک زیادی به تولید از مخازن نفتی نماید. برای جلوگیری و یا حذف امولسیون‌ها روش‌های مختلفی مثل روش‌های شیمیایی و حرارتی وجود دارد که نحوه اثر کردن آن‌ها و بازدهی هر کدام متفاوت است. ولی در کل، روند تغییرات هر کدام از این روش‌ها بر امولسیون مشابه است. به صورت کلی، در ابتدا قطره‌های آب شروع به «لخته‌شدن» کرده و بدون ادغام، جذب یکدیگر شده و قطره‌های بزرگ‌تر را تشکیل می‌دهند که «فرآیند انعقاد» نام دارد. سپس هر کدام از این قطره‌های بزرگ ته‌نشین شده و اصطلاحاً فرآیند «خامه‌ای شدن»^{۲۰} اتفاق می‌افتد؛ در نهایت این قطره‌ها با همدیگر ادغام شده و فازی پیوسته از آب را تشکیل می‌دهند. از قابلیت‌های امواج الکترومغناطیسی می‌توان به استفاده از آن در شکستن و ناپایدار کردن امولسیون نفت و آب اشاره کرد [۱۵]. با تابش امواج الکترومغناطیسی، دما افزایش می‌یابد و با افزایش دما، گرانیوی فاز پیوسته (نفت) کاهش یافته و فیلم خارجی امولسیون شکسته می‌شود و با چینش مجدد بارهای موجود در قطره‌های فاز پخش شونده، نیروهای سطحی تغییر می‌کنند و به قطرات اجازه انعقاد و تبدیل به فاز پیوسته را می‌دهد [۱۶]. هم‌چنین چون آب قطبیت بیشتری نسبت به نفت دارد، سریع‌تر از آن تبدیل به بخار شده و از نفت جدا می‌شود. در این راستا اختراعات مختلفی به ثبت رسیده است [۱۵، ۱۷] در جدول ۱- مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه‌ی ناپایداری امولسیون توسط ماکروویو نشان داده شده، که در ادامه جزئیات آن ارائه شده است. با توجه به جدول ۱- می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش میزان آب، افزایش زمان و توان تابش، اختلاف چگالی و گرانیوی سیال پایه و

«اتیلن گلیکول» را بررسی کردند. نتایج این افراد نشان داد که کشش سطحی دو ماده در حین تابش، کاهش یافته و پس از قطع تابش امواج ماکروویو، هم‌زمان که دمای نمونه کاهش می‌یابد، کشش سطحی نیز افزایش می‌یابد؛ اما فقط اتیلن گلیکول توانایی بازگشت به کشش سطحی اولیه خود را دارد. همان‌طور که در شکل ۳- نشان داده شده است، کشش سطحی آب قبل و بعد از تابش امواج الکترومغناطیسی دارای اختلاف است. آن‌ها دلیل این اختلاف را وجود پیوندهای هیدروژنی قوی در آب بیان کردند، به طوری که مولکول‌های سطحی آب، میزانی از انرژی ماکروویو را بدون اینکه دمای آن‌ها افزایش یابد جذب می‌کنند؛ هم‌چنین آن‌ها اذعان داشتند که پس از تابش امواج ماکروویو، «تعویض دینامیکی»^{۱۶} سریع‌تر پیوند هیدروژنی در سطح آب باعث کاهش کشش سطحی آن می‌شود. محققان دیگری نیز کاهش کشش سطحی آب را تحت تابش امواج ماکروویو تأیید کرده و بیان کرده‌اند که توان بالاتر ماکروویو باعث کاهش بیشتر کشش سطحی می‌شود [۱۱]؛ هم‌چنین نشان داده شد که ماکروویو تأثیر کمی بر نوسان قطره‌ی آب دارد [۱۲].

