

بررسی تجربی پدیده وارونگی فاز در سیستم‌های مایع - مایع در حالت ناپیوسته

علی اکبر داودی، پریسا خدیوپارسی*⁺، سید محمدعلی موسویان، مهدی عمویی

تهران، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده مهندسی شیمی، صندوق پستی ۴۵۶۳-۱۱۳۶۵

چکیده: وارونگی فاز در پراکندگی‌های مایع-مایع، پدیده‌ای است که در بسیاری از فرایندهای صنعتی روی می‌دهد، اما مکانیسم‌های حاکم بر این پدیده و چگونگی اثر پارامترهای فیزیکی و هندسی روی آن به خوبی درک نشده است. در این مقاله اثر سرعت هم‌زدن، نوع سیستم شیمیایی و وجود نمک‌های معدنی روی این پدیده در ظرف‌های هم‌زن‌دار و در حالت ناپیوسته بررسی شده است. به منظور بررسی پدیده وارونگی، از یک سیستم مجهز به هم‌زن با دور متغیر و برای مشاهده آن از یک هدایت‌سنج استفاده شده است. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که با افزایش سرعت هم‌زدن، پراکندگی‌های فاز آلی در آب در مقدارهای کم‌تری از کسر حجمی فاز پراکنده وارونه می‌شود، درحالی که پراکندگی‌های آب در فاز آلی گرایش معکوسی را نشان می‌دهد. همچنین مشاهده شده است که کاهش کشش بین سطحی پراکندگی باعث انتقال مرزهای ناحیه دوسوگرایی به سمت پایین و پهن شدن آن می‌شود. افزودن نمک به فاز آبی نیز روی رفتار وارونگی فاز اثرگذار بوده و باعث آسان شدن وارونگی فاز در پراکندگی‌های فاز آلی در آب شده است، هرچه نمک اضافه شده از قدرت یونی بالاتری برخوردار باشد، این تأثیر بیشتر خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: پراکندگی، قطره، فاز پراکنده، فاز پیوسته، وارونگی فاز، ناحیه دوسوگرایی.

KEY WORDS: Dispersion, Drop, Dispersed phase, Continuous phase, Phase inversion, Ambivalence region.

مقدمه

۲- پراکندگی فاز آلی در فاز آبی که فاز آلی به صورت قطره در فاز آبی پراکنده می‌شود (O/W یا O/A) [۳]. فازی که به صورت قطره درون فاز دیگر پراکنده می‌شود، فاز پراکنده یا قطره و فاز دیگر، فاز پیوسته نامیده می‌شود [۴]. کنترل رفتار پراکندگی تحت شرایط عملیاتی در کاربردهای صنعتی بسیار مهم است. تحت شرایط عملیاتی پایدار، یک تعادل دینامیکی بین دو پدیده رقابت‌کننده پیوند و شکست قطره برقرار می‌شود و توزیع اندازه قطره در ظرف ثابت می‌ماند [۵ و ۶].

پراکندگی‌های مایع - مایع با یک فاز آبی و یک فاز آلی به طور گسترده در صنایع شیمیایی، دارویی و غذایی به کار گرفته می‌شود. برای مثال، در صنعت نفت، اغلب آب همراه با نفت وجود دارد و لذا آگاهی از رفتار مخلوط‌های نفت - آب مهم است [۱ و ۲]. در یک سیستم متشکل از دو مایع امتزاج ناپذیر، بسته به شرایط سیستم، دو نوع پراکندگی می‌تواند تشکیل شود:
۱- پراکندگی فاز آبی در فاز آلی که فاز آبی به صورت قطره داخل فاز آلی پراکنده می‌شود (W/O یا A/O).

+E-mail: kparisi@ut.ac.ir

*عهده دار مکاتبات

شود، ناحیه‌ای پدید می‌آید که به آن ناحیه دوسوگرایی^(۱۰) گفته می‌شود. در این ناحیه هرکدام از فازها می‌تواند پیوسته یا پراکنده باشد. این ناحیه تابعی از ویژگی‌های فیزیکی و نوع طراحی هندسی سیستم است [۱۳-۱۵].

