

# جداسازی آب و نمک از نفت خام در میدان الکتریکی غیر یکنواخت (دی الکترو فورز) با جریان مستقیم (DC)

مرتضی حسینی\*

استادیار دانشکده مهندسی شیمی - دانشگاه صنعتی مازندران

(تاریخ دریافت ۸۵/۴/۳، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۶/۳/۱۲، تاریخ تصویب ۸۶/۳/۳۰)

در این تحقیق جداسازی آب و نمک از نفت خام که به شکل امولسیون "آب در نفت" میباشد با استفاده از ایجاد میدان الکتریکی غیر یکنواخت (دی الکترو فورز) با جریان مستقیم (DC) مورد مطالعه و مقایسه با سایر روش‌ها قرار گرفته است. در این مطالعه اثرات دما، زمان و ولتاژ بر راندمان جداسازی آب و نمک از نفت بررسی شده است. مشخص شد که روش میدان الکتریکی غیر یکنواخت می‌تواند روش مناسبی برای جداسازی آب از امولسیون آب در نفت باشد. در شرایط آزمایشگاهی در یک ولتاژ و دمای بهینه توانسته شد به یک نتیجه مطلوبی دست یافت.

: میدان الکتریکی - نمک زدایی از نفت - امولسیون آب در نفت

( )

( )

( )

---

[ ](AC)

[ ](DC)                      [ ](PAC)

[ ](PDC)                      )

AC                                      (

[ ]      AC

"

"

)

"

"

.....

[ ]

API

PI

API

)

[ ] [ ] (

)

[ ] [ ] [ ] [ ] (

[ ]      [ ]

[ ]                      •

)

(

---

1

---

---

-Awaiting Cargo Tes

( )

)

(

( )

( )

)

( )

(

•

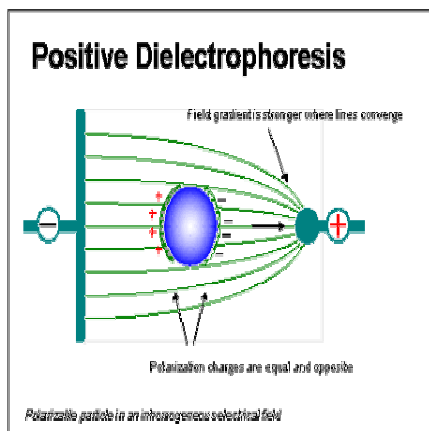
( )

•

(relative dielectric constant) :

$\epsilon$	[ ]
خلا	1
هوا	1
کاغذ	1.8-2.6
آب	80
شیشه	5-10
پلی اتیلن	2

امولسیون از نوع " آب در نفت " فاز پیوسته نفت است و نفوذپذیری الکتریکی آن بسیار پایین تر از فاز پراکنده مثل قطرات آب می باشد. در این صورت اختلاف  $\sigma_d - \sigma_c$  بزرگ بوده و شدت میدان الکتریکی بزرگتری نیاز می باشد. ۱۰- فاصله مرکز قطره آب تا مرکز الکتروود فلزی R. یعنی قطر استوانه مرکزی Di حاوی امولسیون اگر بزرگ اختیار شود باعث تضعیف اثر شدت میدان الکتریکی بر قطرات دور از الکتروود مرکزی می گردد. هر چقدر از مرکز فاصله گرفته شود، به همان نسبت شدت میدان الکتریکی ضعیفتر می گردد (شکل ۱). وقتی امولسیون در یک میدان الکتریکی غیر یکنواخت قرار می گیرد بار الکتریکی در سطح خارجی قطرات القا می شود [۵]. از خصوصیات روش دی الکتروفوروز (میدان الکتریکی غیر یکنواخت) این است که قطرات صرف نظر از نوع باری که دارند به سمت الکتروود کشیده می شوند که بیشترین میدان الکتریکی در آنجا حاکم است (الکتروود فلزی در مرکز). خطوط شار میدان مطابق شکل (۱) در مرکز به هم می رسند که نشان دهنده بزرگترین میدان الکتریکی در مرکز بوده و بیشترین برخورد های ذرات بهم در آنجا اتفاق می افتد. یعنی احتمال برخورد بیشتر ذرات بهم در یک محیطی که تجمع کرده اند (در مرکز) بیشتر خواهد بود در مقایسه با روش میدان الکتریکی یکنواخت که غلظت ذرات در آن تقریباً یکسان است. در نتیجه وقتی ذرات بیشتری بهم برخورد کنند سبب انعقاد بیشتر آنها خواهد شد. طبق شکل (۱) هر چقدر از مرکز فاصله گرفته شود به همان نسبت شدت میدان الکتریکی ضعیفتر می گردد.



