



Experimental Study on Emulsion Stability: Application of Static Mixers for Dispersion of Water in Crude Oil

Mehdi Mohammadi^{1*}, Ali Pirzadeh²

¹ Assistant Professor in Refining Technologies Development Division, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI)

² M.Sc. in Refining Technologies Development Division, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI)

Received: 15 Feb 2023

Accepted: 4 Apr 2023

Abstract

Mixing or dispersing operation is an important section in chemical processes. Because of several advantages like: low capital cost, low operating cost, low maintenance cost and low required space; static mixers are applied in many industries. In crude oil desalting process, static mixers for dispersion of the dilution water in crude oil is proposed by this study; which conventionally a mixing valve is used. Type of the static mixer in the applied operating conditions effects on the properties and the stability of the resulted emulsion. In a pilot scale setup, three types of SMV, HMS and LPD static mixers have been investigated; for different conditions of water fraction (2-15%) and crude oil flow rate (86-144 l/h). The experimental results show that SMV outcomes the most stable emulsion which is not appropriate for desalting process. Against, LPD is the optimal choice for the said application, regarding to the emulsion properties.

Keyword: Static Mixer, Emulsion Stability, Desalting Process, Crude oil.

* mohammadym@ripi.ir

بررسی تجربی پایداری امولسیون: کاربرد استاتیک میکسر به منظور اختلاط آب در نفت خام

مهدی محمدی^{۱*}، علی پیرزاده^۲

^۱ مرتبه دکترا، استادیار مهندسی شیمی، پژوهشکده توسعه فناوری‌های پالایش، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران

^۲ کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، پژوهشکده توسعه فناوری‌های پالایش، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران

دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۶ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۱۵

چکیده

عملیات اختلاط یک بخش مهم در فرآیندهای شیمیایی محسوب می‌شود. به دلیل مزایایی نظیر: هزینه ساخت و هزینه عملیاتی پایین، هزینه تعمیر و نگهداری پایین و فضای کم مورد نیاز، استاتیک میکسرها در بسیاری از صنایع بکار می‌روند. این تحقیق، استفاده از استاتیک میکسرها را به منظور اختلاط آب شستشو با نفت خام در فرآیند نمک‌زدایی پیشنهاد می‌کند؛ که در حال حاضر کاربرد شیر اختلاط رایج می‌باشد. نوع استاتیک میکسر و شرایط عملیاتی بر روی ویژگی‌ها و پایداری امولسیون حاصله اثرگذار هستند. سه نوع استاتیک میکسر با نام‌های تجاری SMV، HMS و LPD در شرایط عملیاتی متفاوت شامل درصد آب (۱۵-۲) و دبی نفت خام (۸۶-۱۴۴ l/h) در مقیاس پیلوت مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج تجربی نشان داد استاتیک میکسر نوع SMV پایداریترین امولسیون را ایجاد می‌کند که برای فرآیند نمک‌زدایی مناسب نیست. در مقابل، با توجه به ویژگی‌های امولسیون، استاتیک میکسر نوع LPD بهترین انتخاب برای این کاربرد است.

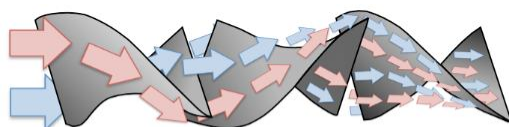
کلمات کلیدی: استاتیک میکسر، پایداری امولسیون، فرآیند نمک‌زدایی، نفت خام.

* mohammadym@ripi.ir

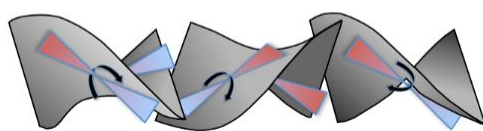
۱- مقدمه

عملیات اختلاط مواد یکی از بخش‌های مهم در فرآیندهای شیمیایی محسوب می‌شود. همزن‌های متحرک که نیازمند بکارگیری یک موتور برقی برای چرخش و یک مخزن حجیم برای نگهداری مواد می‌باشند، به مرور در حال جایگزینی با تجهیز استاتیک میکسر هستند. کاربرد این تجهیزات به علت پایین بودن هزینه ساخت، هزینه عملیاتی و هزینه نگهداری و اشغال فضای کمتر، گسترش زیادی یافته است. امروزه انواع استاتیک میکسرها در صنایع شیمیایی، صنایع غذایی، صنایع معدنی، رنگ و رزین، پالایشگاه و پتروشیمی، صنایع دارویی، پلاستیک و پلیمر، کاغذ و صنایع سلولزی و همچنین صنایع آب و تصفیه فاضلاب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در برخی از کاربردها، عملیات اختلاط می‌تواند بصورت همزمان با سایر مراحل فرآیندی انجام شود که موجب گسترش استفاده از استاتیک میکسرها شده است [۱]. واکنش‌های شیمیایی، اختلاط گازها و مایعات، همگن‌سازی مایعات امتزاج ناپذیر، تماس فازهای گاز-مایع برای افزایش سرعت انتقال جرم در واکنش‌های گاز-مایع، بهبود انتقال حرارت در سیالات با ویسکوزیته بالا، و اختلاط جامدات نمونه‌هایی از این فرآیندها می‌باشند [۲].

همزن استاتیک یک دستگاه مهندسی دقیق برای اختلاط پیوسته‌ی سیالات است. معمولاً سیالات مخلوط شونده مایع هستند. اما از استاتیک میکسرها می‌توان در اختلاط جریان‌های گازی، پراکندگی گاز درون مایع و یا در ترکیب مایعات غیر قابل امتزاج نیز استفاده کرد. انرژی مورد نیاز برای اختلاط (افت فشار استاتیک میکسر) از طریق پمپ خوراک تأمین می‌شود. مطابق شکل ۱ بر اساس هندسه استاتیک میکسرها، دو رژیم جریان مختلف (خردایش جریان و اختلاط شعاعی) برای انجام عملیات اختلاط بین دو سیال عمل می‌کند [۱].