با تابش ماکروویو بر سطح سنگ، بارهای سطحی سنگ تغییر کرده و می‌تواند باعث تغییر در میزان ترشوندگی سنگ شود. «چیوسکی و همکاران» [۱۳] اثر «میدان الکتریکی رادیویی»^{۱۷} بر «پتانسیل زتا»^(ζ) محلولی از «پودر کلسیت» (CaCO_3) را بررسی کرده و «مؤلفه‌های انرژی آزاد سطح» از جمله «دهنده (γ_s^-) و گیرنده (γ_s^+) الکترون»^{۱۸} توسط «روش ویکینگ لایه‌نازک»^{۱۹} اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که با افزایش زمان قرار گرفتن نمونه در معرض این میدان الکتریکی رادیویی، میزان پتانسیل زتا کاهش بیشتری پیدا می‌کند. هم‌زمان با کاهش پتانسیل زتا، عناصر دهنده‌ی الکترون کاهش و عناصر گیرنده الکترون افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده حضور پیوند هیدروژنی بر روی سطح کلسیت است. براساس نتایج این افراد، این کاهش یا افزایش احتمالاً ناشی از تغییر در چگالی و جهت گروه‌های هیدروکسیل و دوقطبی‌های آب است. هم‌چنین در زمان‌های اولیه تابش، یون هیدروژن از سطح جدا شده و بعد از گذشت مدت‌زمان ۱۵ دقیقه، جذب سنگ می‌شود که دلیل آن را نامشخص اعلام کردند. «طاهری شکیب و همکاران» [۱۴] تغییرات ترشوندگی سنگ کلسیت با استفاده از امواج ماکروویو، تحت زمان‌های تابش مختلف را بررسی کردند؛ نتایج این افراد نشان داد که با افزایش زمان تابش تا ۳۵ دقیقه، زاویه تماس نفت با سنگ از ۱۲۰ درجه به ۹۰ درجه کاهش می‌یابد. دلیل این کاهش، خروج عناصر سولفور، نیتروژن و اکسیژن عنوان شد که سولفور به خاطر قابلیت جذب

روش اول به این صورت است که امواج، گر انرژی فاز پیوسته را کاهش داده و فیلم خارجی حبابها را می شکند، که خود باعث به هم آمیختن قطره های فاز ناپیوسته و ایجاد دو فاز پیوسته مجزا می شود. در روش دوم، امواج، توزیع بارهای مولکول های آب را تغییر داده و آن ها را به سمت یون ها حرکت می دهند. این پژوهشگران ادعا کردند که با استفاده از فناوری ماکروویو، جداسازی امولسیون آب-نفت به راحتی انجام پذیر است. وجود سدیم هیدروکسید، باعث

سیال پراکنده، میزان بازدهی شکست امولسیون افزایش می یابد. تأثیر نمکها و غلظت آن ها بر پایداری امولسیون، نتایج دوگانه ای را نشان داده است، که نیاز به بررسی های دقیق تر و یافتن دقیق سازوکارهای حاکم بر این فرآیند است. «وگا و دلگادو» بهبود امولسیون آب-نفت را با استفاده از تابش های الکترومغناطیسی بررسی کردند. آن ها نتیجه گرفته اند که تابش ماکروویو می تواند امولسیون آب-نفت را به دو روش ناپایدار نماید.

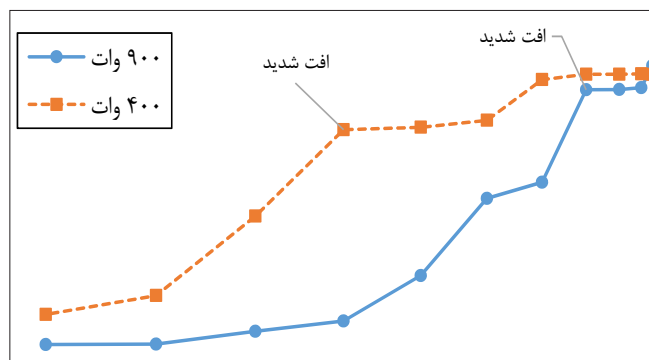
مروری بر مطالعات انجام شده در حوزه برهمکنش «سیال-سیال» توسط امواج الکترومغناطیسی