پدیده وارونگی فاز بسیار پیچیده است و از این رو مکانیسم‌های واقعی حاکم بر آن ناشناخته است. آنچه که مسلم است، کارهای تحقیقاتی خیلی بیشتری برای معین کردن مکانیسم قطعی وارونگی فاز مورد نیاز است. روش‌های جدید تصویری، با به تصویر کشیدن فرایند وارونگی فاز، مبنایی برای توسعه یک مدل نظری برای وارونگی فاز است. تا زمانی که مدل‌های پیشرفته‌تری مطرح نشود، فرض می‌شود که وارونگی فاز تابعی از سرعت‌های پیوند و شکست قطره است و لذا هر عامل مؤثر بر این پدیده‌ها بر فرایند وارونگی نیز اثر خواهد گذاشت [۱ و ۳].

توانایی پیش‌بینی نقطه وارونگی فاز از آغاز تحقیق درباره‌ی این پدیده، هدفی فراگیر بود. یک همبستگی نظری میان نقطه وارونگی فاز با پارامترهای فیزیکی و فیزیکی - شیمیایی مؤثر بر فرایند وارونگی، تعداد آزمایش‌های مورد نیاز را برای پیش‌بینی نقطه وارونگی یک سیستم شیمیایی ویژه به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. با وجود تحقیقات وسیعی که روی وارونگی فاز انجام شده است، تلاش‌های نظری به نسبت کمی برای پیش‌بینی نقطه وارونگی فاز انجام شده است. همبستگی‌های تجربی تا حدودی ارایه شده است اما متأسفانه مقدار تفاوت بین پیش‌بینی‌های این همبستگی‌ها قابل توجه است. کوین^(۱۱) و سیگل^(۱۲) (۱۹۶۳) از نخستین محققانی بودند که با پیشنهاد این که منحنی‌های وارونگی از رابطه‌هایی پیروی می‌کند که در آن کسر حجمی فاز آلی در وارونگی ($\Phi_{o,i}$) با معکوس توان ورودی (P) متناسب است، تلاش در پیش‌بینی نقطه وارونگی فاز در ظرف‌های هم‌زن دار داشتند:

$$\Phi_{o,i} = \Phi'_{o,i} + \frac{\alpha}{P} \quad (1)$$

در معادله‌ی بالا $\Phi'_{o,i}$ ، مقدار مجانبی کسر حجمی فاز آلی پراکنده در وارونگی و α یک عدد ثابت است.

اگر سیستم از تعادل منحرف شود، یعنی سرعت پیوند قطره از سرعت شکست آن بیشتر شود، یک پیوند ناگهانی در قطره‌های فاز پراکنده روی می‌دهد و این فاز به صورت پیوسته درمی‌آید. پدیده تبدیل فاز پراکنده به پیوسته و برعکس، تحت شرایط شیمیایی و فیزیکی معین، وارونگی فاز نامیده می‌شود [۳، ۷ و ۸]. این پدیده به سیستمی با ویژگی‌های متفاوت می‌انجامد که در برخی موردها، مانند تولید کره نباتی مارگارین می‌تواند سودمند باشد اما در بیشتر موردها، مانند تغییر ماهیت امولسیون‌های^(۱) دارویی و غذایی، زیان‌آور است [۶ و ۹].

همان‌طور که ذکر شد پدیده وارونگی فاز، یک پدیده خود به خودی و آنی است، اما در برخی آزمایش‌ها نشان داده شده که وارونگی همراه با زمان تأخیری^(۲) بین ۵ تا ۱۵۰۰ ثانیه است که این زمان تأخیر تابعی از ویژگی‌های مایعات است [۱۰].

کسر حجمی فاز پراکنده در نقطه وارونگی (کسر حجمی بحرانی فاز پراکنده) به موردهایی بستگی دارد که عبارتند از:

۱- ویژگی‌های فیزیکی - شیمیایی سیال‌ها (مانند گرانش و کشش بین‌سطحی)

۲- شرایط عملیاتی (مانند سرعت هم‌زدن، نوع پره^(۳))

۳- شرایط اولیه (مانند جای پره و فاز پراکنده اولیه)

۴- ویژگی‌های ترشوندگی^(۴) پره و ظرف

۵- وجود مواد فعال سطحی^(۵) و مواد افزودنی

۶- دما [۳ و ۶]

به‌طور کلی وارونگی فاز شامل سه نوع است:

الف) وارونگی ناگهانی یا تخریبی^(۶)، که در اثر تغییر در کسر حجمی دو فاز روی می‌دهد.

ب) وارونگی تدریجی یا انتقالی^(۷)، که در اثر تغییر در گرایش انحلال ماده فعال سطحی به یکی از دو فاز به وجود می‌آید.