Flow Division



Radial Mixing

شکل ۱- دو رژیم مختلف جریان برای اختلاط در استاتیک میکسرها، بالا: تسهیم جریان، پایین: اختلاط شعاعی

استاتیک میکسرها در فرآیندهای پیوسته، جایگزین مناسبی برای همزن‌های معمولی هستند؛ زیرا عملکرد مشابه و گاهی اوقات بهتری را می‌توان با هزینه کمتری به دست آورد. این تجهیزات بی‌حرکت، معمولاً مصرف انرژی پایین‌تر و نیاز به تعمیر و نگهداری کمتری دارند زیرا هیچ قطعه متحرکی ندارند. آنها می‌توانند خوراک با غلظت کنترل شده‌تری را در سیستم‌های بسته تولید کرده و جریان مخلوط همگنی را با حداقل زمان اقامت فراهم کنند [۳]. برخی از مزایای بالقوه استاتیک میکسرها در مقایسه با مخازن همزن‌دار معمولی، در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مزایای بالقوه استاتیک میکسر نسبت به مخازن های دارای همزن مکانیکی [۱]

همزن مکانیکی	استاتیک میکسر
نیاز به فضای زیاد	نیاز به فضای کم
هزینه ساخت تجهیزات زیاد	هزینه ساخت تجهیزات کم
مصرف توان زیاد برای چرخش کل محتویات درون مخزن	مصرف توان کم در حد افت فشار (تأمین از طریق پمپ)
مشکل نشت‌بندی محل ورود شفت همزن به مخزن	بدون مشکلات اجزای متحرک
زمان اقامت زیاد	زمان اقامت کم
زمان اقامت غیر یکنواخت (توزیع نامایی زمان اقامت)	نزدیک به جریان پلاگ کامل
نرخ برشی محلی بالا که می‌تواند به مواد حساس آسیب بزند	اختلاط ملایم با نرخ برشی پایین
نوسان درجه یکنواختی مخلوط	یکنواختی کامل مخلوط بدون نوسان
نیاز به تمیزکاری تجهیزات	عدم نیاز به تمیزکاری تجهیزات

اگرچه تا سال ۱۹۷۰ کاربرد استاتیک میکسرها در صنایع فرآیندی چندان رایج نشد، ولی ثبت اختراع آن بسیار قدیمی‌تر است و به سال ۱۸۷۴ برمی‌گردد که یک استاتیک میکسر تک المانی و چند لایه برای اختلاط هوا با سوخت گازی ثبت گردید [۴]. در همان سال‌های دور یک ثبت اختراع اولیه فرانسوی از المان‌های مارپیچ برای اختلاط در یک لوله استفاده کرد [۵] و یک ثبت اختراع فرانسوی دیگر یک طراحی چند المانی را برای اختلاط مواد جامد معرفی کرد [۶]. استفاده از قطعاتی با هندسه مشابه استاتیک میکسرها با هدف بهبود انتقال حرارت، در دهه ۱۹۵۰ ثبت اختراع شد [۷]. نهایتاً در دهه‌های اخیر، بسیاری از شرکت‌های پالایشی و پتروشیمیایی، استفاده از طراحی‌های مختلف استاتیک میکسرهای تجاری شده را توسعه دادند [۸].

در حال حاضر حدود ۲ هزار ثبت اختراع ایالات متحده و بیش از ۸ هزار مقاله علمی در مورد استاتیک میکسرها و کاربردهایشان منتشر شده و بیش از ۳۰ مدل تجاری از آنها در دسترس است. استاتیک میکسر شامل یک سری قطعات یکسان و بی حرکت است که به آن‌ها المان می‌گویند و می‌توان آنها را در لوله‌ها، ستون‌ها و یا راکتورها نصب کرد. هدف این المان‌ها که بصورت پی‌درپی در ساختار استاتیک میکسر تکرار می‌شوند، تغییر جهت و توزیع مجدد دو سیال در جهت‌های شعاعی و مماسی است. نحوه عملکرد و تأثیر این المان‌ها در تغییر جهت و توزیع مجدد سیال، موجب می‌شود تا هر نوع از آنها برای کاربرد به خصوصی مناسب باشند [۲].

استاتیک میکسرهای تجاری شامل طیف گسترده‌ای از هندسه‌های ساده و پیچیده و بسیاری از پارامترهای قابل تنظیم هستند که می‌توانند برای کاربردهای خاص بهینه‌سازی شوند. تعداد المان‌هایی که درون استاتیک میکسر بصورت سری نصب می‌شوند و نسبت ابعادی طول به قطر هر المان جزو پارامترهای مهم دیگر می‌باشند. طرح های تجاری شده به طور معمول از استاندارد مشخصی برای پارامترهای مختلف استفاده می‌کنند که عملکرد کلی خوبی را برای طیف وسیعی از کاربردها فراهم می‌کند [۹-۱۳].

در فرآیند نمک‌زدایی نفت خام برای رقیق‌سازی شوری نفت، قبل از ورود نفت خام به مخزن نمک‌زدا، مقداری آب به آن تزریق می‌شود که به آن آب شستشو نیز گفته می‌شود. در فرآیند رایج نمک‌زدایی، برای اختلاط مناسب این آب

با نفت خام، از یک شیر دستی یا یک شیر کنترل در مسیر ورودی خوراک به نمک زدا استفاده می شود. به این شیر که به حالت نیمه باز در سرویس قرار می گیرد، اصطلاحاً شیر اختلاط گفته می شود. حالت نیمه باز این شیر و افت فشار ایجاد شده به اختلاط آب با نفت خام کمک می کند، ولی از سوی دیگر این روش محدودیت هایی نیز به همراه دارد. از جمله اینکه بهبود اختلاط از طریق افزایش افت فشار شیر، موجب تشکیل امولسیون پایدار آب در نفت می شود. این امولسیون پایدار بعد از ورود به مخزن نمک زدا باعث بروز مشکلات عملیاتی می گردد که در موارد حادّ حتی ناچار به توقف عملیات و تخلیه لایه امولسیونی به تانک off-spec خواهیم شد [۱۵-۱۴].