محققان	موارد مورد بررسی	روش کار	فرکانس (MHz)	توان (W)	نوع فاز پایه	بازدهی جداسازی	توضیحات
«فورچونی و همکاران» [۲۰]	بررسی اثر دما، شوری، pH و میزان آب در شکست امولسیون توسط ماکروویو	استفاده از نمک «سدیم کلرید» برای شوری و «سدیم هیدروکسید» برای تنظیم pH	-	۱۴۰۰	نفت با ۱۹/۱ API	pH و شوری بالا باعث کاهش بازدهی می شوند؛ ولی موارد دیگر بازدهی را افزایش می دهند.	بهترین نتیجه در شرایط pH=۷، میزان آب ۴۵ درصد و بدون حضور نمک حاصل شد
«وگا و دلگادو» [۱۶]	بررسی اثر سدیم هیدروکسید، درصد آب، روش تولید امولسیون	انجام آزمایش ها با دو سیال پایه، و درصد آب مختلف و استفاده از سدیم هیدروکسید	۲،۴۵۰	۹۰۰	سیال روان کننده ی پارافینی	هر چه میزان آب بیشتر، گر انرژی سیال پایه کمتر، میزان سدیم هیدروکسید کمتر و روش تولید به صورت مکانیکی باشد، بازده بالاتری حاصل می شود.	وجود سدیم هیدروکسید باعث کاهش تولید آب می شود. افزایش نسبت آب به نفت، زمان تابش را افزایش می دهد.
«عبدالرحمن و همکاران» [۲۳]	بررسی تغییرات دما و بازدهی جداسازی در میزان آب ۲۰ و ۵۰ درصد	بشر مدرج، حاوی امولسیون درون ماکروویو قرار داده شده و پس از تابش به سرعت از ماکروویو خارج می شود؛ دما توسط ترموکوپل در مکان های مختلف از ظرف اندازه گیری می شود.	۲،۴۵۰	۹۰۰	نفت	۸۲ درصد برای ۵۰ درصد حجمی آب و ۶۵ درصد برای ۲۰ درصد حجمی آب	-
«اودوکیموف و لوزو» [۱۸]	تأثیر میزان درصد حجمی آب، افزایش دما با زمان، برش آب و تغییرات نرخ گرمایش با افزایش دما	ظرف نگهدارنده ی پلاستیکی حاوی امولسیون درون ماکروویو قرار داده شده و توسط ترموکوپل کالیبره شده، دما اندازه گیری می شود.	۲،۴۵۰	۷۰۰	نفت سبک با ۳۸/۵ API و ۱/۹ J/g, K	-	سازوکارهای مختلف با برش های مختلف آب به دست آمد و برش بهینه، ۱۸ و ۵۶ درصد گزارش شده است. ارائه سازوکار جدید برای جذب ماکروویو تحت عنوان «هدایت-پذیری پرشی دوربرد»
«مبادونیه و ونکور» [۲۴]	بررسی میزان پایداری آب در امولسیون آب/نفت (دو نوع نفت)	چندین نمونه امولسیون ساخته شد و میزان جداسازی آب قبل و بعد از تابش اندازه گیری شد.	۲،۴۵۰	۱۰۰۰	دو نوع نفت با ۳۵/۲ و ۲۰/۶ API	افزایش بازده جداسازی با افزایش زمان تابش و برتری ماکروویو نسبت به روش های معمول	نفت با میزان آسفالتین و گر انرژی بالاتر دارای امولسیون بالاتر می باشد. همچنین میزان برش آب ۳۰ درصد پایداری از برش آب ۵۰ درصد است
«محمد و محمد» [۲۱]	جداسازی امولسیون توسط ماکروویو، بررسی اثر توان، غلظت نمک و برش آب	استوانه مدرج ۹۰۰ میلی لیتری درون ماکروویو قرار داده شد و دما توسط سه ترموکوپل اندازه گیری شد.	۲،۴۵۰	۷۰۰ و ۸۰۰ و ۹۰۰	نفت با API=۲۴	بیشترین بازدهی مربوط به بالاترین غلظت نمک، بیشترین توان، بیشترین زمان تابش و ۵۰ درصد برش آب گزارش شد.	یون های بین سطح آب و نفت می توانند با گروه های آبدوست واکنش داده و تشکیل نمک های حلال ناپذیر دهند.
«کار و همکاران» [۲۵]	بررسی نقش آسفالتین، رزین و آب در فرایند جداسازی توسط ماکروویو	ساخت چهار محلول، با تزریق هم زمان بخار و ترکیب حلال های دیگر (تهیه امولسیون به روش SAGD)	۲،۴۵۰	۹۰۰	نفت با ۸/۶۵ درجه API و گر انرژی ۵۴،۰۰۰ ساتی پواز	زمانی که اختلاف میزان رزین و آسفالتین زیاد باشد بازدهی بیشتر می شود.	شکست امولسیون نه تنها به میزان آب بلکه به میزان «رزین» و «آسفالتین» درون نفت نیز وابسته است.
«ژیا و همکاران» [۲۲]	بررسی تأثیر دما و نوع نمک بر جداسازی	در روش بدون تابش و با تابش ماکروویو. ۱۵۰ ثانیه تابش ماکروویو ۸۷ دقیقه زمان برای شکست امولسیون	۲،۴۵۰	۸۵۰	نرمال دکان	وجود نمک باعث افزایش بازده جداسازی می شود.	منیزیم کلرید و سدیم کلرید بیشترین بازدهی را از خود نشان دادند. هم چنین دما در حضور این نمکها بیشتر افزایش می یابد و بازده بالاتری نیز دارد.

