

بررسی امکان استفاده از امواج ایستای فراصوت با شدت بالا در شکستن امولسیون های نفتی

حانیه غفوریان نصیری، محمدتقی حامد موسویان*⁺

مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی

رسول کدخدایی

مشهد، پژوهشکده علوم و صنایع غذایی، صندوق پستی ۱۳۹ - ۹۱۷۳۵

چکیده: پژوهش حاضر بر مبنای بررسی عامل های مؤثر بر شکست امولسیون ها در میدان ایستای امواج فراصوت با شدت بالا اعمال شده، به صورت افقی انجام شده است. در این مطالعه سامانه مدل شامل امولسیون نفت خام سبک در آب مورد مطالعه قرار گرفت. نتیجه های آزمایش ها نشان دهنده این بود که موج های ایستای فراصوت قادر به شکست امولسیون ها و جداسازی فازهای اولیه بودند. با این حال راندمان جداسازی به شدت به پارامترهای گوناگون فرایند همچون شدت صدا، موقعیت قرارگیری امولسیون نسبت به منبع فراصوت و مدت زمان صدا دهی وابسته بود. همچنین مشخص شد که غلظت درصد فاز پراکنده و حضور نمک در امولسیون نیز بر سرعت خامه ای شدن امولسیون تأثیر دارد. مقایسه نتیجه های آزمایش ها مؤید این بود که بهترین حالت جداسازی برای شدت صدا دهی ۴۵ درصد، نزدیک ترین فاصله به منبع فراصوتی (۱۷/۵ سانتی متر)، بیشترین زمان صدا دهی (۳۰ دقیقه)، حضور ۵ درصد نمک سدیم کلرید در فرمول اولیه و برای امولسیون با غلظت نفت کمتر (۵ درصد) می تواند صد درصد نفت امولسیون شده در آب را بازیافت نماید.

واژه های کلیدی: امولسیون نفت در آب، جداسازی، امواج فراصوت.

KEY WORDS: Crude oil in water emulsion, Separation, Ultrasonic wave.

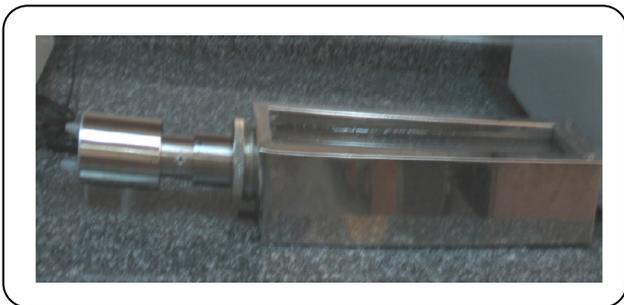
مقدمه

و نیز شستشوی مخزن های حمل و نقل و نگهداری مقدارهای قابل ملاحظه ای امولسیون نفت در آب تشکیل می شود. افزون بر واحدهای پتروشیمی، صنایع فلزکاری و خودرو نیز مقدارهای زیادی روغن های روان کاری، سردسازی، گریس و نفت به صورت امولسیون در پساب های خود وارد محیط می کنند. تاکنون پژوهش های زیادی به بررسی پایداری و رفتار جریان

نفت خام به لحاظ داشتن سورفکتانت های طبیعی مانند آسفالتن و رزین در داخل آب به دام می افتد و به صورت امولسیون در می آید. پایداری این امولسیون به مقدار امولسیفایرهای طبیعی بستگی دارد. برای چندین دهه این موضوع همواره باعث آلودگی آنها شده است. منبع اصلی این آلودگی، صنایع پتروشیمی می باشد. در فرایند حفاری چاه ها، تصفیه و پالایش نفت خام

+E-mail: mosavian@um.ac.ir

*عقد دار مکاتبات



شکل ۱- محفظه اعمال فراصوت.

رو باز ساخته شد. محفظه دو جداره بود و مجراهایی برای ورود و خروج آب از جداره برای کنترل دما بر روی آن تعبیه شد. اندازه‌های مکعب مستطیل به ترتیب عبارت بودند از: طول ۴۸٫۵، عرض ۸، ارتفاع ۹ سانتی متر و ضخامت بین دو جداره از هر طرف ۱ سانتی متر. پروب اعمال فراصوت از محل دیوار جانبی مکعب مستطیل وارد محفظه شده و در محل خود پیچ می‌شد. دیوار جانبی روبرو، به عنوان برگشت‌دهنده امواج فراصوت عمل می‌کرد. در این نوع طراحی، امواج صوتی ایستا به صورت افقی اعمال شد (شکل ۱).

سامانه جداسازی با امواج فراصوت شامل محفظه اعمال فراصوت، پروب انتقال امواج (S&M 630-0457، ساخت شرکت شیلنگ های رابط، گیره و پایه بود. محفظه اعمال فراصوت با ۲۰۰۰ mL آب مقطر پر شد. آب داخل محفظه محیط انتقال امواج فراصوت به امولسیون بود. در طول آزمایش با چرخش آب در جداره ظرف به کمک پمپ، دمای آن ثابت نگه داشته شد. ۵۰ mL امولسیون به ظرف‌های مکعب شکل از جنس پلکسی با اندازه‌های ۶×۶×۲ سانتی متر منتقل شده و با گیره در محل دلخواه در داخل محفظه فراصوتی پر از آب قرار داده شد. شدت و زمان اعمال فراصوت از روش سونیکاتور (دستگاه مولد امواج فراصوت مدل VCX 750، ساخت شرکت Sonics آمریکا با قدرت اسمی ۷۵۰ وات و فرکانس ۲۰ کیلو هرتز) تنظیم شد.

تهیه و آماده سازی مواد و محلول ها

نفت خام سبک (با API حدود ۳۱) به دست آمده از چاه فروزان از سوی پژوهشگاه صنعت نفت در اختیار قرار گرفت. Tween 80 و سدیم کلرید تولید شرکت مرک آلمان خریداری شد. برای ساخت امولسیون‌ها و محلول‌ها از آب مقطر دیونیزه استفاده شد.

در امولسیون های آب در نفت اختصاص یافته [۶-۱۱] ولی کار جدی در زمینه امولسیون‌های نفت در آب انجام نشده است. در صنعت در شرایطی که امولسیون‌های ناخواسته تشکیل می‌شوند، باید تدابیری را در نظر گرفت تا فرایند شکست امولسیون انجام شده دو فاز اولیه آب و روغن از یکدیگر جدا شوند. فناوری‌ها و روش‌های گوناگونی مانند استفاده از گرما و امواج ماکروویو، میدان های الکتریکی، شناورسازی، جداسازی غشایی، تنظیم pH و نیز افزودن مواد شیمیایی به این منظور توسعه یافته اند، اما هیچ یک به تنهایی نمی‌توانند صددرصد نفت امولسیون شده در آب را بازیافت نمایند. در نتیجه پژوهش‌ها به سمت استفاده از فناوری‌های جدید معطوف شده‌اند. استفاده از فناوری امواج فراصوت برای شکستن امولسیون‌ها، روش به نسبت جدیدی است که در دسته فرایندهای پاک قرار گرفته است.

استفاده از امواج فراصوت برای جداسازی امولسیون‌های پایدار در چند سال اخیر مطرح شده است و فقط چندین گروه پژوهشی در این زمینه کار کرده‌اند و راندمان جداسازی خوبی نیز به دست آورده‌اند [۱۱-۷]. در سال ۲۰۰۴ میلادی برای اولین بار، گاتام برای جداسازی امولسیون پایدار روغن گیاهی در آب با دامنه اندازه قطرات ۱ تا ۱۵ میکرون از این روش استفاده کرد [۷]. در سامانه طراحی شده توسط گاتام میدان فراصوت به صورت افقی اعمال می‌شد. طراحی دیگر سامانه جداسازی فراصوت می‌تواند به صورت عمودی باشد. برای مثال در پژوهشی با هدف آب زدایی از نفت خام به وسیله امواج فراصوت، بازده جداسازی با طراحی عمودی به ۹۲٫۷ درصد افزایش یافت که قابل قبول و دلخواه است [۸]. همچنین سوسامیون نیز برای جداسازی امولسیون روغن کانولا در آب از طراحی عمودی استفاده کرد و نتیجه‌های جالب توجهی را گزارش نمود [۱۱].

در این پژوهش، برای اولین بار از امواج ایستای فراصوت با انرژی بالا برای شکستن امولسیون پایدار نفت در آب استفاده شد. تأثیر پارامترهای گوناگونی بر راندمان جداسازی فراصوت بررسی شد که عبارتند از: زمان صدا دهی، شدت انرژی ورودی، درصد جزء پراکنده، موقعیت قرارگیری امولسیون نسبت به منبع فراصوت و تأثیر حضور نمک در امولسیون که در هر طراحی باید بهینه شود.

بخش تجربی

سامانه جداسازی فراصوت

یک محفظه از جنس فولاد ضد زنگ به صورت مکعب مستطیل

توسط دستگاه سنجش اندازه ذرات (Fritsch Analysette22, Germany) بعد از هر آزمایش اندازه گیری شد.