استفاده از استاتیک میکسر به جای شیر اختلاط می تواند ضمن بهبود کیفیت اختلاط فازها، موجب کاهش افت فشار مسیر و اجتناب از تشکیل امولسیون پایدار شده و مشکلات مذکور را مرتفع نماید. یکی از منابع علمی در زمینه فناوری نمک زدایی نفت خام نیز اشاره ای به کاربرد استاتیک میکسر ها کرده است [۱۶]؛ ولی اطلاعاتی از جزئیات آن ارائه نموده است.

با توجه به اینکه تاکنون تحقیق مدوّنی در زمینه کاربرد استاتیک میکسر ها بجای شیر اختلاط در فرآیند نمک زدایی نفت خام منتشر نشده است، انجام این تحقیق می تواند جوانب مختلف این موضوع را مورد بررسی قرار داده و زمینه اجرایی شدن این جایگزینی را با هدف بهبود عملیات در واحدهای فرآورش نفت خام فراهم نماید. با توجه به اینکه در این کاربرد ویژه، برخلاف سایر فرآیندهای اختلاط، ناپایداری سینتیکی امولسیون حاصله برای ادامه فرآیند اهمیت حیاتی دارد، انتخاب نوع مناسب استاتیک میکسر و بازه ی مناسب شرایط عملیاتی از اهمیت بسزایی برخوردار است. بنابراین هدف از انجام این تحقیق، بررسی تجربی سه نوع استاتیک میکسر تجاری (با نام های SMV ، HMS و LPD) برای اختلاط آب و نفت خام می باشد. همچنین اثر شرایط عملیاتی متفاوت شامل درصد آب (۱۵-۲٪) و دبی نفت خام (۸۶-۱۴۴ l/h) نیز در مقیاس پایلوت مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- مواد مورد استفاده

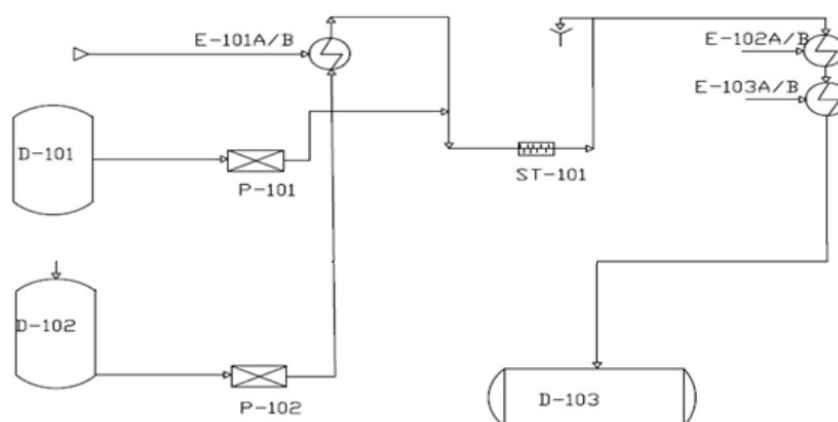
در این تحقیق اثر پارامترهای مختلف بر اختلاط آب و نفت در استاتیک میکسر و پایداری امولسیون حاصله مورد بررسی قرار می گیرد. با توجه به اینکه بیشترین منابع نفتی کشور از حوزه های موجود در مناطق نفت خیز جنوب تولید می شود و مشخصات آنها نیز کم و بیش مشابه بوده و جزو نفت خام های سبک دسته بندی می شوند؛ در این تحقیق از یکی از نفت خام های این حوزه ها با نام نفت خام مارون ۶ با مشخصات ارائه شده در جدول ۲ برای انجام تست ها استفاده شده است.

جدول ۲- مشخصات نفت خام مارون ۶ مورد استفاده در انجام تست ها

مشخصه	واحد	مقدار	روش استاندارد آنالیز
درجه API	-	۲۹/۷	ASTM D6822
ویسکوزیته در دمای ۴۰°C	cSt	۱۰/۴	ASTM D445
ترکیبات اشباع	wt%	۶۱/۹	ASTM D6560
ترکیبات آروماتیک	wt%	۲۴/۶	
ترکیبات رزینی	wt%	۱۰/۹	
ترکیبات آسفالتینی	wt%	۲/۶	

۲-۲- معرفی سامانه پایلوتی

برای انجام تست‌های تجربی از یک سامانه پایلوتی مطابق شکل ۲ استفاده شده است. آب در مخزن D-101 و نفت خام در مخزن D-102 شارژ می‌شود. آب با استفاده از پمپ دوزینگ (دبی قابل تنظیم) P-101 و نفت خام با استفاده از پمپ دوزینگ دیگری (دبی قابل تنظیم) P-102 تا فشار خروجی ۷ Barg می‌شوند. سپس نفت خام وارد مبدل حرارتی E-101 می‌شود. در آنجا با گردش روغن داغ در جداره بیرونی لوله، تا دمای 70°C گرم می‌شود. بلافاصله بعد از تزریق آب به جریان نفت، استاتیک میکسر ST-101 در مسیر جریان قرار دارد. پس از خروج از استاتیک میکسر، نمونه‌گیری از مخلوط حاصله از طریق یک شیر نمونه‌گیری انجام می‌شود. جریان مخلوط قبل از خروج از سیکل تست، ابتدا در دو مبدل E-102 و E-103 تا دمای محیط خنک می‌شود. در نهایت بعد از انداختن فشار، جریان مخلوط به مخزن D-103 ارسال می‌شود.



شکل ۲- شماتیک سامانه پایلوتی مورد استفاده در انجام تست‌ها

مطابق شکل ۳ استاتیک میکسر درون یک قطعه لوله قابل تعویض به طول ۱۰ cm که هر دو انتهای آن فلنج شده است در خط لوله نصب می‌شود. این کار برای فراهم شدن امکان تست انواع مختلف استاتیک میکسر، در سامانه پایلوتی پیش‌بینی شده است.