ج) وارونگی تحت افزایش دما^(۸) [۹، ۱۱ و ۱۲].

بیشتر کارهایی که تاکنون صورت گرفته است درباره وارونگی فاز در ظرف‌های هم‌زن دار^(۹) است. اگر نمودار تغییرهای کسر حجمی فاز آلی درحالتی که انرژی مکانیکی برای ایجاد قطره (هم‌زدن) به کار برده می‌شود، برحسب انرژی ورودی یا سرعت هم‌زدن رسم

(۱) Emulsion

(۲) Delay time

(۳) Impeller

(۴) Wetting characteristic

(۵) Surfactant

(۶) Catastrophic inversion

(۷) Transitional inversion

(۸) Phase inversion upon temperature

(۹) Agitated vessel

(۱۰) Ambivalent region

(۱۱) Quinn

(۱۲) Sigloh

سریع قطره‌های ریز، بیشتر به وسیله‌ی نیروهای ویسکوز کنترل می‌شود تا نیروهای اینرسی، یه و همکاران^(۴) (۱۹۶۴) رابطه‌ی مستقیمی بین کسر حجمی فاز در وارونگی و نسبت گرانروی پیشنهاد کردند. در کار آنها، کسر حجمی فاز پراکنده در وارونگی $(\phi_{d,i})$ چنین بیان می‌شود:

$$\frac{\phi_{d,i}}{1-\phi_{d,i}} = \sqrt{\frac{\eta_d}{\eta_c}} \quad (۵)$$

همچنین یه و همکاران پیشنهاد کردند که پیش‌بینی‌های بالا را می‌توان با جایگزینی گرانروی بین سطحی به‌جای گرانروی فاز پیوسته، اصلاح کرد. تفاوت قابل توجهی بین همبستگی‌های گزارش شده وجود دارد. باید توجه داشت که در بین معادله‌های پیشنهاد شده، معادله‌ی واحد که بتوان طراحی تجهیزات را براساس آن انجام داد وجود ندارد و نیز هریک از همبستگی‌های توضیح داده شده بر مبنای سیستم‌های تعادلی است، درحالی که در عمل بایستی انتقال جرم نیز در نظر گرفته شود [۳]. مدلی دیگر که یئو و همکاران^(۵) (۲۰۰۲) در این زمینه ارائه کرده‌اند به صورت زیر است:

$$\frac{\phi_{o,i}}{1-\phi_{o,i}} = \frac{d_{32} o/w}{d_{32} w/o} \quad (۶)$$

در معادله‌ی (۶)، d_{32} قطر میانگین حجمی - سطحی ساتر^(۶) است. این مدل یک ابزار پیش‌بینی کننده ساده برای مدل کردن وارونگی فاز در مخلوط‌های معلق مایع - مایع است. هرچند این مدل تنها به بررسی وقوع وارونگی فاز در ظرف‌های هم‌زن‌دار محدود می‌شود ولی با این حال، یک ابزار ساده و مناسب نیز برای پیش‌بینی پدیده وارونگی فاز در سیستم‌های دیگر است.

از آنجا که وارونگی فاز یک فرایند خود به خودی است، پیشنهاد شده است که محتوای انرژی کل سیستم در نقطه وارونگی فاز، کمینه است. این موضوع تا زمانی که تغییر قابل توجهی در نیروی وارد شده به سیستم صورت نگیرد، قابل مشاهده است و همچنین، همواره یک کاهش در انرژی فصل مشترک، در نقطه‌ای که وارونگی فاز روی می‌دهد وجود دارد. بنابراین کمینه انرژی کل سیستم، هنگامی که انرژی فصل مشترک و انرژی جنبشی کل سیستم دوباره توزیع شوند، روی می‌دهد. بنابراین،

لانینگ^(۱) و ساویستوسکی^(۲) (۱۹۷۱)، یک همبستگی برای پهنای گستره دوسوگرایی (W) ارائه کرده و اظهار کردند که کشش بین سطحی (σ) یکی از عامل‌های اصلی مؤثر بر آن است. براساس رابطه آنها، پهنای گستره دوسوگرایی براساس کسرهای حجمی فاز پراکنده چنین است:

$$W = \phi_{o,i}^U - \phi_{o,i}^L = (0.094N_I - 64.0)\sigma^{-(0.82+0.66 \times 10^{-3}N_I)} \quad (۲)$$

در معادله‌ی بالا $\phi_{o,i}^U$ و $\phi_{o,i}^L$ به ترتیب کسر حجمی فاز آلی پراکنده برای منحنی پایینی و بالایی وارونگی و N_I سرعت هم‌زدن پره است.