سرعت دو فاز شدن و ناپایداری امولسیون نیز از روی شاخص خامه‌ای شدن محاسبه شد. بدین منظور ۱۰ میلی لیتر از هر نمونه امولسیون به لوله فالکون ۱۴ میلی لیتر منتقل شد و به مدت ۲۰ روز در دمای محیط نگهداری شد. نتیجه‌ها به صورت درصدی از میزان خامه‌ای شدن به ارتفاع کل بیان شد:

$$(1) \quad H_C / H_E \times 100 = \text{شاخص خامه بستن}$$

در این معادله، H_E ارتفاع کل (cm) در لوله است که شامل H_C ارتفاع خامه (cm)، H_S ارتفاع سرم (cm)، H_{S_0} ارتفاع لایه رسوب (cm) و H_O ارتفاع نفت (cm) می‌باشد. افزون بر شاخص خامه‌ای شدن، سرعت تشکیل لایه سرم نیز محاسبه شد. همچنین از شیب خط تغییرات ارتفاع روغن و خامه به ارتفاع کل که نسبت به زمان رسم شده است، سرعت منعقد شدن یا تجمع ذرات روغن محاسبه شد.

کلیه آزمایش‌ها در قالب طرح به‌طور کامل تصادفی با استفاده از آزمایش فاکتوریل انجام شد. برای تحلیل واریانس از نرم‌افزار ۱۵ Minitab استفاده شد. میانگین‌ها به روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح اطمینان ۹۵٪ مورد مقایسه قرار گرفتند. افزون بر تحلیل آماری، از روش کیفی نیز برای بررسی مکانیسم فرایند جداسازی استفاده شد. نمونه‌های امولسیون بعد از صدادهی، توسط یک میکروسکوپ نوری (مدل CARL ZEISS, JENA)، ساخت شرکت ANMO Electronics) با بزرگ‌نمایی ۴۰۰ دیده شد و توسط دوربین (دیجیتال چشمی با قابلیت اتصال میکروسکوپ به کامپیوتر مدل Dino-Lite) از آن‌ها عکس برداری شد.

بررسی شکست امولسیون توسط امواج ایستای فراصوت در سامانه

طراحی شده

تأثیر زمان صوت دهی

برای امولسیون‌های ۵ و ۱۰ درصد نفت خام در آب آزمایش‌ها برای سه زمان صدادهی ۱۵، ۵ و ۳۰ دقیقه با سه مرتبه تکرار انجام شدند. متوسط نتیجه‌ها اندازه قطره‌ها در شکل ۲ آورده شده است. با توجه به تجزیه واریانس، در این حالت $p < 0.05$ بود که بدان معنی است متغیر زمان صوت دهی بر پارامتر اندازه‌گیری شده (اندازه قطرات) تأثیرگذار بود و بررسی روند تغییرها و نتیجه‌گیری از آن، منطقی است.

برای تهیه محلول NaCl (w/v) ۵٪، ۵ گرم سدیم کلرید به درون بشر ریخته و مقداری آب مقطر به آن افزوده شد. سپس به مدت ۵ دقیقه با یک هم زن مغناطیسی ۳۰۰ دور در دقیقه هم زده شد تا به طور کامل حل شود و بعد به بالن ژوژه ۱۰۰ میلی‌لیتری منتقل و با آب مقطر به حجم رسانده شد.

آماده سازی امولسیون‌ها

۵ mL نفت خام با ۰.۵ mL امولسیفایر (Tween 80) و ۹۴.۵ mL آب مقطر مخلوط شد. برای ساخت امولسیون از دستگاه اولتراتوراکس (مدل T25، ساخت شرکت IKA Lab کشور آلمان) با ۱۱۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه استفاده شد (امولسیون ۵ درصد حجمی نفت در آب با متوسط اندازه قطرات ۰.۷ میکرون). امولسیون ۱۰ درصد حجمی نفت در آب (با متوسط اندازه قطرات ۰.۶۵ میکرون) نیز به صورت بالا از اختلاط ۱۰ mL نفت خام با ۲ mL امولسیفایر و ۸۸ mL آب مقطر ساخته شد. همه امولسیون‌ها در حجم‌های ثابت ۱۰۰ mL درست شدند. برای تهیه امولسیون‌های دارای نمک کلسیم کلرید، در فرمول اولیه امولسیون نفت، ۵ و یا ۱۰ درصد حجمی از این محلول نیز اضافه شد و سپس توسط اولتراتوراکس مخلوط شد.

روش جداسازی

در این پروژه‌ها، از امواج ایستای فراصوت با انرژی بالا برای شکستن امولسیون پایدار نفت در آب استفاده شد. اثر امواج فراصوت بر پایداری امولسیون‌های ۵ و ۱۰ درصد نفت خام در آب بررسی شد. نمونه‌های امولسیون در فاصله‌های ۱۷.۵، ۲۵ و ۳۷ سانتی‌متر از منبع تولید فراصوت در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد، برای زمان‌های ۵، ۱۵ و ۳۰ دقیقه با شدت‌های اعمال فراصوت ۲۰، ۴۵ و ۷۵ درصد و بیشترین توان اسمی در برابر تابش امواج فراصوت قرار گرفتند. همچنین اثر امواج فراصوت بر پایداری امولسیون ۵ درصد نفت خام در آب با محلول نمک سدیم کلرید ۵ و ۱۰ درصد بررسی شد. نمونه‌های امولسیون در فاصله‌های ۱۷.۵، ۲۵ و ۳۷ سانتی‌متر از منبع تولید فراصوت در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد، برای مدت زمان ۱۵ دقیقه با شدت ۲۰ درصد و بیشترین توان اسمی در برابر تابش امواج فراصوت قرار گرفتند.

تحلیل داده‌های تجربی

قطر متوسط (d_{32})، توزیع اندازه و سطح ویژه قطره‌های امولسیون

بستگی دارد. از این رو روند یکسانی از تغییر اندازه قطره‌ها را در سامانه‌های گوناگون نمی‌توان انتظار داشت.

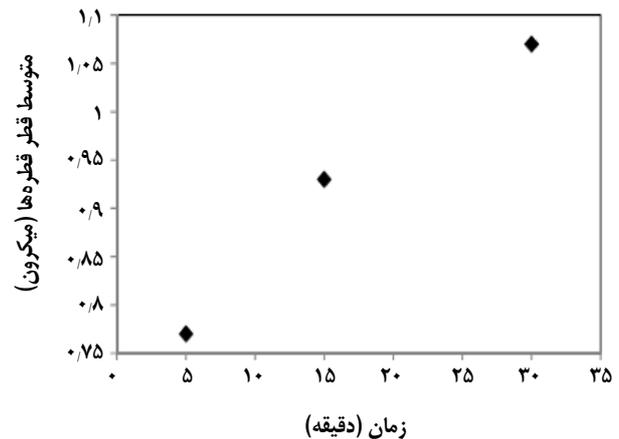
نتیجه‌های پژوهش‌های انجام شده به وسیله‌ی دیگر پژوهشگران نیز این مطلب را تأیید می‌کند. به عنوان مثال مونجنوت در پژوهشی که بر روی امولسیون سازی با استفاده از فراصوت انجام داد، گزارش کرد که افزایش زمان سونیکاسیون تا ۱۰ دقیقه اندازه ذرات را کاهش داد اما زمان سونیکاسیون بیش از ۱۰ دقیقه موجب افزایش قطر ذرات و در هم آمیختگی آن‌ها شد [۱۲].

لئون نیز در گزارشی اعلام کرد که اندازه ذرات با افزایش زمان سونیکاسیون کاهش یافت اما روند تغییرات آن از یک سامانه امولسیونی به سامانه دیگر متفاوت بود و عامل‌هایی چون شرایط فرایند و نوع امولسیفایر بر این روند مؤثر بود [۱۳]. در پژوهشی نیز که در سال ۲۰۰۹ میلادی برای شکستن امولسیون‌های نفتی توسط امواج فراصوت صورت گرفت، در مدت زمان ۱۰ دقیقه، نسبت هیدراته ۹۷/۷ درصد به دست آمد. امولسیون نفت مورد آزمایش از میدان نفتی داگانگ در چین با ۳۵ درصد آب تهیه شد [۹].

نتیجه‌های بررسی بدون رنگ تغییرهای ظاهری نمونه‌های امولسیون بعد از اعمال فراصوت مشخص ساخت که بعضی از نمونه‌ها به طور کامل و برخی به طور نسبی دچار تغییر فاز شدند که بسته به دامنه تغییرات بیشتر ۴ فاز مشخص دیده شد: لایه جامد یا رسوبات، لایه سرم، لایه میانی یا خامه و لایه روین یا روغن.

در شکل ۴ شاخص خامه‌ای شدن و سرعت تشکیل لایه سرم برای نمونه‌های جدا شده توسط میدان ایستای امواج فراصوت داده شده است. چنان که دیده می‌شود نمونه‌ها دچار تغییر فاز شدند هرچند میزان خامه‌ای شدن در آنها متفاوت و بین ۱/۲۵ تا ۳۱/۲۵ درصد برای امولسیون ۵ درصد نفت در آب و ۸/۳ تا ۲۷/۱ درصد برای امولسیون ۱۰ درصد نفت در آب متغیر بود. از سوی دیگر شاخص خامه‌ای شدن امولسیون‌ها که با روش فراصوت تیمار شدند با افزایش زمان صدادهی به طور چشمگیری افزایش یافت.