اساس نتایج «فورچونی و همکاران» [۲۰] با افزایش میزان نمک در فاز آبی، میزان نیاز به انرژی ماکروویو برای رساندن دما به نقطه‌ی تعیین‌شده کمتر می‌شود. این افراد با بررسی‌های آزمایشگاهی پی بردند که نمک‌ها می‌توانند بر خصوصیات بین سطحی و هم‌چنین پایداری امولسیون‌ها تأثیر داشته باشند؛ که با توجه به کاهش انرژی تأیید شده امولسیون، میزان برش آب موجود درون امولسیون نسبت به حالت فاقد نمک بیشتر است و جداسازی آب از نفت از بازدهی خوبی برخوردار خواهد بود. اما «محمد و همکاران» [۲۱] نشان دادند که با افزایش غلظت نمک سدیم کلرید، انرژی درونی سیستم افزایش می‌یابد؛ به طوری که، نمک‌ها، «لایه‌های بار دوگانه»^{۲۹} در امولسیون را از بین می‌برند؛ در نتیجه بازدهی جداسازی آب از نفت افزایش می‌یابد؛ هم‌چنین یون‌های بین سطح آب و نفت می‌توانند با گروه‌های آب‌دوست واکنش داده و تشکیل نمک‌های غیر قابل حل در آب دهند. «ژیا و همکاران» [۲۲] با بررسی نمک‌های مختلف نشان دادند که تمامی نمک‌های دارای یون کلر (Cl⁻) سرعت شکست امولسیون را چه تحت روش‌های معمول و چه تحت تابش ماکروویو افزایش می‌دهند. این افراد، از بین بردن لایه‌های بار دوگانه و افزایش ثابت دی‌الکتریک امولسیون و در نتیجه «گرمایش فوق‌زیاد»^{۳۰} را از دلایل افزایش سرعت شکست دانستند. از میان نمک‌ها، NaCl و MgCl₂ بهترین بازدهی و AlCl₃ به خاطر داشتن ترکیب کووالانسی و قدرت یونی کم، کمترین بازدهی را از خود نشان دادند. بر اساس نتایج این پژوهشگران، ماکروویو با خنثی کردن پتانسیل زتا، باعث دوفازی شدن آب و نفت و ته‌نشین شدن نمک‌های آن شده و در نتیجه فرآیند شکست امولسیون تسریع می‌شود.

۳- مطالعه موردی

محققین مقاله‌ی حاضر طی پژوهشی، سنگ کربناته نفت دوست شده با خلوص ۹۴ درصد را در زمان‌های مختلف تحت تابش امواج



شکل ۵ | تغییر زاویه تماس نفت روی سنگ با گذشت زمان در توان‌های ۹۰۰ و ۴۰۰ وات

خنثی‌سازی اسیدهای آزاد درون فاز پیوسته شده و میزان بازیافت آب را کاهش می‌دهد [۱۶].