طبق رابطه (۱) باید ثابت دی الکتریک نسبی بالا باشد تا شدت میدان الکتریکی در جهت به حرکت در آوردن قطرات آب موثر واقع شود و هدر نرود [۵]. یک قطره آب با ثابت دی الکتریک  $\epsilon_d$  احاطه شده توسط فاز پیوسته با ثابت دی الکتریک  $\epsilon_c$ .

$$\frac{E_c}{E_d} = \frac{\epsilon_d}{\epsilon_c}$$

(۱)

معادله نیروی دی الکتروفوروز  $F_{di}$  برای ظرف استوانه ای تو در تو (هم مرکز) بصورت مقابل آورده شده است.

$$F_{d_i} = \frac{\pi \cdot d^3 \cdot \epsilon_c (\sigma_d - \sigma_c) E^2}{2(\sigma_d + 2\sigma_c) R \cdot \ln^2(D_a / D_i)}$$

(۲)

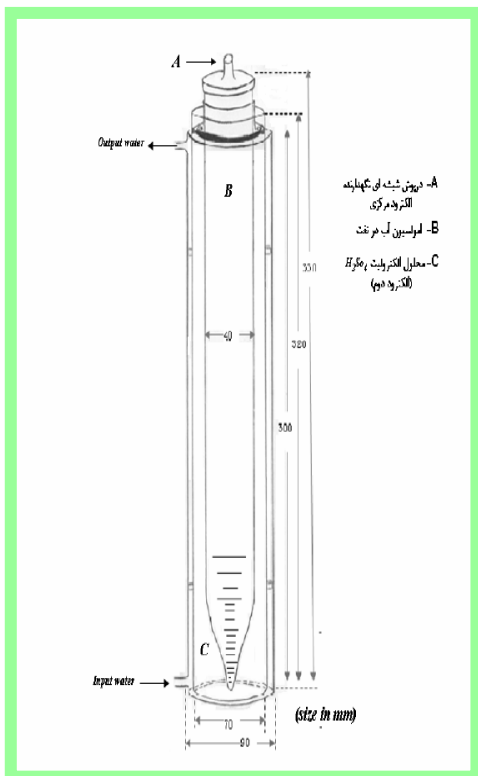
مقدار نیروی دی الکتروفوروز  $F_{di}$  طبق رابطه (۲) به پارامترهای ذکر شده در ذیل بستگی دارد.

۱- شدت میدان الکتریکی  $E$  ( $V/m$ ) که خود با تغییر نسبت قطر شیشه خارجی  $D_a$  (حاوی اسید ۳۰ درصدی) به قطر شیشه مرکزی  $D_i$  (حاوی امولسیون) تغییر میکند. هر چقدر این نسبت بزرگتر شود شدت میدان کوچکتر خواهد شد. زیرا هر چقدر از مرکز فاصله گرفته شود، به همان نسبت شدت میدان الکتریکی ضعیفتر می گردد..

۲- ثابت دی الکتریک  $\epsilon$  فاز پیوسته که بستگی به نوع امولسیون دارد.

۳- قطر قطرات  $d$  هر چه قدر بزرگتر باشند شدت میدان بزرگتری لازم می باشد.

۴- اختلاف نفوذپذیری الکتریکی<sup>۳</sup> بین فاز پراکنده و پیوسته ( $\sigma_d - \sigma_c$ ) که بستگی به نوع امولسیون دارد.