فخرالدین^(۳) (۱۹۷۳) ملاحظه کرد که معادله‌ی بالا در سرعت‌های هم‌زدن کم‌تر از $680/85$ دور در دقیقه، مقدارهای منفی به‌دست می‌دهد و هنگام برابری با این مقدار سرعت، پهنای این ناحیه صفر خواهد شد. او ملاحظه کرد که اگر این اشتباه نتیجه‌ی کار لانینگ و ساویستوسکی نباشد، به احتمال این مقدار مربوط به سرعت بحرانی هم‌زدن در دستگاه‌های آنان است. همچنین او دو همبستگی برای پیش‌بینی نقاط وارونگی برای منحنی‌های بالا و پایین وارونگی براساس این معیار که چون وارونگی فاز، فرایندی خود به خودی است پس باید محتوای انرژی کل سیستم کمینه شود، به دست آورد:

الف - منحنی وارونگی بالایی

$$\phi_{o,i}^U = 1.32 \times 10^{-6} \left(\frac{\eta_d}{\eta_c} \right)^{0.32} \left(\frac{\Delta p}{\rho_c} \right)^{-0.11} Fr_I^{-0.71} Re_I^{1.06} We_I^{-0.25} \quad (۳)$$

ب - منحنی وارونگی پایینی

$$\phi_{o,i}^L = 1.32 \left(\frac{\eta_d}{\eta_c} \right)^{0.31} \left(\frac{\Delta p}{\rho_c} \right)^{0.4} Fr_I^{0.73} Re_I^{0.22} We_I^{-0.22} \quad (۴)$$

در معادله‌های بالا η_d و η_c به ترتیب گرانروی فاز پراکنده و فاز پیوسته، ρ_c فاز پراکنده، Δp تفاوت چگالی بین فازهای پراکنده و پیوسته و We_I ، Re_I و Fr_I به ترتیب عددهای فرود، رینولدز و ویر پره هستند.

با این نتیجه‌گیری که گسترش وارونگی فاز به وسیله‌ی پیوند

(۱) Luhnig

(۲) Sawistowski

(۳) Fakhr-Din

(۴) Yeh et al.

(۵) Yeo et al.

(۶) Sauter

پره، $\lambda(d)$ بسامد پیوند با در نظر گرفتن تابع توزیع شعاعی و $d(d)$ بسامد شکست دو جزئی است. زیر نویس‌های c و i نیز به ترتیب مربوط به ناحیه چرخش و ناحیه پره ظرف است. معادله‌ی بالا را می‌توان برای به دست آوردن تنها متغیر مجهول، یعنی کسر حجمی فاز پراکنده حل کرد. نتیجه‌ها و پیش‌بینی‌های مدل به ویژه برای منحنی بالایی دوسوگرایی از انطباق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی برخوردار است (وارونگی از O/W به W/O)، با این حال بین پیش‌بینی‌های انجام شده برای منحنی پایینی دوسوگرایی و نتیجه‌ها و داده‌های آزمایشی، انطباق خوبی برقرار نیست [۱].

در این تحقیق، تعدادی از جنبه‌های رفتاری مربوط به وارونگی فاز در پراکندگی‌های مایع - مایع بررسی می‌شود. منحنی‌های وارونگی فاز (منحنی‌های دوسوگرایی) به‌طور آزمایشی برای دو نوع سیستم مایع - مایع با ویژگی‌های فیزیکی متفاوت تعیین می‌شود و برای تحقیق اثرهای پارامترهایی که در پی می‌آید، این منحنی‌ها با هم مقایسه می‌شود. پارامترهای مورد مطالعه در این تحقیق، اثر سرعت هم‌زدن، کسر حجمی فاز پراکنده و ویژگی‌های فیزیکی سیالات به ویژه کشش بین سطحی است. همچنین اثر اضافه کردن نمک در فاز آبی روی رفتار وارونگی فاز در پراکندگی‌های O/W بررسی می‌شود.