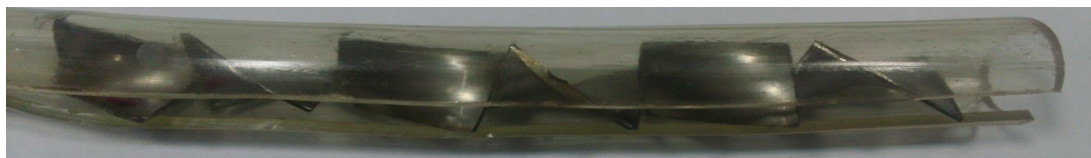


شکل ۳- قطعه استاتیک میکسر قابل تعویض، مورد استفاده در انجام تست‌ها

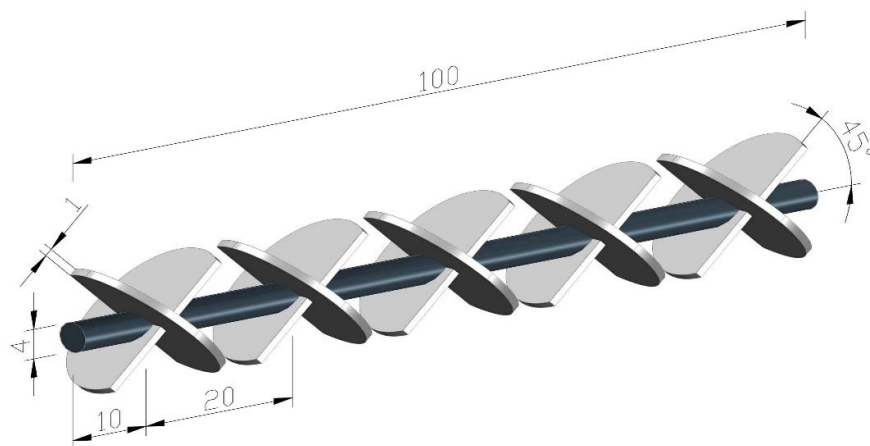
مطابق شکل ۴ در این تحقیق، سه نوع استاتیک میکسر تجاری (با نام‌های SMV، HMS و LPD) برای اختلاط آب و نفت خام مورد بررسی قرار گرفته است. تعداد المان‌های هر یک از این استاتیک میکسرها ۶ عدد می‌باشد که بصورت یکسان ساخته شده و با زوایای دقیق اتصال یافتند. در نهایت هر یک از استاتیک میکسرها که طولی معادل ۱۰ cm داشتند، درون قطعه لوله نمایش داده شده در شکل ۳ بصورت اجزای داخلی قرار گرفته و به نوبت در سامانه پایلوتی نصب و تست شدند.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴- سه نوع استاتیک میکسر مورد استفاده در انجام تست‌ها. (الف): SMV ، (ب): HMS ، (ج): LPD

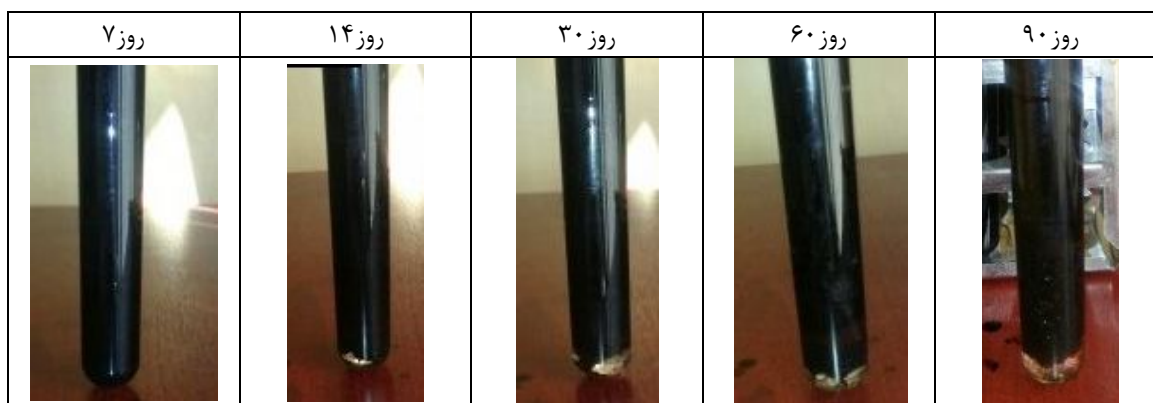
۲-۳- روش انجام تست‌ها

در این تحقیق، علاوه بر بررسی سه نوع استاتیک میکسر، سه مقدار متفاوت از دبی نفت خام شامل: ۱۴۴، ۱۱۲، ۸۶ l/h برای استاتیک میکسر نوع SMV بررسی شد. دبی مورد نظر نفت خام توسط پمپ دوزینگ تنظیم می‌شود. همچنین سه مقدار متفاوت از میزان آب تزریقی شامل: ۲، ۱۰ و ۱۵ درصد نیز بر روی استاتیک میکسر نوع SMV بررسی شد. در هر تست پس از اطمینان از پایدار شدن شرایط عملیاتی، نمونه‌ای از امولسیون حاصله با حجم مورد نیاز از جریان مخلوط نمونه‌گیری می‌شود. مطابق شرایط Bottle Test بخشی از این نمونه امولسیون در لوله آزمایش ریخته می‌شود و بصورت عمودی در محل پایه مربوطه استقرار می‌یابد. سپس در روزهای متوالی، ارتفاع آب جدا شده در انتهای ظرف اندازه‌گیری می‌شود و از این طریق درصد جدایش به عنوان شاخصی از ناپایداری امولسیون مورد بررسی قرار می‌گیرد.

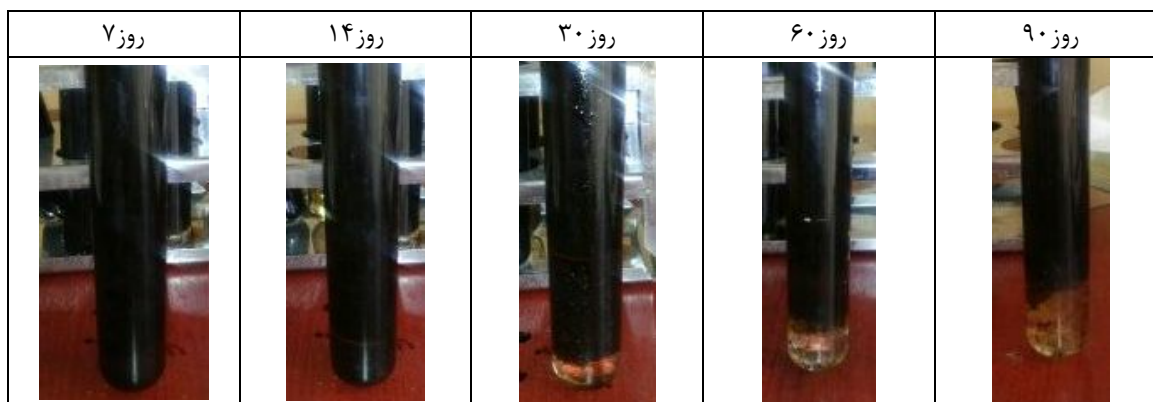
چند نمونه از تصاویر وضعیت جدایش آب از امولسیون در لوله آزمایش، مربوط به سه نوع استاتیک میکسر که در روزهای مختلف ثبت شده است جهت مقایسه در شکل ۵ ارائه شده است.