(الف)

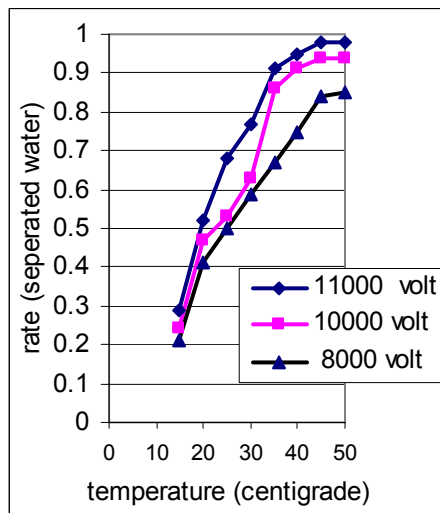


( ) - ( ) :  
 ( )  
 ( )  
 ( )  
 ( )

وقتی فاز پیوسته نفت باشد نفوذپذیری الکتریکی آن بسیار پایین‌تر از فاز پراکنده مثل قطرات آب می‌باشد. در این صورت فاز پیوسته قابلیت هدایتی کمی داشته و مثل یک عایق بین دو الکترود عمل می‌کند. اگر مقدار آب تشکیل دهنده امولسیون زیاد باشد در آن صورت

در این تحقیق آزمایشگاهی، امولسیون مصنوعی "آب در نفت" با مخلوط نمودن ۷ درصد آب در نفت خام توسط یک هموژنایزر ساخته شده است. دستگاه جداساز از سه استوانه شیشه‌ای تودرتو (هم مرکز) مطابق شکل (۲) تشکیل شده است که از بیرون قابل مشاهده و کنترل می‌باشد. استوانه مرکزی حاوی نمونه امولسیون، استوانه دومی حاوی اسید ۳۰ درصدی و استوانه بیرونی (بزرگترین استوانه) مبدل حرارتی می‌باشند. استوانه حاوی امولسیون به قطر ۴ و ارتفاع ۳۲ سانتیمتر، استوانه حاوی اسید ۳۰ درصدی به قطر ۷ و ارتفاع ۳۰ سانتیمتر، استوانه آب خنک کننده به قطر ۹ و ارتفاع ۳۰ سانتیمتر می‌باشد. جهت ایجاد ولتاژهای مختلف از یک دستگاه DC (جریان مستقیم) استفاده شده است. در این میدان الکتریکی غیریکنواخت با جریان مستقیم الکترودها در دو محفظه شیشه‌ای مجزا قرار می‌گیرند. در استوانه مرکزی حاوی امولسیون اولین الکترود فلزی قرار دارد و یک سر آن به یک سیم مسی متصل می‌باشد. در استوانه مجاور به عنوان الکترود دوم از اسید سولفوریک رقیق شده ۳۰ درصدی  $H_2SO_4$  استفاده شده است که در داخل آن نیز سیم مسی قرار می‌گیرد. دو سر سیم مسی به ترانس (DC) متصل می‌شود که پس از برقراری جریان، میدان الکتریکی غیر یکنواخت ایجاد می‌شود. در استوانه بیرونی آب به طور پیوسته با دمای مورد نظر جهت انتقال گرما و برای ثابت نگه داشتن دمای امولسیون در جریان می‌باشد. جهت مقایسه از نمونه شاهد در استوانه جداساز آزمایش مشابه ولی بدون ایجاد میدان الکتریکی و فقط توسط ته نشینی طبیعی (ثقلی) انجام می‌گیرد. از طریق دو سیم مسی ولتاژ انتقال داده می‌شود بدون اینکه در الکترولیت جریان برق عبور داده شود چون نیروی مقاوم شیشه ( $\Omega$ ) بسیار بزرگ می‌باشد. در این تحقیق روی عواملی نظیر دما، ولتاژ و زمان بر میزان جداسازی آب از نفت بررسی شده است که هشت مقدار دمایی مختلف بین ۱۵ تا ۵۵ درجه سانتیگراد و سه ولتاژ ۸۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۱۰۰۰ انتخاب شده‌اند. همچنین فرکانس جریان و زمان جداسازی برای همه آزمایشات به ترتیب ۵۰ هرتز و ۱۱ دقیقه بوده است. میزان جداسازی با اندازه‌گیری مقدار حجمی آب نمک جمع شده در استوانه مرکزی مدرج انجام گرفته است.