مدت زمانی که نمونه در معرض تابش قرار می‌گیرد به نسبت «آب به نفت» بستگی دارد. هرچه این نسبت بیشتر باشد نمونه باید زمان بیشتری در معرض تابش قرار بگیرد؛ در زمان تابش ثابت، با افزایش نسبت آب به نفت، ابتدا بازدهی تا نقطه‌ی بهینه افزایش و سپس کاهش می‌یابد [۱۵]. در این راستا، «اودوکیموف و لوزو» [۱۸]، تغییرات دما برحسب زمان را در امولسیون با «برش آب»^{۲۲} برابر با ۰/۲۶ بررسی کردند. تغییرات دما برحسب زمان برای امولسیون نشان داد که بعد از ۱۲ ثانیه، شیب افزایش دما کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده‌ی فرآیندهای «جذب گرما»^{۲۳} و شروع ناپایداری امولسیون است. به اعتقاد این افراد، این فرایندها به خاطر اصلاح خصوصیات ساختاری نفت و یا جابجایی ساختاری واکس‌ها و آسفالتین‌های درون کلئید است. پس از ۲۸ ثانیه تابش، به واسطه فرآیند «انتشار گرما»^{۲۴}، دما ناگهان ۵ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد که به خاطر اصلاح ساختاری در سیستم مولکولی نفت است؛ هم‌چنین این پژوهشگران تغییرات نرخ گرمایش را با تغییر درصد حجمی آب از ۴ تا ۷۷ درصد را بررسی کردند. نتایج نشان داد که چهار برش بحرانی آب (۱۸، ۲۹، ۵۶ و ۶۴ درصد) تحت عنوان «آستانه‌ی تراوش یا پرکولاسیون»^{۲۵}، «آستانه‌ی تحمل اولیه برای خوشه‌های حاصل از تجمع»^{۲۶} تعدادی از قطره‌های آب که توسط فاز نفتی جدا شده‌اند، «تراکم تصادفی ضعیف خوشه‌ها»^{۲۷} و «تراکم تصادفی قوی خوشه‌ها»^{۲۸} وجود دارد که در آن میزان نرخ گرمایش به صورت پله‌ای تغییر می‌کند. در ابتدا خوشه‌های متشکل از قطره‌های آب شروع به ضعیف شدن کرده و تبدیل به شبکه‌ی ژل‌های ضعیف و شل می‌شوند، سپس این خوشه‌ها حرکت آزادانه خود را از دست‌داده و تجمع پیدا می‌کنند؛ پس از این مرحله، تمامی اجزای نفت خام، به ژلی تحت عنوان «فاز سوم» تبدیل می‌شوند. بعد از برش آب ۶۴ درصد، نرخ گرمایش به شدت کاهش می‌یابد، که دلیل آن نامشخص اعلام شد. این محققان برش آب ۲۸ درصد را «برش بهینه» جهت گرمایش و نیز شکست موفق امولسیون گزارش کردند [۱۸].

گرمایش دی‌الکتریکی تحت تأثیر نوع و غلظت نمک‌های موجود در فاز آبی قرار دارد. تأثیر نمک بر جذب امواج، به درستی بررسی نشده است و پژوهش‌های انجام‌شده در این مورد به دو دسته‌ی متضاد هم تقسیم می‌شوند. بخشی از پژوهش‌ها نشان داده‌اند که بسته به نوع نمک، اندازه و بار یون‌ها، جذب امواج متفاوت خواهد بود، به نحوی که با زیاد شدن اندازه یون‌ها، میزان تولید گرما کاهش می‌یابد [۱۹]. بر