به‌طور کلی خامه‌ای شدن یا به هم پیوستن گویچه‌های چربی به یکدیگر و جدا شدن آنها از فاز پیوسته در اثر اختلاف چگالی و اعمال نیروهای گرانشی و شناوری اتفاق می‌افتد. تأثیر زمان سونیکاسیون بر درشت شدن قطرات بیشتر مورد بررسی قرار گرفت. از سوی دیگر در شکل ۴ دیده می‌شود که افزون بر زمان صدادهی پارامتر موقعیت قرارگیری امولسیون در میدان فراصوت نیز کم و بیش بر سرعت دو فاز شدگی تأثیر دارد.

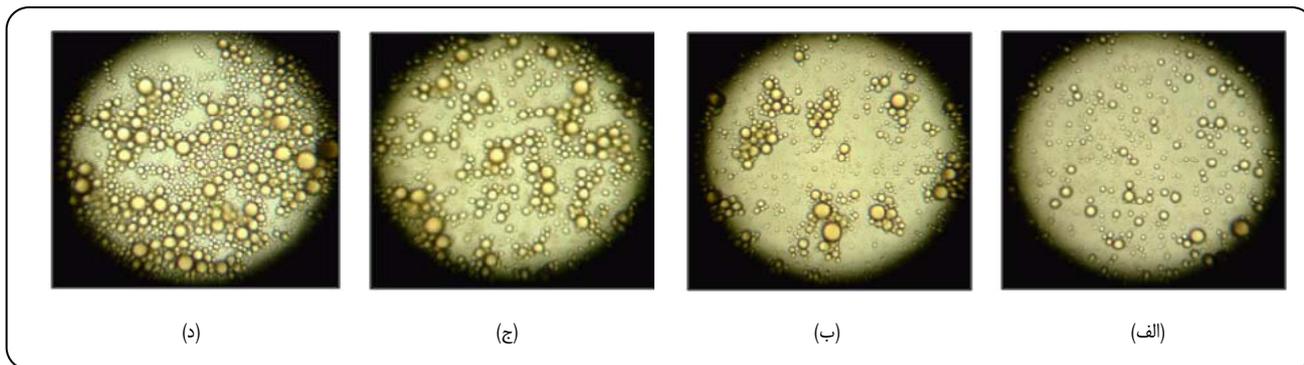


شکل ۲- تأثیر زمان صدادهی (دقیقه) بر اندازه قطر قطره‌های امولسیون (میکرون).

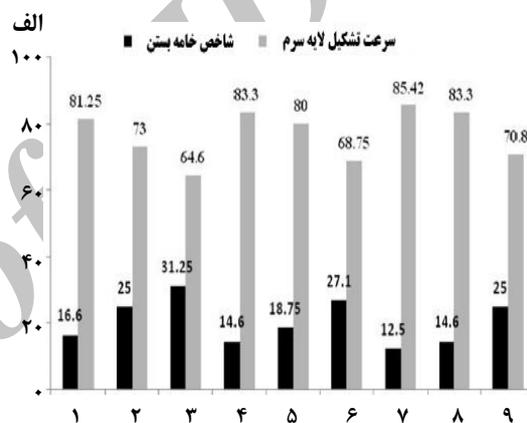
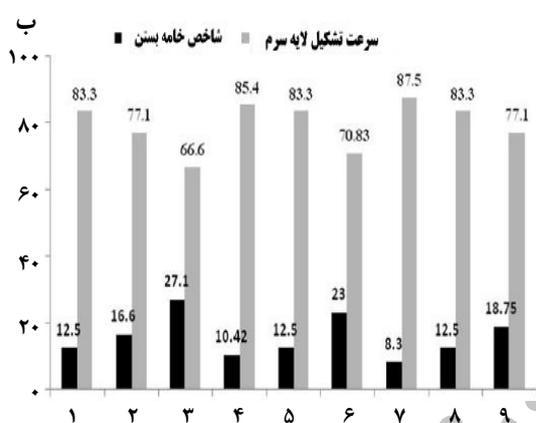
برای تمام موقعیت‌های قرارگیری امولسیون نسبت به منبع فراصوت، افزایش زمان صدادهی تا ۳۰ دقیقه به بزرگتر شدن قطره‌ها در میدان فراصوت کمک کرد. بنابراین در این بازه که از فاصله ۱۷/۵ سانتی‌متری منبع صوتی تا ۳۷ سانتی‌متر را شامل می‌شد، میدان امواج ایستا به صورت کامل تشکیل شد و افزایش زمان صدادهی به قطره‌های روغن در امولسیون فرصت بیشتری برای جابه‌جایی و سرانجام اتصال داد. نتیجه این واکنش‌ها، بزرگ‌تر شدن اندازه قطرات روغن بود. افزایش زمان صدادهی بیشتر اگرچه باعث افزایش اندازه‌ی متوسط قطر قطره‌ها می‌شد ولی سرعت افزایش تغییرها کاهش یافت. برای مثال از ۱۸/۷۷ درصد در ۱۵ دقیقه اول به ۱۶/۵۷ درصد در ۱۵ دقیقه دوم افت کرد.

بررسی مکانیسم جداسازی سامانه نفت خام در آب نیز افزایش اندازه قطرات نفت در امولسیون را با زمان صدادهی تا ۳۰ دقیقه تأیید کرد (شکل ۳). امولسیون اولیه پایدار بود و از ذره‌های ریزی تشکیل شده بود اما با قرارگیری در برابر امواج فراصوت برای مدت کوتاه ۵ دقیقه، قطره‌های کوچک نفت برای نیروی فراصوت به یکدیگر نزدیک شده و توده‌های نفتی را تشکیل دادند (شکل ۳ - ب). با گذشت زمان تعداد توده‌های نفتی زیادتر شد و بعضی از آنها در هم ادغام شدند و توده بزرگ‌تری را تشکیل دادند (شکل ۳ - ج). افزایش زمان تیمار با فراصوت، این روند را تندتر کرد و سرانجام باعث جدایی بیشتر دو فاز شد (شکل ۳ - د).

به طور معمول تغییر اندازه قطره‌های روغن نسبت به زمان در معرض بودن یا صدادهی به عامل‌های گوناگونی مانند انرژی صدا، کشش سطحی و گرانشی امولسیون، دما و سایر موارد



شکل ۳- تصویرهای میکروسکوپی از الف) امولسیون ۵ درصد نفت در آب، ب) امولسیون بعد از ۵ دقیقه صدادهی، ج) امولسیون بعد از ۱۵ دقیقه صدادهی، د) امولسیون بعد از ۳۰ دقیقه صدادهی با شدت ۲۰٪ و در فاصله ۳۷ سانتی متری از منبع فراصوت.



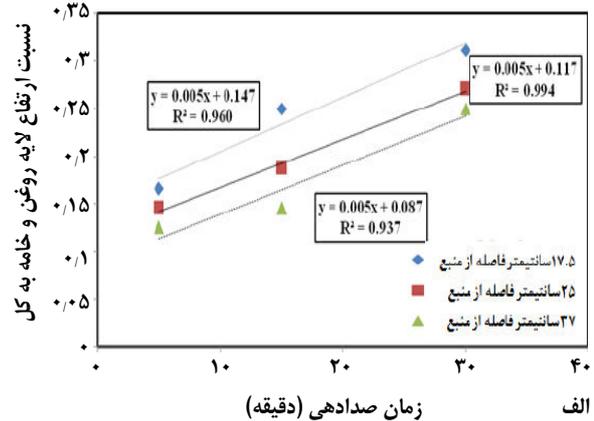
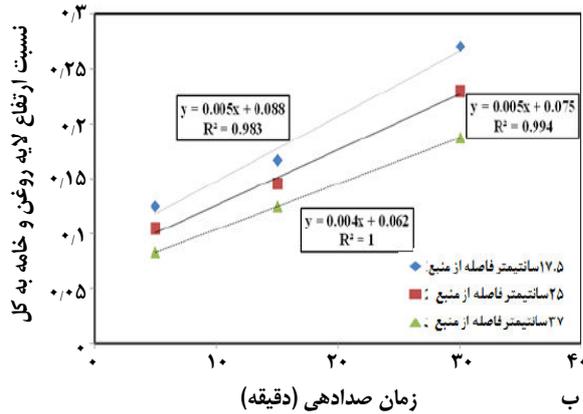
شکل ۴- محاسبه شاخص خامه بستن و سرعت تشکیل لایه سرم برای الف) امولسیون ۵ درصد نفت در آب، ب) امولسیون ۱۰ درصد نفت در آب برای حالت‌های به ترتیب زمان صدادهی (دقیقه) و فاصله از منبع صوتی (cm)، (۱) ۵-۱۷/۵، (۲) ۱۵-۱۷/۵، (۳) ۳۰-۱۷/۵، (۴) ۵-۲۵، (۵) ۳۰-۲۵، (۶) ۳۰-۲۵، (۷) ۵-۳۷، (۸) ۱۵-۳۷، (۹) ۳۰-۳۷.