در نتیجه انعقاد و جداسازی دیگر صورت نمیگیرد. مدت زمان آزمایش برای همه دماها یکسان و ۱۱ دقیقه میباشد. بهترین دمای جداسازی در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد شناسایی شده است که توانسته شد به یک راندمان ۹۹ درصدی دست یافت.



نمودار ۱: اثر تغییرات درجه حرارت (سا نتیگراد) بر راندمان جداسازی در یک میدان الکتریکی غیر یکنواخت با ولتاژهای مختلف را نشان میدهد.

#### اثر میزان ولتاژ بر راندمان جداسازی (ولتاژ بهینه)

همچنین در نمودار ۲ اثر میزان ولتاژ بر راندمان جداسازی در یک میدان الکتریکی غیر یکنواخت با جریان مستقیم نشان داده شده است. در این نمودار ها مشاهده می شود که با افزایش ولتاژ تا ۱۱۰۰۰ ولت در تمام زمان های انجام آزمایش، راندمان جداسازی افزایش یافته است. جهت شکستن امولسیون از نوع "آب در نفت خام" در مقایسه با امولسیون از نوع "نفت در آب". به ولتاژ بالا تری نیاز میباشد. یکی از علت های بالا رفتن راندمان توسط ازدیاد ولتاژ، تاثیر گذاری بیشتر ذرات توسط افزایش شدت میدان الکتریکی در فاصله های مختلف نسبت به الکتروود مرکزی میباشد. زیرا هر چقدر از مرکز فاصله گرفته شود، به همان نسبت شدت میدان الکتریکی ضعیفتر می گردد (شکل ۱). همچنین سرعت حرکت ذرات با بالا رفتن ولتاژ بیشتر گشته و در نتیجه تعداد برخورد های ذرات به همدیگر افزایش و در نهایت راندمان جداسازی بهبود می یابد. تفاوت راندمان جداسازی بین ۱۰۰۰۰ ولت و ۱۱۰۰۰ ولت ناچیز بوده و این تفاوت کم را فقط در دقایق اول می بینیم که در دقایق پایانی همانطور که در نمودار ۱

پیوندهای زنجیره ای از قطرات آب بوجود می آید که باعث هدایت الکتریکی در امولسیون شده و می تواند باعث ایجاد اتصال کوتاه شود. براساس نتایج بدست آمده ثابت شد که منعقد کننده الکتریکی در جداسازی امولسیون آب در نفت موثرند و الکتروود های ایزوله و مجزا (میدان الکتریکی متغیر) جهت شکستن امولسیون آب در نفت نه تنها مانع اتصال کوتاه می شود بلکه راندمان جداسازی به دلیل شکل هندسی محفظه جداساز در این روش به مراتب بهتر خواهد بود (شکل شماره ۲ و ۱). خطوط شار میدان مطابق شکل ۱ در مرکز به هم می رسند که نشان دهنده بزرگترین میدان الکتریکی در مرکز می باشد که بیشترین برخوردهای ذرات بهم در آنجا اتفاق می افتد (گرادیان شدت میدان الکتریکی).

#### ضرورت جداسازی در میدان الکتریکی

برای مشاهده فرآیند جداسازی بدون استفاده از میدان الکتریکی یک نمونه شاهد در ظرف جداساز بدون ایجاد میدان الکتریکی و فقط از طریق ثقلی استفاده شده است. در این آزمایش راندمان جداسازی صفر بوده است که این امر نقش میدان الکتریکی را جهت شکستن سریع امولسیون آب در نفت بسیار مهم ارزیابی مینماید.

#### اثر تغییرات درجه حرارت بر راندمان جداسازی (دمای بهینه)

اثر تغییرات درجه حرارت بر راندمان جداسازی قابل توجه می باشد. در نمودار شماره ۱ اثر تغییرات درجه حرارت بر راندمان جداسازی در ولتاژهای مختلف مشاهده میشود. در این نمودار دیده میشود که در درجه حرارت های بالاتر تا دمای ۵۰ درجه عمل جداسازی بهتر انجام می گیرد. این پدیده به این علت است که حرکت ذرات با افزایش دما افزایش یافته و در نتیجه تعداد برخوردها در یک مقطع زمانی بیشتر گشته و بدنبال آن راندمان جداسازی افزایش یافته است. از دمای ۵۰ درجه سانتیگراد به بالا راندمان جداسازی در مرحله اول ثابت مانده و بعد کمی کاهش هم یافته است. علت این مکانیزم این است که در دمای بالاتر از ۵۰ درجه سانتیگراد ویسکوزیته نفت خام زیاد از حد پایین می آید و دیگر برخورد قطرات بهم منجر به تلفیق و یکی شدن قطرات نمیشود چون چسبنده گی فیلم دور قطرات ناچیز گشته و