«ژئومکانیک»^{۲۳} مخزن از جمله مسائلی هستند که باید مورد توجه محققین در پژوهش‌های آینده قرار گیرند. عوامل مختلفی از جمله: فرکانس، توان، زمان تابش، نوع سیال، جنس سنگ سازند، میزان آب همزاد و نوع نمک‌ها و غلظت‌های آن، نوع سیال تزریقی و سناریوهای تزریق آن و نحوه اجرایی کردن این فناوری در مقیاس میدانی، همگی بر نتیجه‌ی تولید تأثیرگذارند، لذا متناسب با این موضوع‌ها بررسی‌های آزمایشگاهی، میدانی و عددی متعددی باید انجام شود.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه ابتدا، به بحث در مورد ساز و کارهای حاکم بر گرمایش الکترومغناطیسی و تأثیر آن بر بهمکنش‌های سنگ-سیال و سیال-سیال پرداخته و سپس مروری بر تحقیقات و مطالعات انجام شده در این حوزه انجام شده است. در نهایت چالش‌های پیش روی محققان مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج این پژوهش، تابش امواج الکترومغناطیسی بر سنگ و سیال باعث ایجاد پدیده‌های متفاوتی مانند: تشکیل و یا شکستن زنجیره‌های هیدروکربنی، تغییر در خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نفت و آب، تغییر در «کشش سطحی» و «بین سطحی» آب و نفت، تغییر در خصوصیات سطحی سنگ مخزن و تأثیر بر میزان تولید از مخازن نفتی می‌شود. اکثر مطالعات موجود بر کارایی این امواج در تغییر مفید خواص سنگ و سیال و تولید بهینه از مخزن تأکید داشته‌اند. پژوهش‌ها نشان داده است که به دلیل جابجایی هترواتم‌ها و تبادل یونی بین سیال و سنگ، ترشوندگی و بارهای سطحی سنگ با تابش امواج تغییر کرده و سنگ می‌تواند از حالت نفت دوست به آب دوست تغییر کند. تغییر کشش سطحی آب توسط ماکروویو بررسی شد که تغییر آن به دلیل جذب پنهان انرژی امواج به صورت دائمی گزارش شده است. قرار دادن امولسیون‌ها تحت تابش امواج ماکروویو، باعث تغییر گرانیوز فاز پیوسته، تغییر در توزیع بارهای فاز ناپیوسته و در نتیجه، شکستن فیلم خارجی امولسیون و ناپایداری آن می‌شود. با این حال، تمامی پدیده‌های حاکم به درستی بررسی نشده‌اند و نیاز به مطالعات بیشتر در هر کدام از این زمینه‌ها وجود دارد. برای پیش‌بینی صحیح تغییرات خصوصیات سنگ و سیال و همچنین میزان تولید از مخازن نفتی، نیاز به توسعه‌ی مدل‌های ریاضی جامع و دقیقی در این حوزه از دانش است. افزایش مقیاس عملیات «ارتقا درجا» در چاه‌های نفتی، تسهیلات مورد نیاز و بررسی کارایی این فناوری در مقیاس مخزن از جمله مواردی هستند که باید به صورت جدی مورد توجه محققین قرار گیرد. ■

الکترومغناطیسی با توان‌های ۴۰۰ و ۹۰۰ وات قرار داده و زاویه تماس نفت با سنگ توسط روش «قطر چسبیده»^{۲۱} را اندازه‌گیری کرده‌اند (شکل-۵). شایان ذکر است که قبل از فرآیند نفت دوست کردن سنگ‌ها، زاویه تماس اندازه‌گیری شده برابر ۲۷ درجه بوده است.

با توجه به شکل-۵، توان ۹۰۰ وات با تغییر ۹۰ درصدی زاویه تماس، توانایی بیشتری نسبت به توان ۴۰۰ وات در تغییر زاویه تماس از نفت دوست به آب دوست دارد. همان طور که مشاهده می‌شود در توان‌های ۹۰۰ و ۴۰۰ وات به ترتیب تا ۱۰ دقیقه و ۶ دقیقه، زاویه تماس ثابت است که خود نشان دهنده‌ی عدم تأثیر این امواج قبل از زمان‌های ذکر شده است. این موضوع به علت عدم تغییر «هترواتم»های سطح سنگ و عدم مشاهده تغییر در پیک «دستگاه طیف سنج مادون قرمز تبدیل فوری» یا FTIR^{۲۲} مربوط به اجزاء قطبی نفت (کربوکسیلیک اسید) تا قبل از این زمان است [۱۴]. در زمان‌های بیشتر از ۶ دقیقه (۹۰۰ وات) و ۲۸ دقیقه (۴۰۰ وات)، افت شدیدی در زاویه تماس دیده می‌شود که علت آن، خروج نفت بسیار زیاد از سنگ‌ها است. انتقال بیشتر انرژی در توان ۹۰۰ وات، توانایی بیشتر این امواج در افزایش آب‌دوستی سنگ کربناته را نشان می‌دهد. همچنین در این توان پس از ۵۵ دقیقه تابش، زاویه تماس از مقدار اولیه کمتر شده و به ۱۵ درجه کاهش می‌یابد.