مرحله نهایی و پایانی در هم آمیختگی تدریجی قطره‌ها می‌باشد. بنابر آنچه گفته شد می‌توان چنین استدلال کرد که در اثر وقوع انعقاد و خامه‌ای شدن، توده‌های روغن به صورت متراکم‌تر در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند و به تدریج دیواره آنها مسطح شده و در اثر ایجاد موج‌های موئینگی سطحی که با جنبش سامانه شکل می‌گیرند، پاره شده و در هم ادغام می‌شوند. به عبارت دیگر هر عاملی که موجب نزدیک شدن قطره‌ها به هم شود در بروز درهم آمیختگی و پس دهی روغن مؤثر است.

تغییرهای ارتفاع لایه خامه و سرم با زمان صدادهی در شکل ۵ برای نمونه‌های صدا دهی شده آورده شده است. این داده‌ها با تقریب خوبی به صورت خطی هستند ($1 < R^2 < 0.93$). با توجه به شیب نمودارها

تأثیر کلی این متغیر را می‌توان به افزایش اندازه قطره‌ها با نزدیک شدن به منبع تولید صوت توجیه نمود. چنانچه در شکل ۴ نیز دیده می‌شود افزایش نرخ خامه‌ای شدن با کاهش سرعت تشکیل لایه سرم همراه است. نرخ تشکیل لایه سرم برای امولسیون دارای ۵ درصد نفت، بین ۶۴/۶ تا ۸۵/۴۲ درصد و برای امولسیون دارای ۱۰ درصد نفت، بین ۶۶/۶ تا ۸۷/۵ درصد محاسبه شد. بهترین حالت برای امولسیون ۵ درصد نفت خام در آب در فاصله ۱۷/۵ سانتی متر از منبع فراصوت و مدت سونیکاسیون ۳۰ دقیقه بود که شاخص خامه‌ای شدن آن حدود ۳۱/۲۵ درصد به دست آمد.

همچنین در نمونه‌هایی که شاخص خامه‌ای شدن بالایی داشتند، روغن پس دادن نیز دیده شد که در حقیقت همان

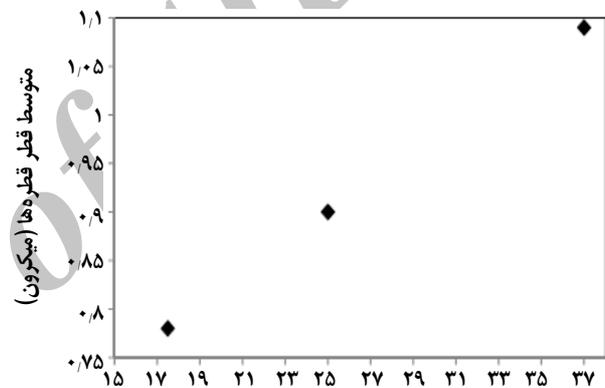


شکل ۵ - تغییرهای ارتفاع لایه روغن و سرم بر حسب زمان صدادهی برای الف) امولسیون ۵ درصد نفت در آب، ب) امولسیون ۱۰ درصد نفت در آب.

با افزایش فاصله از نقطه‌ای به فاصله ۱۷/۵ سانتی‌متر به ۲۵ سانتی‌متری منبع صدا، متوسط میزان قطر قطره‌های امولسیون ۱۷/۲۶ و از ۲۵ تا ۳۷ حدود ۱۱/۷ درصد کاهش یافت. اگرچه در تمام این موقعیت‌های قرارگیری امولسیون، قطر قطره‌ها نسبت به امولسیون پایدار اولیه بزرگتر بود اما با دور شدن از منبع صدا، شکست امولسیون با شیب کندتری افزایش یافت که نشان دهنده پایین بودن راندمان جداسازی نفت در این فاصله‌ها می‌باشد.

برای توجیه این روند دلیل‌های زیر را می‌توان برشمرد: تشکیل حباب‌های کاویتاسیون در فاصله‌های دورتر از منبع صدا و اغتشاش ناشی از حضور آنها در سامانه باعث شد موج‌های ایستا به شکل مناسبی در این منطقه‌ها تشکیل نشوند. همچنین در این ناحیه‌ها فشار آکوستیک به علت انرژی پایین آن کمتر بود و نیروی محرکه فراصوت شده بر قطره‌های نفت توانایی حرکت دادن این ذره‌ها به سمت محل‌های تجمع را نداشت. در تمامی پژوهش‌های انجام شده توسط پژوهشگران، اثر موقعیت امولسیون نسبت به منبع تولید فراصوت در نظر گرفته نشده است و این پژوهش اولین مورد در این زمینه است که برای تعمیم نتیجه‌ها نیاز به بررسی بیشتری است.

در فاصله ۱۷/۵ سانتی متر از منبع صدا و زمان صدادهی ۳۰ دقیقه، امولسیون نفت در آب به طور کامل جدا شد و لایه روغن سیاه رنگ بر روی سطح سل آزمایش قرار گرفت (شکل ۷-ب). در فاصله‌های دورتر ارتفاع لایه نفت جدا شده بر روی ظرف صدادهی متفاوت بود. عکس‌های گرفته شده توسط میکروسکوپ نشان داد که فرایند تجمع قطره‌ها و به هم پیوستگی آنها در فاصله‌های دورتر نیز اتفاق افتاده بود. میزان خامه‌ای شدن



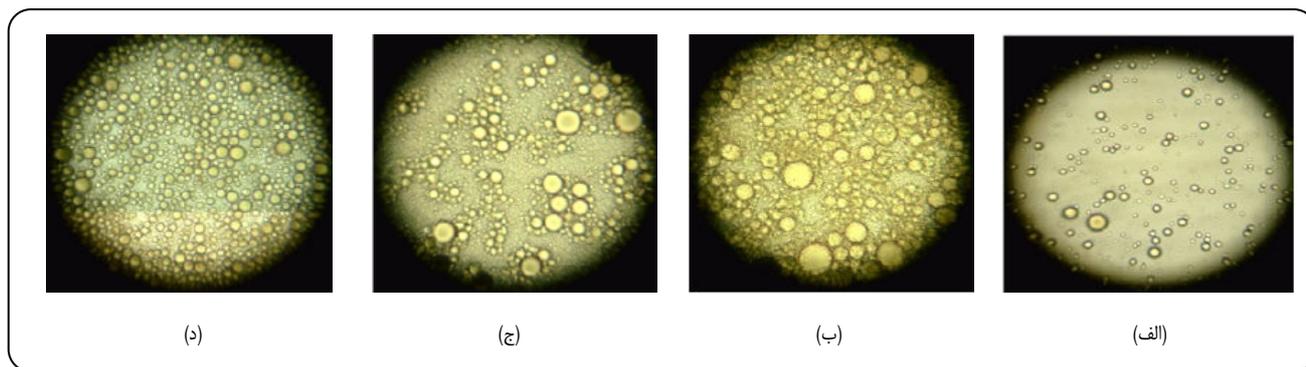
فاصله از منبع فراصوت (سانتی‌متر)

شکل ۶ - تأثیر فاصله نمونه از منبع فراصوت (سانتی‌متر) بر متوسط اندازه قطر قطره‌های امولسیون (میکرون).

دیده می‌شود که سرعت انعقاد در فرایند جداسازی برای هر سامانه امولسیون ثابت است. سرعت انعقاد در تمامی موقعیت‌های قرارگیری امولسیون نفت در میدان فراصوت، حدود ۰/۰۰۵ به دست آمد.

تأثیر موقعیت نمونه در میدان امواج ایستای فراصوت

نتیجه‌های تغییرهای میزان متوسط قطر قطره‌های امولسیون نفت در آب بر حسب فاصله‌های متفاوت از منبع صوت در شکل ۶ آورده شده است ($p < 0.05$). چنان که در شکل دیده می‌شود برای امولسیون پایدار نفت در آب با فاصله گرفتن از منبع تولید فراصوت میزان متوسط قطر قطره‌ها کم شد. به طوری که



شکل ۷- تصویرهای میکروسکوپی از الف) امولسیون ۵ درصد نفت در آب، امولسیون بعد از صدادهی با شدت ۲۰ درصد در فاصله‌های (سانتی‌متر) به ترتیب از منبع فراصوت، ب) ۱۷/۵، ج) ۲۵، د) ۳۷.