بهبود یافته است. این تحقیق نشان داده است که بهترین نتیجه جداسازی در روش میدان الکتریکی غیر یکنواخت با فرکانس ۵۰ هرتز و ولتاژ ۱۰۵۰۰ ولت تا ۱۱۰۰۰ ولت و در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد بدست آمده است که توانسته شد به یک راندمان ۹۹ درصد حجمی دست یافت.

همانگونه که در جدول زیر قابل مشاهده میباشد در صد آب مصرفی شستشو دهنده و دمای عملیات بستگی به چگالی نفت خام دارد.

جدول ۲: تاثیر API نفت در مقدار درصد آب مصرفی شستشو دهنده و دمای عملیات را نشان میدهد.

API	H2O-Volume-%	Temp.C
API>40	۳-۴	۱۱۵-۱۲۵
30<API<40	۴-۷	۱۲۵-۱۳۵
API<30	۷-۱۰	۱۴۰-۱۵۰

$$E = \text{شدت میدان الکتریکی (Vm)}$$

$$\epsilon = \text{ثابت دی الکتریک } [c2/ (N.m2)]$$

$$d = \text{قطر قطره (mm)}$$

$$\pi = \text{عدد صحیح } ۳,۱۴$$

$$\sigma = \text{هدایت الکتریکی (sm)}$$

$$R = \text{فاصله قطره تا الکتروود مرکزی (mm)}$$

$$D_i = \text{قطر استوانه داخلی (حاوی نمونه) (mm)}$$

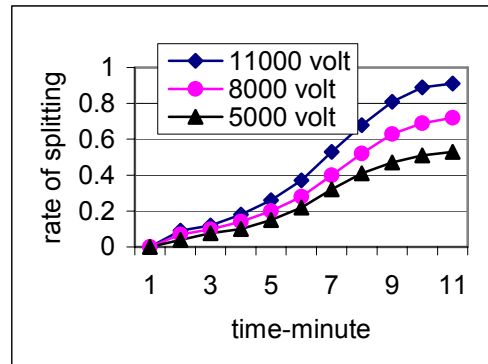
$$D_a = \text{قطر استوانه خارجی (حاوی اسید } ۳۰ \text{ درصدی) (mm)}$$

اندیس‌ها:

$$c = \text{پیوسته } ۴$$

$$d = \text{پراکنده } ۵$$

مشاهده میشود میتوان گفت که راندمان جداسازی یکسانی دارند. بنابر این بهترین شدت میدان الکتریکی در ولتاژ ۱۰۵۰۰ ولت تا ۱۱۰۰۰ ولت شناسایی شده است که توانسته شد در ولتاژ ۱۱۰۰۰ ولت به راندمان بیش از ۹۰ درصد دست یافت.



نمودار ۲: اثر میزان ولتاژ (گرادیان ولتاژ) بر راندمان جداسازی در یک میدان الکتریکی غیر یکنواخت با جریان مستقیم در دمای اپتیمم ۵۰ درجه سانتیگراد و فرکانس ۵۰ هرتز را نشان میدهد.

در عمل جداسازی امولسیون "آب-در-نفت" با استفاده از میدان الکتریکی غیر یکنواخت خطر اتصال کوتاه در مقایسه با میدان الکتریکی یکنواخت بسیار ضعیف می باشد. در روش میدان الکتریکی غیر یکنواخت، میزان ولتاژ (گرادیان ولتاژ) و دما پارامترهای بسیار مهم بر میزان جداسازی امولسیون می باشند.