۳- نتایج و بحث

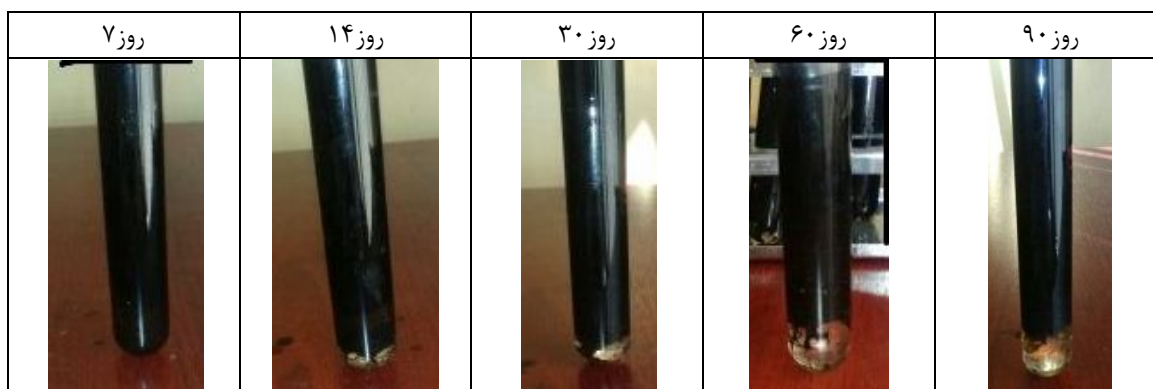
در این تحقیق اثر سه پارامتر شامل دبی نفت خام، درصد آب تزریقی و نوع استاتیک میکسر بر پایداری امولسیون حاصله مورد بررسی قرار گرفت که نتایج حاصله به ترتیب در این بخش ارائه می‌شوند.



(الف)



(ب)



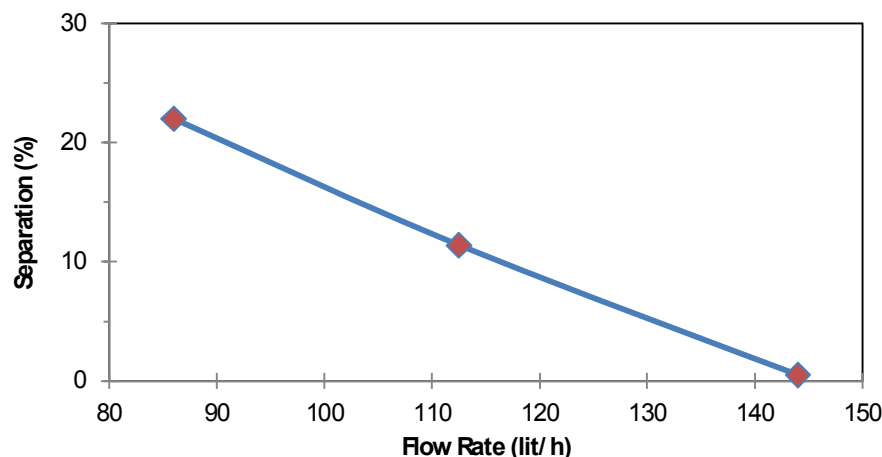
(ج)

شکل ۵- مقایسه جدایش آب از امولسیون حاصل از سه نوع استاتیک میکسر. (الف): SMV، (ب): HMS، (ج): LPD

۳-۱- اثر دبی نفت خام

از آنجا که توربولانسی جریان درون استاتیک میکسر کاملاً تحت تأثیر دبی نفت خام قرار دارد، این پارامتر بر کیفیت اختلاط و همچنین پایداری امولسیون حاصله اثرگذار است. سه مقدار متفاوت از دبی نفت خام شامل: ۱۴۴، ۱۱۲، ۸۶ l/h با استفاده از استاتیک میکسر نوع SMV بررسی شد. سایر شرایط عملیاتی در این تست‌ها بصورت یکسان اعمال شد. از جمله اینکه در این بخش از تست‌ها، میزان آب تزریقی برابر ۱۰٪ استفاده شد. درصد جدایش آب از امولسیون بعد از مدت طولانی که نشانگر میزان پایداری آن می‌باشد بصورت شکل ۶ حاصل شد.

**Maroon-6 Crude Oil
SMV-Flow Effect**



شکل ۶- اثر دبی جریان نفت خام بر میزان جدایش آب از امولسیون، استاتیک میکسر نوع SMV

همانطور که در شکل ۶ ملاحظه می‌شود، درصد جدایش آب با افزایش دبی نفت خام کاهش می‌یابد. با افزایش دبی نفت، توربولانسی درون استاتیک میکسر افزایش یافته و موجب خرد شدن بیشتر قطرات آب یا به عبارتی کاهش اندازه قطرات می‌گردد. کاهش اندازه قطرات درون امولسیون موجب پایدارتر شدن آن می‌شود، بطوریکه به ازای دبی ۱۴۴ l/h مشاهده شد که حتی پس از گذشت زمان طولانی (۹۰ روز) هیچ مقداری از آب در شرایط Bottle Test در امولسیون حاصله ته‌نشین نشد.

برای کاربردی‌تر شدن این نتایج می‌توان عدد بی‌بعد رینولدز (Re) متناظر با هریک از دبی‌های نفت خام را مبنای بررسی قرار داد.