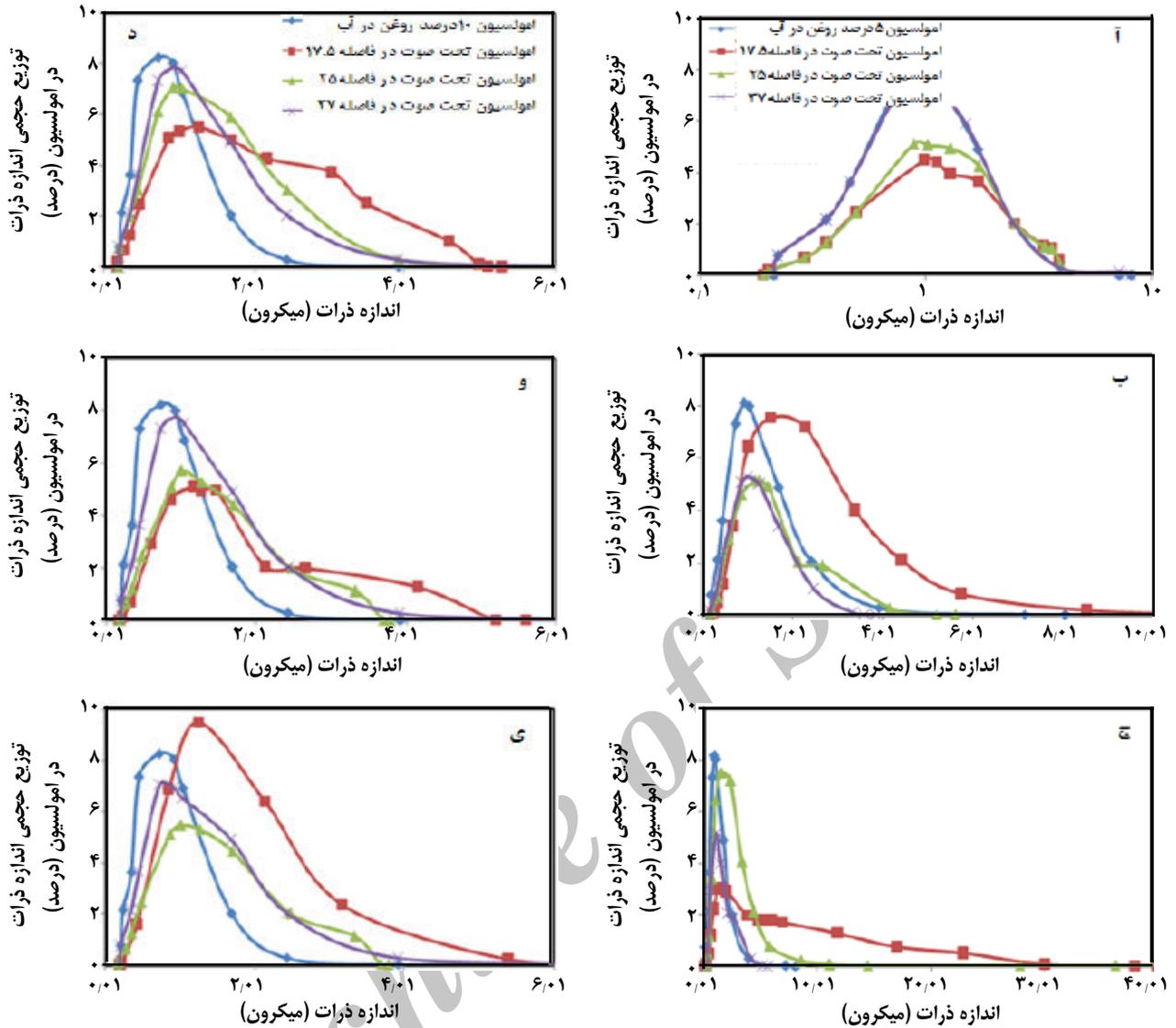
چنین نتیجه گرفت که امولسیون‌های صدا داده شده با امواج فراصوت دارای قطره‌های بزرگتر با توزیع اندازه غیریکنواخت تری ناشی از انعقاد قطره‌های روغن بودند.

تأثیر شدت صوت

همان‌گونه که در شکل ۹ دیده می‌شود، با افزایش شدت صدا در امولسیون نفت در آب در بازه تشکیل امواج ایستا (۲۰ تا ۷۵٪)، مقدار متوسط قطر قطره‌های نمونه‌های امولسیون افزایش و سپس کاهش یافت. با تحلیل نتیجه‌های تجزیه واریانس مشخص شد که متغیر شدت صدا تأثیر معنی‌داری بر روی میزان قطر قطره‌های امولسیون داشت ($P < 0.05$). در شدت صدای به کار رفته ۴۵٪ بیشترین میزان متوسط قطر که نتیجه بزرگتر شدن قطره‌های امولسیون در میدان فراصوت بود دیده شد که ناشی از اختلاط و تجمع قطرات روغن در نواحی پرفشار موج‌های ایستایی بود که در این شدت صوت به خوبی تشکیل شدند. شیب نزولی در نمودار شکل ۹ چندان دور از انتظار نیست زیرا سطح انرژی پیک‌های طیف که نشان دهنده شدت کل انفجار حباب‌ها است با زیاد شدن شدت صدا افزایش یافت. این روند کاهش به طور عمده به علت تکامل میدان کایتاسیون و ازدیاد تعداد حباب‌های فعال است. بنابراین دور از انتظار نیست که با زیاد شدن شدت صدا، تعداد حبابچه‌های فعال و شدت تلاشی و انفجار آنها بیشتر شود و در نتیجه میزان نرخ درشت شدن قطره‌ها کاهش یابد. پژوهش‌های سایر پژوهشگران حاکی از وابستگی وارونه راندمان جداسازی با شدت صدا می‌باشد. برای نمونه لاتام و همکاران تأثیر توان ورودی فراصوت ۴۳ و ۲۱/۷ میلی وات بر میلی‌لیتر امولسیون روغن گریس در آب بر روی راندمان جداسازی بررسی کرده

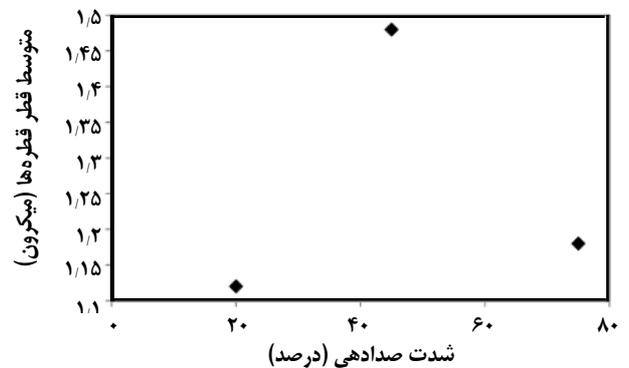
برای فاصله ۱۷/۵ سانتی متر و زمان صدادهی ۳۰ دقیقه، در امولسیون ۵ درصد نفت ۳۱/۲۵ درصد است در حالی که مقدار آن برای فاصله ۲۵ سانتی متر، ۲۷/۱ درصد و برای فاصله ۳۷ سانتی متری، ۲۵ درصد است. به عبارت دیگر با فاصله گرفتن از منبع تولید فراصوت، نرخ خامه‌ای شدن قطره‌های امولسیون کاهش می‌یابد. روند همانندی برای سایر زمان‌های صدادهی و امولسیون ۱۰ درصد نفت در آب دیده شد (شکل ۴). چنان که در شکل ۸ دیده می‌شود موقعیت قرارگیری امولسیون در میدان امواج ایستای فراصوت افزون بر قطر متوسط، بر سطح ویژه و دامنه توزیع اندازه ذره‌های امولسیون نیز تأثیر می‌گذارد. این منحنی نشان می‌دهد که توزیع اندازه ذره‌های امولسیون بعد از صدادهی، گستردگی و پراکندگی زیاد پیدا می‌کند که حاکی از بزرگ شدن قطره‌های امولسیون و به هم پیوستگی آنها است.

همان‌گونه که دیده می‌شود برای همه زمان‌های صدادهی (الف و ب و ..) امولسیون‌هایی که در فاصله ۱۷/۵ سانتی‌متری از منبع صدا قرار داشتند، افزون بر بزرگتر شدن قطر متوسط (جابه‌جایی میانه منحنی‌ها به سمت راست) توزیع گسترده تری از اندازه ذره‌ها نسبت به امولسیون پایدار اولیه پیدا کردند، که ناشی از به هم پیوستگی قطره‌های روغن و تشکیل توده‌های بزرگ از آنها می‌باشد. برای برخی از حالت‌ها در توزیع اندازه ذرات چندین پیک دیده می‌شود که نشان دهنده جدا شدن نسبی قطره‌های روغن و نیز تشکیل توده‌ای بزرگ از قطره‌ها است. به طور کلی امولسیون‌های اولیه دارای منحنی‌های توزیع اندازه قطره‌های تیزتر و باریک‌تری با متوسط قطر قطره‌های کوچکتری نسبت به امولسیون‌های صدا دهی شده بودند (شکل ۸). در نتیجه می‌توان