بخش تجربی

مواد

در جدول ۱، ویژگی‌های فیزیکی - شیمیایی سیستم‌های مایع - مایع مورد استفاده در آزمایش‌های وارونگی فاز آورده شده است. آب مورد استفاده در آزمایش‌ها، از نوع آب مقطر یک مرحله‌ای است. به منظور بررسی اثر وجود نمک روی وارونگی فاز از دو نوع نمک معدنی استفاده شده که عبارت است از:

۱- سدیم کلرید (NaCl)

۲- منیزیم سولفات ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$)

به منظور ردیابی و مشاهده وقوع وارونگی فاز از دو نوع ردیاب استفاده شده است که هر کدام، بدون آن که تأثیری در سیستم داشته باشند، در یکی از فازها حل شده و آن را رنگی می‌کند. ردیاب‌های استفاده شده در آزمایش‌ها، متیلن آبی^(۲) و سودان قرمز^(۳) است که

میزان تغییر در انرژی فصل مشترک با انرژی کل سیستم قابل مقایسه است و تغییر در انرژی جنبشی کم‌تر با تغییر در انرژی فصل مشترک نزدیک وارونگی قابل مقایسه است و بنابراین، مدل وارونگی فاز با کمینه شدن انرژی فصل مشترک، این معیار را که انرژی کل سیستم بایستی کمینه شود، برآورده می‌کند.

از ویژگی‌های مهم مشاهده شده به وسیله‌ی این مدل، گرایش یک فاز به پیوسته شدن با افزایش گرانیوی آن فاز و عدم تقارن بین منحنی‌های بالایی و پایینی دوسوگرایی است. یک مشاهده جالب در این مدل، عدم وابستگی مدل به سرعت هم‌زدن است که این موضوع، هنگامی که اثر ترشوندگی برای مثال، در ظرف هم‌زدن‌دار ناچیز باشد، مشهود است. با این وجود، عدم توانایی مدل برای دربرگرفتن وابستگی گسترده دوسوگرایی به سرعت هم‌زدن، یک محدودیت به توانایی پیش‌بینی آن وارد می‌کند و بدین‌وسیله مدل را هنگامی که شدت هم‌زدن برای جلوگیری از ته‌نشینی کافی باشد، در سرعت‌های بالای هم‌زدن که کسر حجمی وارونگی فاز به یک مقدار ثابت مجانبی می‌رسد، محدود می‌کند. این مدل ساده می‌تواند مبنایی برای توسعه مدل‌های دقیق‌تر با پیش‌بینی اثرهای پسماند^(۱) وارونگی فاز در سیستم‌های متفاوت قرار داده شود [۱۶].

مدل دیگر در این زمینه، مدل معروف به مدل دو ناحیه‌ای است. همان‌طور که در پیش ذکر شد، در مخلوط‌های معلق یک تعادل دینامیکی بین شکست و پیوند قطره وجود دارد و وارونگی فاز هنگامی که این تعادل از بین برود، روی می‌دهد. در سیستم‌های ناهمگن، مانند ظرف‌های هم‌زدن‌دار، فرایندهای شکست و پیوند قطره در نواحی متفاوتی روی می‌دهد. در این مدل از این فرض استفاده شده است که شکست قطره در ناحیه پره که در آن جریان خیلی آشفته است روی می‌دهد و پیوند نیز در ناحیه چرخش که در آن جریان خیلی کم‌تر آشفته است روی می‌دهد. وارونگی فاز هنگامی روی می‌دهد که سرعت پیوند در ناحیه چرخش از سرعت شکست در ناحیه پره بیشتر شود یا:

$$[N(d_{T,c})(V_T - V_I)]^2 \lambda(d_{T,c}, d_{T,c}) > N(d_{T,c}) V_{IG}(d_{T,c}) \quad (7)$$

در معادله‌ی بالا، $N(k)$ تعداد قطره‌ها با اندازه d_k بر واحد حجم V_I و V_T به ترتیب حجم کلی ظرف هم‌زدن‌دار و حجم ناحیه

(۱) Hysteresis

(۲) Methylene blue

(۳) Sudan red

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی - شیمیایی سیستم‌های مایع - مایع استفاده شده در آزمایش‌های وارونگی فاز.

سیستم مایع - مایع	تولوئن - آب	نرمال هپتان - آب
$\rho_{org} (kg/m^3)$	۸۶۷	۶۸۳٫۷
$\rho_{aq} (kg/m^3)$	۹۹۶٫۸۴	۹۹۷
$\mu_{org} (mPa.s)$	۰٫۶۶۸۹	۰٫۴۵۰۲
$\mu_{aq} (mPa.s)$	۰٫۸۱۴	۰٫۸۵۶
$\sigma (mN/m)$	۳۶٫۱	۵۰٫۱

جدول ۲- ویژگی‌های ظرف‌های همزن‌دار.