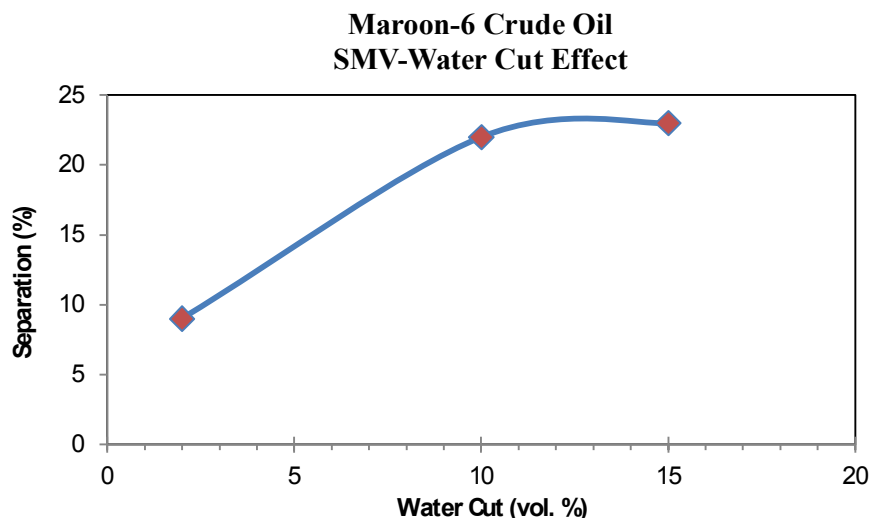
$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (1)$$

با توجه به اینکه اندازه لوله مورد استفاده در سامانه پایلوتی برابر یک دوم اینچ می‌باشد، مقادیر متناظر عدد رینولدز برای دبی‌های نفت خام به ترتیب برابر ۱۸۵، ۲۴۱ و ۳۱۰ می‌باشد. همگی مقادیر رینولدز کمتر از مقدار مرزی ۲۱۰۰ می‌باشند. بنابراین می‌توان گفت با وجود آنکه در رژیم جریان آرام (laminar flow) قرار داریم، عملکرد استاتیک میکسر نسبت به پارامتر سرعت سیال (یا عدد رینولدز) بسیار حساس می‌باشد. همانطور که در شکل ۶ نیز مشاهده می‌شود، با افزایش نسبی سرعت سیال، مشخصات امولسیون حاصله به صورت ملموسی تغییر می‌کند. بطوریکه به ازای دبی نفت برابر ۱۴۴ l/h می‌توان یک امولسیون تقریباً پایدار بدست آورد. بر اساس مطالعات قبلی، چنین امولسیونی

برای فرآیند نمک‌زدایی کاملاً نامطلوب محسوب می‌شود [۱۷-۲۲]. زیرا جداسازی آب درون مخزن نمک‌زدا را دشوار نموده و می‌تواند منجر به بروز مشکلات فرآیندی عدیده‌ای گردد. بنابراین بصورت ضمنی می‌توان از نتایج این بخش استنباط کرد که استاتیک میکسر نوع SMV احتمالاً گزینه‌ی مناسبی برای کاربرد مورد نظر نمی‌باشد. با این وجود برای بررسی دقیق‌تر این موضوع، بخش‌های بعدی تحقیق ارائه می‌گردد.

۳-۲- اثر میزان آب تزریقی

یکی دیگر از پارامترهایی که در کاربرد مورد نظر (استفاده از استاتیک میکسر برای اختلاط آب و نفت خام در فرآیند نمک‌زدایی) اهمیت دارد، میزان آب تزریقی به نفت خام است. در این تحقیق، سه مقدار متفاوت از درصد آب تزریقی به نفت خام شامل: ۲، ۱۰ و ۱۵ درصد برای استاتیک میکسر نوع SMV بررسی شد. دبی مورد نظر آب، متناسب با دبی نفت خام توسط پمپ دوزینگ آب تنظیم می‌شود. سایر شرایط عملیاتی در این تست‌ها بصورت یکسان اعمال شد. از جمله اینکه در تست‌های این بخش، دبی نفت خام برابر ۸۶ l/h ثابت بود. درصد جدایش آب از امولسیون بعد از مدت طولانی که نشانگر میزان پایداری آن می‌باشد بصورت شکل ۷ حاصل شد.



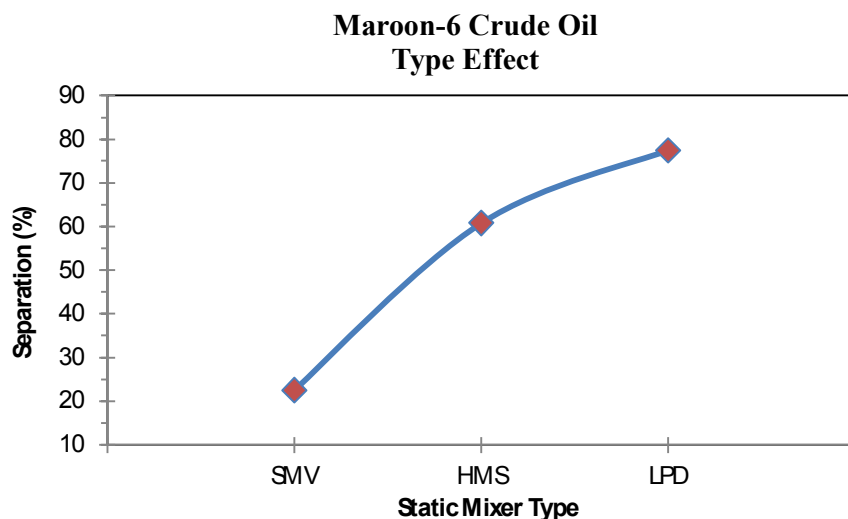
شکل ۷- اثر درصد آب تزریقی بر میزان جدایش آب از امولسیون، استاتیک میکسر نوع SMV