۴- چالش‌های پیش روی محققین در استفاده از امواج الکترومغناطیسی در فرایند ازدیاد برداشت نفت

ساز و کار تأثیر امواج الکترومغناطیسی بر گرمایش سیال مخزن، تغییر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و تولید از آن، فرایندی پیچیده است که مطالعات گسترده‌ای را در این زمینه می‌طلبد و به دنبال آن، تمرکز بیشتری برای بررسی تأثیر امواج بر «بهمکنش» سنگ-سیال و سیال-سیال مورد نیاز است. همچنین توسعه‌ی مدل‌های ریاضی تحلیلی و عددی، نیاز به پژوهش‌های بیشتر جهت پیش‌بینی خواص سنگ و سیال و نیز تولید بهینه از مخازن دارد. تابش امواج الکترومغناطیسی بر روی نفت، باعث انجام واکنش‌های زنجیره‌ای می‌شود که نوع این واکنش‌ها و بازگشت‌پذیری یا تأثیر دائمی آن‌ها تاکنون به درستی شناخته نشده‌اند؛ این امواج می‌توانند بر خصوصیات نفت و نیز پایداری بلورهای آسفالتین، تأثیری مثبت و یا منفی داشته باشند. تأثیر امواج الکترومغناطیسی بر تغییر ترشوندگی سنگ مخزن و عوامل موثر در آسیب به سازند مانند: تغییرات میزان تخلخل و تراوایی سنگ مخزن، مقاومت مکانیکی سنگ و

پانویس ها

1. In Situ Combustion
2. EOR
3. Coiled Tubing
4. Electrical Resistivity Heating
5. Electromagnetic Heating
6. Casing
7. Eddy Current
8. Electric dipole moment
9. Hot Spot
10. Convection and Conduction
11. Desulphurization
12. Demetalization
13. Onset Point
14. Wetting Fluid (w)
15. Non-Wetting Fluid (nw)
16. Dynamic Switching
17. Radio Frequency Electric Field
18. Electron Donor and Acceptor
19. Thin Layer Wicking Technique
20. Creaming
21. Long Range Hopping Ion Conductivity
22. Water Cut or Water Content
23. Endothermic Process
24. Exothermic Process
25. Percolation Threshold
26. Jamming Threshold for basic clusters
27. Random Loosed Packing
28. Random Closed Packing
29. Double Charged Layers
30. Super Heating
31. Sessile Drop Method
32. Fourier transform infrared
33. Geomechanics