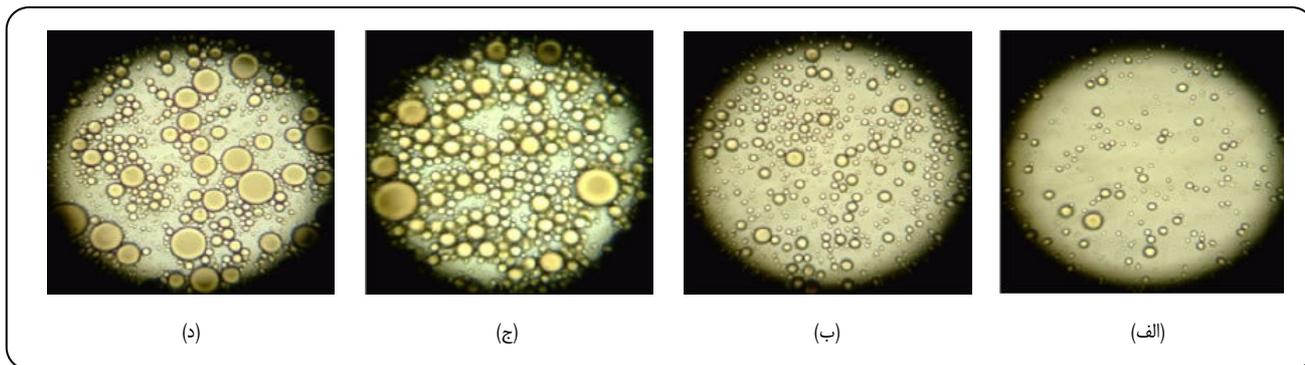


شکل ۸- نمودار توزیع حجمی اندازه قطره‌های امولسیون برای به ترتیب امولسیون با غلظت نفت (%) و مدت زمان صدادهی (دقیقه)، الف) ۵-۵ (ب) ۵-۱۵، ج) ۵-۳۰، د) ۵-۱۰ و ۱۰-۱۵، ی) ۱۰-۳۰.

و نتیجه‌های بهتری را برای شدت صدای کمتر گرفتند [۱۰]. سوسامی نیز به این نتیجه رسید که به کار بردن صدا با توان کمتر باعث افزایش راندمان جداسازی امولسیون روغن کانولا در آب می‌شود [۱۱]. از سوی دیگر در شکل ۱۰ دیده می‌شود که شدت صدا، سرعت دو فاز شدگی را زیاد کرد. بررسی نمونه‌های صدا داده شده نشان داد که در اغلب آنها انعقاد و به هم چسبیدگی قطره‌های نفت به طور گسترده‌ای گسترش یافته و لایه متراکمی از خامه ایجاد شده بود. همچنین نمونه‌های امولسیون در زمان صدادهی با شدت ۴۵٪ علاوه بر خامه‌ای شدن بخشی از روغن خود را نیز پس دادند. پس دادن روغن در حقیقت همان جدا شدن کامل روغن و آب است



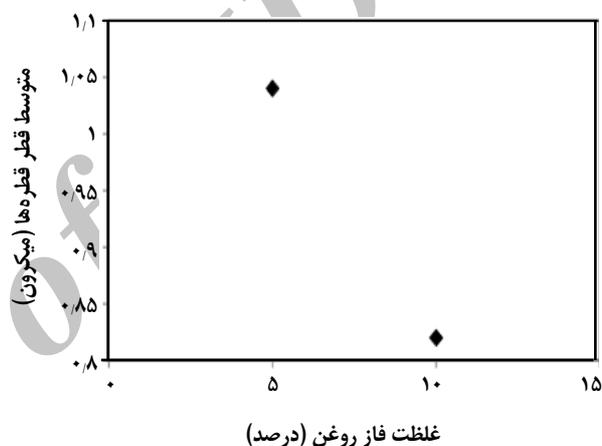
شکل ۹- تأثیر شدت صدادهی (%) بر متوسط اندازه قطر قطره‌های امولسیون (میکرون).



شکل ۱۰- تصویرهای میکروسکوپی از الف) امولسیون ۵ درصد نفت در آب، امولسیون بعد از صوت دهی با شدت (درصد) به ترتیب: (ب) ۲۰، (ج) ۴۵، (د) ۷۵.

پادگره‌ها کمتر می‌شود که در نتیجه احتمال برخورد آنها با یکدیگر و ایجاد انعقاد و یا در هم آمیختگی کمتر می‌شود. بعضی از پژوهشگران در مطالعات خود به نتیجه‌های همانندی با سامانه مورد آزمایش در این پژوهش رسیدند [۱۴]. کاهش راندمان جداسازی امولسیون با افزایش مقدار روغن مطرح شده، افت سرعت خامه ای شدن در غلظت های زیاد است. *باربوزا* در پژوهشی که بر روی تأثیر مقدار روغن بر روی رفتار رئولوژیکی سس مایونز انجام داد به این نتیجه رسید که با افزایش درصد روغن، ویژگی‌های ویسکو الاستیک مانند ضریب قوام و تنش تسلیم تغییر می‌کند. ضریب قوام را می‌توان به گرانروی و تنش تسلیم را به ایجاد شبکه سه بعدی در امولسیون نسبت داد. در این شرایط به علت ایجاد بر هم کنش های هیدرودینامیکی بین قطره‌ها سرعت خامه‌ای شدن کاهش می‌یابد [۱۵]. وانگ نیز با مطالعه بر روی امولسیون های نفت نتیجه گرفت افزایش میزان فاز روغنی در امولسیون اولیه، باعث پایدارتر شدن امولسیون خواهد شد [۱۶]. نتیجه‌های این پژوهش چنان که در نمودار شکل ۱۱ نیز دیده می‌شود با گزارش‌های اشاره شده مطابقت دارد. از طرف دیگر برخلاف نتیجه‌های قبلی تعدادی از پژوهشگران گزارش کرده اند که با افزایش درصد فاز پراکنده اندازه قطرات نیز افزایش یافته و آن را به تشدید سرعت برخورد و درهم آمیختگی در نسبت‌های بالای روغن ربط دادند [۱۸، ۱۷].

راندمان جداسازی در این پروژه به صورت نسبت درصد اختلاف اندازه متوسط قطر قطره‌های امولسیون قبل و بعد از صدا دهی به مقدار آن قبل از به کار بردن فراصوت تعریف شد. در این حالت مقدار راندمان جداسازی برای ۲ امولسیون ۵ و ۱۰ درصد نفت در آب در حالت‌های گوناگون موقعیت قرارگیری امولسیون در میدان فراصوت



شکل ۱۱- تأثیر غلظت فاز پراکنده (%) بر متوسط اندازه قطر قطره‌های امولسیون (میکرون)

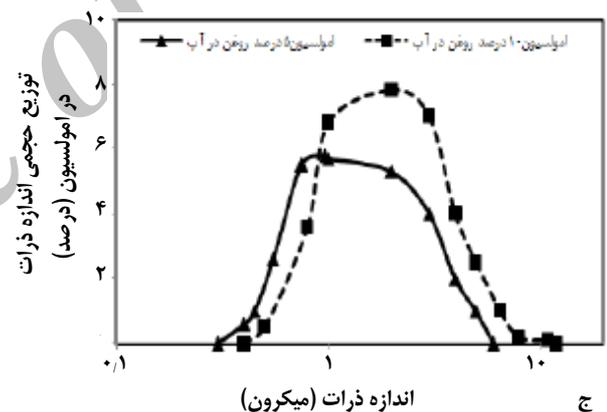
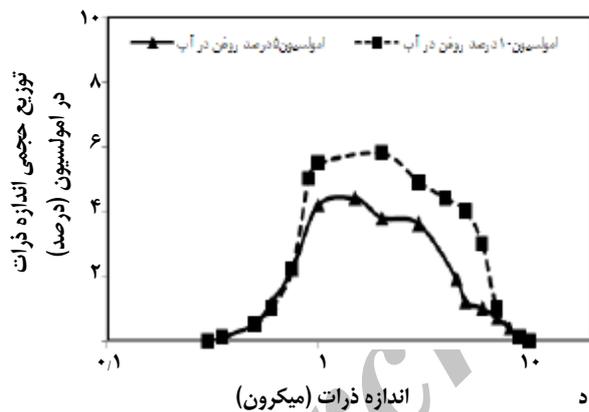
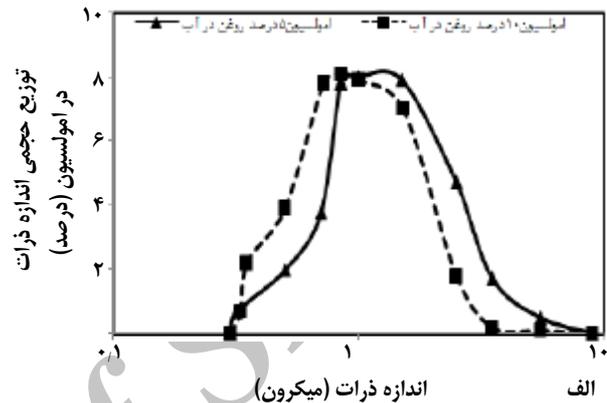
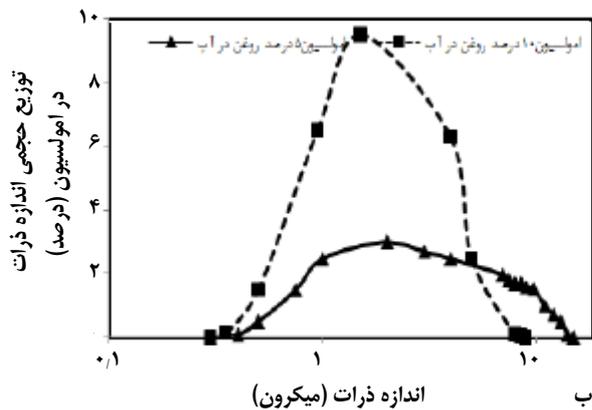
که مرحله نهایی و پایان در هم آمیختگی تدریجی قطرات می‌باشد. به این ترتیب سامانه به بیشینه ثبات ترمودینامیکی خود می‌رسد زیرا در این شرایط سطح مشترک آب/نفت تا حد کمینه خود کاهش می‌یابد.