همانطور که در شکل ۷ ملاحظه می‌شود، درصد جدایش آب از امولسیون حاصله، با افزایش درصد آب تزریقی به نفت خام افزایش می‌یابد. با افزایش درصد آب تزریقی به نفت خام، تعداد یا جمعیت قطرات آب درون امولسیون خروجی از استاتیک میکسر افزایش یافته و در نتیجه موجب افزایش احتمال برخورد بین قطرات می‌گردد. افزایش برخورد و پدیده تجمع قطرات، موجب افزایش تدریجی اندازه قطرات درون امولسیون می‌شود [۲۲]. ته‌نشینی بیشتر فاز آب، به عبارتی به منزله‌ی ناپایدارتر شدن امولسیون حاصله می‌باشد. به ازای درصد آب تزریقی ۲٪ مشاهده می‌شود که پس از گذشت زمان طولانی (۹۰ روز) تنها حدود ۹ درصد از فاز آب در شرایط Bottle Test از امولسیون حاصله جدا شد. با افزایش درصد آب تزریقی به ۱۰٪ و ۱۵٪ میزان جدایش فاز آب از امولسیون حاصله تا حدود ۲۲-۲۳ درصد افزایش یافته است. این بخش از نمودار تغییرات، نشانگر آن است که افزایش بیشتر درصد آب عملاً تغییر ملموسی در پایداری امولسیون حاصله ایجاد نخواهد کرد. بنابراین به نظر می‌رسد در این شرایط و با استفاده از استاتیک میکسر

نوع SMV افزایش بیشتر آب هم کمکی به بهبود وضعیت جدایش نمی‌کند. از طرفی می‌دانیم درصد آب تزریقی در فرآیند نمک‌زدا در بازه ۲-۵٪ می‌باشد و عمدتاً سعی می‌شود برای کاهش مصرف آب، درصد آب تزریقی در محدوده کمیینه‌ی این بازه (۲٪) استفاده شود. بنابراین از نتایج این بخش نیز مجدداً می‌توان استنباط کرد که استاتیک میکسر نوع SMV گزینه‌ی مناسبی برای کاربرد مورد نظر نمی‌باشد.

۳-۳- اثر نوع استاتیک میکسر

در این تحقیق به منظور انتخاب نوع مناسب استاتیک میکسر برای کاربرد مورد نظر، سه نوع مختلف از آنها شامل HMS، SMV و LPD مورد بررسی قرار گرفتند. شرایط عملیاتی اعمال شده در این بخش از تست‌ها بصورت یکسان اعمال شد. از جمله اینکه دبی نفت خام برابر ۱۱۲ l/h و درصد آب تزریقی برابر ۱۵٪ استفاده شد. بر اساس نتایج، درصد جدایش آب از امولسیون بعد از مدت طولانی که نشانگر میزان پایداری آن می‌باشد بصورت شکل ۸ حاصل شد.



شکل ۸- اثر نوع استاتیک میکسر بر میزان جدایش آب از امولسیون

پایداری امولسیون حاصل از انواع استاتیک میکسر از طریق رصد کردن میزان جدایش آب در شرایط Bottle Test مورد ارزیابی قرار گرفت. همانطور که در شکل ۸ ملاحظه می‌شود، پایداری امولسیون تابعیت شدیدی از نوع استاتیک میکسر مورد استفاده دارد. بطوریکه برای استاتیک میکسر نوع SMV پس از گذشت زمان طولانی (۹۰ روز) تنها حدود ۲۲ درصد از فاز آب جدا شد ولی برای استاتیک میکسر نوع LPD در شرایط یکسان، حدود ۷۷ درصد از فاز آب جدا شد. کیفیت امولسیون حاصل از استاتیک میکسر نوع HMS در مقایسه با دو نوع دیگر حالت متوسطی داشت و حدود ۶۰ درصد از فاز آب در پایان این مدت جدا شد.

در برخی از کاربردهای استاتیک میکسر (نظیر تولید مواد آرایشی-بهداشتی)، هدف اختلاط تولید یک امولسیون پایدار از آب و روغن می‌باشد، که طبق این نتایج، همزن نوع SMV در آنجا مناسب می‌باشد. ولی در کاربرد مورد نظر در این تحقیق (اختلاط آب شستشو با نفت خام در فرآیند نمک‌زدایی)، عملیات باید به گونه‌ای انجام شود که امولسیون حاصله در حدی ناپایدار باشد؛ تا برای مرحله جداسازی درون مخزن نمک‌زدا مشکلات عملیاتی ایجاد نشود. بنابراین

نتایج نشان می‌دهد استاتیک میکسر نوع LPD ضمن اینکه اختلاط مناسبی را ایجاد می‌کند، از نظر ناپایداری سینتیکی امولسیون، برای کاربرد در فرآیند نمک‌زدایی گزینه مناسبی می‌باشد (جدول ۳).

جدول ۳- روند درصد جدایش آب از امولسیون حاصل از سه نوع استاتیک میکسر

نوع استاتیک میکسر	۱ روز	۷ روز	۱۴ روز	۳۰ روز	۶۰ روز	۹۰ روز
SMV	۰	۰	۰	۶	۱۳	۲۲
HMS	۰	۰	۰	۱۵	۲۶	۶۰
LPD	۰	۱۴	۵۳	۶۸	۷۵	۷۷