با افزایش ولتاژ و دما تا یک حد مشخصی بازده جداسازی افزایش می یابد. در مقایسه با روش شیمیایی این روش با محیط زیست بسیار سازگار می باشد زیرا از هیچ ماده شیمیایی استفاده نمی شود و همچنین اقتصادی تر هم هست. سرعت حرکت ذرات با افزایش ولتاژ و دما (نمودار ۱ و ۲) بیشتر گشته و در نتیجه تعداد برخورد های ذرات به همدیگر افزایش و در نهایت راندمان جداسازی

1 - Eow, J. S. and Ghadiri, M. (2002). "Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil." *A Review of the technology, Chemical Engineering Journal*, Vol. 85, PP.357-368.

2 - Waterman, L. C. (1965). "Electrical coalescence." *Chem. Eng. Prog.*, Vol. 61, No. 10, PP.51-57.

3 - Markx, G. H. and Pething, R. (1995). "Dielectrophoretic separation of cells." *Biotechnol. Bioeng.*, Vol. 45, PP.337-343.

- 
- 4 - Markx, G. H., Huang, Y., Zhou, X. F. and Pething, R. (1994). "Dielectrophoretic characterization and separation of micro-organisms." *Microbiology*, Vol. 140, PP.85-591.
  - 5 - Draxler, J. (1992). *Fluessige Membranen fuer die Abwasserreinigung*, (dbv-Verlag Graz).
  - 6 - Wang, X. B., Huang, Y., Burt, J. P. H., Markx, G. H. and Pethig, R. (1993). "Selective dielectrophoretic conferment of bioparticles in potential energy wells." *Journal of Physics: D*, Vol. 26, PP. 1278-1285.
  - 7 - Berger, R. (1986). "Koaleszenzprobleme in chemischen prozessen." *Chem. Ing. Tech.*, Vol. 58, No. 6, PP.51-57.
  - 8 - Cottrell, F. G. (1911). *Process for separating and collecting particles of one liquid suspended in another liquid*, US Patent 987114.
  - 9 - Wolfe, H. (1944). *Method and apparatus for treating fluids*, US Patent 2364118.
  - 10 - Bailes, P. J. (1995). "Pulsed dc. fields for electrostatic coalescence of water-in-oil emulsions." *Trans. I. Chem, E A* 73, PP. 559-566.
  - 11 - Bailes, P. J. and Larkai, S. L. (1982). "Liquid phase separation in pulsed DC fields." *Trans. Inst. Chem. Eng.*, Vol. 60, PP.115-121.
  - 12 - Pearce, C. A. K. (1954). "The mechanism of the resolution of water in oil emulsions by electrical treatment." *Brit. J. Appl. Phys.*, Vol. 5, PP.139-142.
  - 13 - Loeffler, K. (1988). *Die spaltung von W/O-Emulsionen im elektrischen Wechselfeld*, Diplomarbeit, TU-Graz.
  - 14 - Hauertmann, H. B. (1986). "Elektrokoaleszenz. dissertation, Universitaet Hannover Galvin CP, (1985), design principles for electric coalesces." *Inst. Chem. Eng. Symposium series*, 88, PP.101-113.
  - 15 - Siebert, F. M. and Brady, J. D. (1919). *Process and apparatus for treating oil*, US Patent, PP. 129-369.
  - 16 - Galvin, C. P. (1985). "Design principles for electric coalesces." *Inst. Chem. Eng. Symposium series*, 88, PP.101-113.
  - 17 - Alinezhad, K., Hosseini, M. and Esfahanian, M. (2006). "Study of splitting of water in crude oil static emulsion under non- uniform electrical field and in atmospheric pressure." *11th Chemical Engineering Congress (IchEC9)*, Tarbiat Modarres University, Tehran.
  - 18 - Alinezhad, K., Hosseini, M. and Esfahanian, M. (2006). "Investigation of electrical fields mechanisms with high voltage in W/O-emulsions and present an experimental model for DC current under radial electrical field." *11th Chemical Engineering Congress (IchEC9)*, Tarbiat Modarres University, Tehran.

- 1 - Dielectrophorese
  - 2 - Electrophorese
  - 3 - Permittivity
  - 4 - Continuous
  - 5 - Dispersed
-