تأثیر نسبت روغن به آب در امولسیون

بررسی تأثیر نسبت های گوناگون نفت خام به آب در نمونه‌های امولسیون مورد مطالعه بر روی قطر متوسط قطره‌ها (شکل ۱۱) نشان‌دهنده این بود که با افزایش درصد فاز پراکنده از ۵ به ۱۰، روند افزایشی اندازه قطره‌ها در میدان امواج ایستا حدود ۱۹/۶۵ درصد کاهش یافت ($p < 0.05$). تصور می‌شود بتوان رابطه‌ای را بین افزایش قطر قطره‌ها و گرانروی فاز پیوسته برقرار کرد. با افزایش درصد روغن گرانروی این فاز نیز افزایش می‌یابد. در این شرایط آزادی عمل حرکت و جابه‌جایی قطره‌ها به سوی

جدول ۱- محاسبه راندمان جداسازی ۲ نوع امولسیون برای حالت‌های گوناگون زمان صوت‌دهی و فاصله از منبع فراصوت.

راندمان جداسازی (درصد)	امولسیون ۵ درصد روغن در آب			امولسیون ۱۰ درصد روغن در آب		
	۵ دقیقه	۱۵ دقیقه	۳۰ دقیقه	۵ دقیقه	۱۵ دقیقه	۳۰ دقیقه
۱۷٫۵ سانتیمتر فاصله از منبع	۲۵٫۷۱	۸۰	۱۳۷٫۱۴	۲۴٫۶۱	۴۱٫۵۴	۶۱٫۵۴
۲۵ سانتیمتر فاصله از منبع	۱۴٫۲۸	۴۱٫۴۳	۷۱٫۴۳	۱۳٫۸۴	۲۷٫۷	۳۳٫۸۵
۳۷ سانتیمتر فاصله از منبع	۷٫۱۴	۱۵٫۷۱	۳۸٫۵۷	۶٫۱۵	۱۵٫۳۸	۲۱٫۵۴



شکل ۱۲- نمودار توزیع حجمی اندازه قطره‌ها برای دو امولسیون ۵ و ۱۰ درصد نفت در آب برای زمان صدادهی ۳۰ دقیقه با شدت ۲۰٪ به ترتیب برای الف) امولسیون‌های اولیه، ب) امولسیون در فاصله ۱۷٫۵ سانتی‌متر، ج) امولسیون در فاصله ۲۵ سانتی‌متر، د) امولسیون در فاصله ۳۷ سانتی‌متر از منبع سوخت.

توزیع اندازه قطرات دو امولسیون بدون درنگ بعد از استفاده از اعمال فراصوت در نمودار ۱۲ ترسیم شده است. همان گونه که دیده می‌شود منحنی‌های توزیع اندازه قطره‌ها در دو امولسیون تیمار شده با فراصوت (شکل ۱۲- ب، ج و د) با منحنی‌های توزیع اولیه دو امولسیون (شکل ۱۲- الف) متفاوت است که طبق توضیحات داده شده مربوط به اثر امواج فراصوت بر امولسیون می‌باشد. از سوی دیگر این منحنی‌ها نشان می‌دهند که منحنی توزیع اندازه ذره‌ها برای امولسیون تیمار شده به روش فراصوت

و زمان‌های در معرض بودن در جدول ۱ محاسبه شد. راندمان جداسازی برای امولسیون رقیق تر بیشتر است. برای مثال راندمان جداسازی برای امولسیون ۵ درصد نفت خام و فاصله ۲۵ سانتی‌متر از منبع فراصوت برای مدت در معرض بودن ۱۵ دقیقه، ۴۱٫۴۳ درصد و برای امولسیون ۱۰ درصد نفت خام در آب، ۲۷٫۷ درصد است. یا مقدار راندمان شکست امولسیون اول برای همین فاصله از پروب فراصوت ولی مدت زمان صدادهی ۳۰ دقیقه، ۷۱٫۴۳ درصد و برای امولسیون دوم، ۳۳٫۸۵ درصد است.

جدول ۱- محاسبه راندمان جداسازی ۲ نوع امولسیون برای حالت‌های گوناگون زمان صدادهی و فاصله از منبع فراصوت.

امولسیون ۵ درصد روغن در آب				
شماره نمودار	نمودار ۱۲ - الف	نمودار ۱۲ - ب	نمودار ۱۲ - ج	نمودار ۱۲ - د
سطح ویژه (m ² /mL)	۷,۹۱	۳,۵۲۸۸	۴,۷۱۱۷	۵,۴۴۲۵
گسترده‌گی	۱,۶۲	۲,۲۸	۱,۷۲	۱,۵۶
امولسیون ۱۰ درصد روغن در آب				
شماره نمودار	نمودار ۱۲ - الف	نمودار ۱۲ - ب	نمودار ۱۲ - ج	نمودار ۱۲ - د
سطح ویژه (m ² /mL)	۷,۹۱	۵,۵۰۲۶	۶,۵۴۵۳	۷,۹۸۱۲
گسترده‌گی	۱,۲۹	۱,۵۱	۱,۴۲	۱,۶۴

نتیجه این فعالیت‌ها درشت‌تر شدن قطره‌های روغن و در نتیجه کاهش سطح آزاد آنها بود. نکته دارای اهمیت دیگر این است که گرچه اعمال فراصوت در شکستن هر دو امولسیون مؤثر بود تصور می‌شود در امولسیون غلیظ تر به علت کاهش انرژی امواج صدا، میزان مهاجرت قطره‌ها به نواحی پرفشار به کمترین میزان ممکن کاهش یافته و مانع از تجمع، انعقاد و امتزاج قطرات شده است.

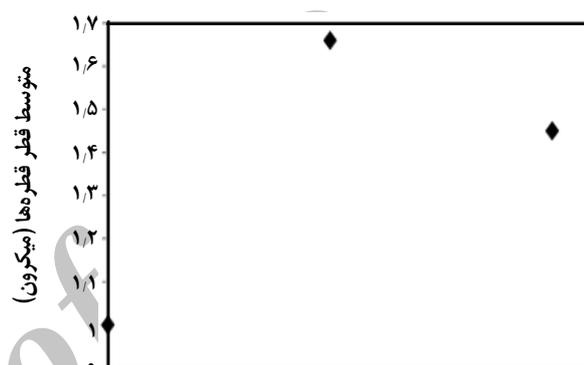
تأثیر نمک در امولسیون

چنان که از نمودار شکل ۱۳ پیداست روند کلی تغییر قطر قطره‌ها در پاسخ به حضور سطح‌های گوناگون نمک افزایشی است، به عبارت دیگر با افزوده شدن غلظت الکترولیت قطر قطره‌ها زیاد می‌شود. این افزایش در اندازه قطرات را می‌توان از روش تأثیر نمک بر روی نیروهای الکترواستاتیکی سطح آنها توضیح داد. به‌طور کلی در سیستم‌های امولسیونی که توسط نیروهای الکتریکی سطحی پایدار شده‌اند اطراف گویچه‌ها را ابری از ذرات با بار الکتریکی ناهمنام با بخشهای باردار سطح قطره فرا گرفته است که مانع از نزدیک شدن قطره دیگری به آن می‌شود. ضخامت ابر یونی (K^{-1}) به شدت به قدرت یونی محیط (I) وابسته است:

$$K^{-1} = 0.304 I^{-1/2} \quad (2)$$

افزایش قدرت یونی باعث کاهش ضخامت ابر یونی می‌شود. در این حالت قطرات روغن راحت‌تر می‌توانند به یکدیگر نزدیک شوند. کاهش فاصله بین قطرات روغن به نوبه خود باعث ایجاد فعل و انفعالات دیگری از جمله تشکیل اتصالات عرضی و انعقاد آنها با یکدیگر شده که برآیند این تغییرات افزایش قطر قطره‌ها است.