۴- نتیجه‌گیری

کاربرد استاتیک میکسر به منظور اختلاط آب شستشو با نفت خام در فرآیند نمک‌زدایی به روش تجربی و با استفاده از یک سامانه پایلوتی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق می‌تواند با جایگزینی استاتیک میکسر، نقاط ضعف عملیاتی شیر اختلاط در فرآیندهای رایج نمک‌زدایی را مرتفع نماید. شیر اختلاط به دلیل محدودیت‌های هندسی در ساختار آن، تنها با کاهش درصد باز کردن شیر (افزایش افت فشار) قادر است راندمان اختلاط آب و نفت را بهبود دهد. معمولاً شیر اختلاط به دلیل ایجاد یک امولسیون بسیار پایدار، منجر به مشکلات فرآیندی در مرحله جداسازی درون مخزن نمک‌زدا خواهد شد. در صورتیکه با جایگزینی استاتیک میکسر، پارامترهای هندسی متعددی در اختیار طراح قرار دارد تا ضمن بهبود کیفیت اختلاط، پایداری امولسیون را نیز در حد مناسبی حفظ نموده و از بروز مشکلات فرآیندی بعدی جلوگیری کند. نتایج نشان داد نوع استاتیک میکسر و شرایط عملیاتی بر روی ویژگی‌ها و پایداری سینتیکی امولسیون حاصله اثرگذار هستند. سه نوع استاتیک میکسر با نام‌های تجاری SMV، HMS و LPD در شرایط عملیاتی متفاوت شامل درصد آب (۲، ۱۰ و ۱۵ درصد) و دبی نفت خام (۸۶، ۱۱۲ و ۱۴۴) مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد با افزایش دبی نفت خام، پایداری امولسیون حاصله افزایش می‌یابد. همچنین طبق این نتایج، با افزایش درصد آب تزریقی، امولسیون ناپایدارتری حاصل خواهد شد. بر اساس نتایج این تحقیق، استاتیک میکسر نوع SMV که پایدارترین امولسیون را ایجاد می‌کند، برای فرآیند نمک‌زدایی مناسب نمی‌باشد. در عوض استاتیک میکسر نوع LPD با توجه به ویژگی‌های امولسیون حاصله، یعنی پایداری سینتیکی کنترل‌شده در شرایط عملیاتی صنعتی، برای این کاربرد مناسب خواهد بود.

۵- منابع

- [1] A. Ghanem, T. Lemenand, D.D. Valle, H. Peerhossaini, "Static mixers: mechanisms, applications, and characterization methods—A review", *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 92, issue 2, pp. 205-228, Feb 2014.
- [2] J.P. Valdés, L. Kahouadji, O.K. Matar, "Current advances in liquid–liquid mixing in static mixers: A review", *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 177, pp. 649-731, Jan 2022.
- [3] C. Wang, H. Liu, X. Yang, R. Wang. (2021, August). "Research for a Non-Standard Kenics Static Mixer with an Eccentricity Factor", *Processes* [Online]. vol. 9, issue 8.
- [4] W.S. Sutherland, "Improvement in apparatus for preparing gaseous fuel", UK Patent 1874, 1874.
- [5] M.J. Bakker, "Dispositif pour préparer du béton ou une atière analogue", French Patent 959, 155.

- [6] R.S. Lynn, 1958. "Turbulator", US Patent 2,852, 042, assigned to The Garrett Corporation, 1949.
- [7] L.C. de Petrole, "Dispositif pour de le mélange deux ou plusieurs fluides", French Patent 735, 033, 1931.
- [8] M. Tepper, Y. Eminoglu, H. Roth, et al., "Rotation-in-a-spinneret integrates static mixers inside hollow fiber membranes", *Journal of Membrane Science*, vol. 656, pp. 120599-120640, Aug 2022.
- [9] F. Theron, N. Le Sauze, "Comparison between three static mixers for emulsification in turbulent flow", *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 37, issue 5, pp. 488-500, Jun 2011.
- [10] N. Kiss, G. Brenn, H. Pucher, et al., "Formation of O/W emulsions by static mixers for pharmaceutical applications", *Chemical Engineering Science*, vol. 66, issue 20, pp. 5084-5094, Nov 2011.
- [11] E. Chabanon, N. Sheibat-Othman, O. Mdere, et al., "Drop size distribution monitoring of oil-in-water emulsions in SMX+ static mixers: Effect of operating and geometrical conditions", *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 92, pp. 61-69, Jun 2017.
- [12] L. Muruganandam, D. Kunal, G.O. Melwyn, "Studies on droplet size distribution of oil-in-water emulsion in smx static mixer", *Journal of Applied Fluid Mechanics*, vol. 11, issue 1, pp. 107-114, Jan 2018.
- [13] F. Theron, N. Le Sauze, A. Ricard, "Turbulent liquid-liquid dispersion in Sulzer SMX mixer", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 49, issue 2, pp. 623-632, Jan 2010.
- [۱۴] مهدی محمدی، رحمت ا... گلپاشا، سعید سلطانعلی، "بررسی نحوه‌ی عملکرد انواع نمک‌زدای الکتروستاتیک نفت خام"، نشریه فرآیند نو، شماره ۳۹، صفحات ۳۳-۲۳، پاییز ۱۳۹۱.
- [۱۵] مهدی محمدی، "آخرین فناوری‌های نمک‌زدای الکتروستاتیک نفت خام و مسیر توسعه فناوری در پژوهشگاه صنعت نفت"، ماهنامه اکتشاف و تولید نفت و گاز، شماره ۱۳۵، صفحات ۱۰۲-۹۳، شهریور ۱۳۹۵.
- [16] K.E. Arnold, L.W. Lake, Petroleum Engineering Handbook Vol.3: *Facilities and Construction Engineering*, USA: Society of Petroleum Engineers (SPE), 2006.
- [17] M. Mohammadi, S. Shahhosseini, M. Bayat, "Direct numerical simulation of water droplet coalescence in the oil", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 36, pp. 58-71, Aug 2012.
- [18] M. Mohammadi, S. Shahhosseini, M. Bayat, "Numerical Prediction of the Electrical Waveform Effect on Electrocoalescence Kinetic", *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 91, issue 5, pp. 904-918, May 2013.
- [19] M. Mohammadi, S. Shahhosseini, M. Bayat, "Numerical study of collision and coalescence of water droplets in an electric field", *Chemical Engineering and Technology*, vol. 37, issue 1, pp. 27-35, Jan 2014.
- [20] M. Mohammadi, S. Shahhosseini, M. Bayat, "Electrocoalescence of binary water droplets falling in oil: Experimental study", *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 92, issue 11, pp. 2694-2704, Nov 2014.
- [21] M. Mohammadi, "Numerical and experimental study on electric field driven coalescence of binary falling droplets in oil", *Separation and Purification Technology*, vol. 176, pp. 262-276, Apr 2017.
- [22] M. Mohammadi, "Population Balance Modeling for Integrating Hydrodynamics with Electrostatics in Crude Oil Electrocoalescers", *Journal of Petroleum Science and Technology*, vol. 9, issue 4, pp. 3-21, Autumn 2019.