منابع

- [1]. Ritchey Harold W., Radiation heating, 1956, US Patent 2,757,738.
- [2]. Bera Achinta, Babadagli Teyfun, Status of electromagnetic heating for enhanced heavy oil/bitumen recovery and future prospects: A review, Applied Energy, Elsevier, 2015, vol. 151, pp. 206-226.
- [3]. Sun Jing, Wang WenLong, Yue Qinyan, Review on microwave-matter interaction fundamentals and efficient microwave-associated heating strategies, Materials (Basel) 2016., vol. 9, no. 4, p. 231.
- [4]. Carrizales, Maylin Alejandra, Recovery of stranded heavy oil by electromagnetic heating, Doctoral dissertation at The Texas University of Technology at Austin, 2010.
- [5]. Feynman, Richard P., Leighton, Robert B., Matthew Sands, The feynman lectures on physics, American Journal of Physics, ODD, 1965, vol. 33, no. 9, pp. 750-752.
- [6]. Taheri-Shakib Jaber, Shekarifard Ali, Naderi Hassan, Inhibiting asphaltene precipitation using microwave irradiation: experimental investigation, in Saint Petersburg 2018, vol. 2018, pp. 1-5.
- [7]. Butler Roger M., Thermal recovery of oil and bitumen, Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ., 1991, pp. 496-546.
- [8]. Zhangxin Chen , Guanren Huan , Yuanle Ma, Computational methods for multiphase flows in porousmedia. Siam, Computational Science & Engineering, 2006, pp. 184.
- [9]. Borges Fernanda Cabral, et al., Fast microwave assisted pyrolysis of biomass using microwave absorbent, Bioresource Technology, 2014, vol. 156, pp. 267-274.
- [10]. Parmar Harisinh, et al., Influence of microwaves on the water surface tension, Langmuir, 2014, vol. 30, no. 33, pp. 9875-9879.
- [11]. Kanazawa Yushin, et al., Convection and surface tension profiles for aqueous droplet under microwave radiation, International Conference on Optical Particle Characterization (OPC 2014), 2014, vol. 9232, p. 92320D.
- [12]. Asada Masahiro, Kanazawa Yushin, Asakuma Yusuke, Honda Itsuro, Phan Chi, Surface tension and oscillation of water droplet under microwave radiation, Journal of Chemical Engineering Research and design, 2015, vol. 101, pp. 107-112.
- [13]. Chibowski Emil, Holysz Lucyna, Wójcik Wiesław, Changes in zeta potential and surface free energy of calcium carbonate due to exposure to radiofrequency electric field, Colloids Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects, 1994, vol. 92, no. 1-2, pp. 79-85.
- [14]. Taheri-Shakib Jaber, Shekarifard Ali, Naderi Hassan, The study of influence of electromagnetic waves on the wettability alteration of oil-wet calcite: Imprints in surface properties, Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, vol. 168, pp. 1-7.
- [15]. Henry Nwankwor Emeka, Effects of Microwave Irradiation on the Characteristics of Water-Oil Emulsions, Master thesis at Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia, 2013.
- [16]. Vega Camila, Delgado Mayolett, Treatment of waste-water/oil emulsions using microwave radiation, in SPE International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production, 2002.
- [17]. Wolf Nicholas O., Use of microwave radiation in separating emulsions and dispersions of hydrocarbons and water, 1986, US Patent 4,582,629.
- [18]. Evdokimov Igor N., Losev Aleksandr P., Microwave treatment of crude oil emulsions: Effects of water content, Journal of Petroleum Science and Engineering, 2014, vol. 115, pp. 24-30.
- [19]. Anwar Jamil, et al., Microwave chemistry: Effect of ions on dielectric heating in microwave ovens, Arabian Journal of Chemistry, 2015, vol. 8, no. 1, pp. 100-104.
- [20]. Fortuny Montserrat, Oliveira Cesar BZ, Melo Rosana LFV, Nele Márcio, Coutinho Raquel CC, Santos Alexandre F, Effect of salinity, temperature, water content, and pH on the microwave demulsification of crude oil emulsions, Energy & Fuels, 2007, vol. 21, no. 3, pp. 1358-1364.
- [21]. Mohammed Sawsan AM., Mohammed Mortatha S., The application of microwave technology in demulsification of water-in-oil emulsion for missan oil fields, Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering, 2013, vol. 14, no. 2, pp. 21-27.
- [22]. Xia Li-Xin, Lu Shi-Wei, CAO GUO-YING, Salt-assisted microwave demulsification, Chemical Engineering Communications, 2004, vol. 191, no. 8, pp. 1053-1063.
- [23]. Abdurahman NH., Yunus RM., Azhari, NH., Said N., Hassan Z., The Potential of Microwave Heating in Separating Water-in-Oil (w/o) Emulsions, 2017, vol. 138, pp. 1023-1028.
- [24]. Miadonye Adango Nwankwor Emeka, Effects of Microwave Irradiation on Stability Characteristics of Water-Oil Emulsions, Journal of Petroleum Science and Research, 2014, vol. 3, no. 2, pp. 68-72
- [25]. Kar Taniya, Hascakir Berna, The role of resins, asphaltenes, and water in water-oil emulsion breaking with microwave heating, Energy & Fuels, 2015, vol. 29, no. 6, pp. 3684-3690.