روند تغییر اندازه متوسط قطر قطره‌ها نشان دهنده این است که افزایش غلظت محلول نمک از ۰ به ۵ درصد در فاز آبی باعث



غلظت سدیم کلرید در امولسیون (درصد)

شکل ۱۳- تأثیر حضور نمک سدیم کلرید در امولسیون (% بر متوسط اندازه قطر قطره‌های امولسیون (میکرون))

پهن تر و گسترده تر از توزیع اندازه در دو امولسیون اولیه است. تفاوت در شکل ظاهری منحنی‌ها در قسمت‌های ب، ج و د نشان‌دهنده تأثیر بیشتر روش فراصوت در جداسازی قطره‌های امولسیون ۵ درصد نفت خام می‌باشد. نتیجه‌های تغییر میزان سطح ویژه قطره‌ها و نیز مقدار گسترده‌گی داده‌ها (span) دو امولسیون نفت در آب بر حسب فاصله‌های متفاوت از منبع صدا در جدول ۲ آورده شده است. روند تغییرها برای دو امولسیون با موقعیت‌های صدادهی گوناگون همانند می‌باشد. چنان که دیده می‌شود برای تمام فاصله‌های قرارگیری نمونه در محفظه آزمایش، اندازه سطح ویژه قطره‌های امولسیون نسبت به مقدار اولیه در نتیجه سونیکاسیون کاهش یافت. این نتیجه‌ها نشان دهنده آن است که ایجاد میدان امواج فراصوت ایستا در سامانه مورد آزمایش موجب منعقد شدن و تجمع قطره‌ها روغن در کنار یکدیگر شد که به تدریج در هم آمیختگی آنها را نیز در پی داشت.

در راستای انتشار امواج بر سرعت و دامنه به هم پیوستگی قطره‌ها یکسان نیست.

• قدرت میدان فراصوت بر شدت کاویتاسیون و تنش برشی ناشی از انفجار حبابچه‌ها و در نتیجه میزان اندازه ذرات تأثیر می‌گذارد. به طور کلی با افزایش شدت صدا بیش از یک حد بحرانی از راندمان جداسازی کاسته می‌شود.

• با افزایش نسبت روغن به آب، اندازه قطرات بعد از صدادهی افزایش می‌یابد که به تشدید سرعت برخورد و درهم آمیختگی در نسبت‌های بالای روغن بستگی دارد.

• همچنین افزایش قدرت یونی محیط از روش افزودن نمک باعث کاهش بار الکتریکی سطحی قطره‌ها و کم شدن دافعه الکترواستاتیک بین آنها و در نتیجه انعقاد و درهم آمیختگی بیشتر قطره‌ها و افزایش راندمان جداسازی می‌شود. شایان گفتن است که برای غلظت نمک مقدار بهینه‌ای وجود دارد که در بالاتر از آن، اثرات سوئی بر راندمان جداسازی دارد.

با توجه به این که استفاده از میدان پر قدرت امواج ایستای فراصوت برای اولین بار برای جداسازی امولسیون‌های پایدار نفت خام در آب مورد استفاده قرار گرفت، در این زمینه به مطالعه و بررسی بیشتری نیاز است.

نظر به این که پایداری امولسیون‌های گوناگون از روی برآیند خالص برهم کنش اجزا با یکدیگر و تأثیر شرایط محیطی بر روند این فعل و انفعالات تعیین می‌شود در نتیجه بررسی سایر شرایط مؤثر در روند این تغییرات در پژوهش‌های بعدی توصیه می‌شود. شناسایی مکانیسم‌های مربوط به ناپایدار شدن امولسیون‌ها نیز در اثر امواج فراصوت لازم به نظر می‌رسد.

رشد قطر قطره‌ها روغن شد. سایر پژوهشگران نیز تأثیر حضور نمک بر روی پایداری امولسیون را تأیید کرده‌اند. افزایش غلظت محلول نمک به ۱۰ درصد میزان جدایش دو فاز را کاهش داد. علت روی دادن این رویداد مشخص نیست و نیاز به مطالعات تکمیلی است. با این حال تصور می‌شود برهم کنش‌های الکتروستاتیکی و نیروهای الکتروویسکوز در آن مؤثر باشند.

نتیجه گیری

نتیجه‌های مطالعه‌های انجام شده در این پژوهش نشان داد که امواج ایستای فراصوت توانایی لازم برای جداسازی امولسیون‌های پایدار نفت در آب و درشت کردن قطرات روغن تا چندین برابر اندازه اولیه را دارند. با این حال راندمان جداسازی به شدت به عامل‌های گوناگونی از جمله شدت صدا، موقعیت نمونه نسبت به منبع فراصوت و زمان صدادهی وابسته است. نکته دیگری که در شکست امولسیون با امواج ایستای فراصوت شدت بالا دارای اهمیت است و نتیجه‌های این مطالعه نیز تأیید کننده آن است درصد فاز پراکنده و حضور ترکیبات نمک در امولسیون است که هر یک به شکل خاصی بر راندمان جداسازی تأثیر می‌گذارند. به طور کلی موردهای زیر را می‌توان به عنوان نتیجه‌های برجسته این طرح پژوهشی بر شمرد:

• مدت زمان سونیکاسیون و اعمال امواج فراصوت بر قطر متوسط، سطح ویژه و دامنه توزیع اندازه ذره‌های امولسیون تأثیر می‌گذارد. برای هر سامانه امولسیونی، زمان سونیکاسیون بهینه‌ای وجود دارد که به اجزای تشکیل دهنده و شرایط محیطی آن وابسته است. به طور کلی افزایش زمان صدادهی باعث افزایش شکست و جداسازی فازهای امولسیون می‌شود.

• اگر چه استفاده از امواج ایستای فراصوت در شکستن امولسیون مؤثر است اما راندمان جدایش بسته به فاصله نمونه از منبع صدا متفاوت است. به عبارت دیگر تأثیر همه نقاط

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۹/۲۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۹/۶

مراجع

- [1] Ese M. H., Gawrys K.L., Pilpatrick P.K., Asphaltene and Naphthenate Mechanisms of Emulsion Stabilization in Water-in-Crude Oil Emulsions, *Abstracts of Papers of the American Chemical Society*, **225**, p. 457-COLL, (2003).
- [2] Wasan D., Emulsion-Stability Mechanisms: Applications to Demulsification of Water in Crude-Oil Emulsions, *Abstracts of Papers of the American Chemical Society*, **219**, p. 32-IEC, (2000).

- [3] Anonymous, Fuel Research; Research from B. Borges et al Has Provided New Information about Fuel Research, *Energy Weekly News*, **2 October**, p. 267 (2009).
- [4] Anonymous, Fuel Research; Studies from Tianjin University Update Current Data on Fuel Research, *Energy Business Journal*, **4 Mar**, p. 216 (2009).
- [5] Poindexter M.K., Marsh S.C., Inorganic Solid Content Governs Water-in-Crude Oil Emulsion Stability Predictions, *Energy & Fuels*, **23**, p. 1258 (2009).
- [6] Sjoblom J., Mingyuan L., Christy A.A., Gu T., Water-in-Crude-Oil Emulsions from the Norwegian Continental-Shelf .7. Interfacial Pressure and Emulsion Stability, *Colloids and Surfaces*, **66**, p. 55 (1992).
- [7] Pangu G.D., Feke D.L., Acoustically Aided Separation of Oil Droplets from Aqueous Emulsions, *Chemical Engineering Science*, **59**, p. 3183 (2004).
- [8] Ye G., Lu X., Application of Ultrasound on Crude Oil Pretreatment, *Chemical Engineering and Processing*, **47**, p. 2346 (2008).
- [9] Yang X.G., Tan W., Tan X., Demulsification of Crude Oil Emulsion via Ultrasonic Chemical Method, *Petroleum Science and Technology*, **27**, p. 2010 (2009).
- [10] Stack L.J., Carney P.A., Factors Influencing the Ultrasonic Separation of Oil-in-Water Emulsions, *Ultrasonics Sonochemistry*, **12**, p. 153 (2005).
- [11] Nii S., Kikumoto S., Quantitative Approach to Ultrasonic Emulsion Separation, *Ultrasonics Sonochemistry*, **16**, p. 145 (2009).
- [12] Mongent N., Charrier S., Chalier P., Effect of Ultrasound Emulsification on Cheese Aroma Encapsulation by Carbohydrates, *Journal of Agricultural and Food chemistry*, **48**, p.861 (2000).
- [13] Leong T.S.H., Wooster T.J., Kentish S.E., Ashokkumar M., Minimising Oil Droplet Size Using Ultrasonic Emulsification, *Ultrasonics Sonochemistry*, **16**, p. 721 (2009).
- [14] Behrand O., Ax K., Schubert H., Influence of Confinuous Phase Viscosity on Emulsification by Ultrasound, *Ultrasonic Sonochemistry*, **7**, p. 77 (2000).
- [15] Ma L., Barbosa-Canavas V., Rheological Characterization of Mayonnaise. Part II: Flow and Viscoelastic Properties at Different Oil and Xanthan Gum Concentrations, *Journal of Food Engineering*, **25**, p. 409 (1995).
- [16] Wang X., "Crude Oil Emulsion Stability Determination and Its Implications in Enhanced Oil Recovery," Ph.D. Thesis, University of Wyoming, United States -- Wyoming.
- [17] Baloch M.K., Hamead G., Emulsification of Oil in Water as Affected by Different Parameters, *Journal of colloid and Interface Science*, **285**, p. 804 (2005).
- [18] Clause D., Gomez F., Dalmazzone C., Noik C., A Method for the Characterization of Emulsions, Thermogrulometry: Application to Water-in-Crude Oil Emulsion, *Journal of Colloid and Interface Science*, **287**, p. 694 (2005).