قطر داخلی ظرف	۹٫۵ سانتی‌متر
قطر خارجی ظرف	۱۰ سانتی‌متر
ارتفاع ظرف	۱۶ سانتی‌متر
جنس ظرف	شیشه
قطر محور مرکزی	۰٫۸ سانتی‌متر
قطر پره	۴ سانتی‌متر
عرض پره	۴٫۶ سانتی‌متر
جنس پره	استیل
نوع پره	استوانه‌ای

آلی است، هنگامی که پراکندگی فاز آبی در فاز پیوسته آلی از (W/O) به گونه‌ی دیگر (O/W) تبدیل می‌شود، افزایش ناگهانی در رسانایی دیده می‌شود. بنابراین، اندازه‌گیری جریان را می‌توان برای آگاهی از این که کدام فاز پیوسته و کدام فاز پراکنده است به کار برد.

روش انجام آزمایش

در ابتدا فاز آبی و آلی را با هم مخلوط کرده تا هر دو فاز آبی و آلی به طور کامل از یکدیگر اشباع شوند تا از هرگونه حلالیت بعدی و انتقال جرم دوسویه بین فازهای جانبی آن جلوگیری شود. حجم مشخصی از فاز پیوسته در ظرف آزمایش ریخته و ردیاب مورد نظر هم به آن اضافه می‌شود. سپس با توجه به کسر حجمی مورد نظر، حجم مورد نیاز فاز پراکنده و ردیاب به آهستگی اضافه می‌شود. مشاهده می‌شود که دو فاز آبی و قرمز مجزا از هم

اولی در فاز آبی حل شده و آن را به رنگ آبی در می‌آورد و دومی در فاز آلی حل می‌شود و آن را به رنگ قرمز در می‌آورد. همه مواد شیمیایی مورد استفاده از نوع خالص (با درجه خلوص بالاتر از ۹۹ درصد) و از کارخانه مرک^(۱) آلمان تهیه شده است.

برای اندازه‌گیری جرم‌های ویژه (چگالی) هریک از دو فاز تشکیل دهنده سیستم شیمیایی از چگالی‌سنج (پیکنومتر) دارای حجم ۲۵ میلی‌لیتر و ترازوی با دقت ۰٫۹۹۱ گرم استفاده شده است. اندازه‌گیری مقدار گرانیوی (گرانیوی) فازها به وسیله‌ی دستگاه ویسکومتر شیشه‌ای مدل کانون - فنسک، ساخت آلمان (Cannon-Fenske; Instrument, GMBH & CO KG) و با استفاده از زمان سنج با دقت ۰٫۱ ثانیه انجام شده است.

اندازه‌گیری مقدار کشش بین سطحی دو فاز در هر سیستم شیمیایی به وسیله‌ی دستگاه تنشومتر دیجیتالی با نام کروس، مدل K1۰T ساخت آلمان با استفاده از روش "صفحه‌ی پلاتین" انجام شده است.

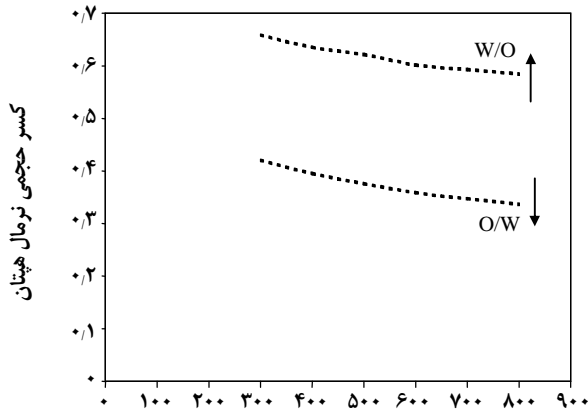
شرح دستگاه

به منظور ایجاد پراکندگی مایع - مایع در یک سیستم ناپیوسته و همچنین بررسی چگونگی تأثیر عامل‌های متفاوت فیزیکی - شیمیایی روی پدیده وارونگی فاز، از یک همزن دیجیتالی استفاده شده است. همزن مورد استفاده، همزن الکتریکی دیجیتالی مدل ST۱۴۰۰، ساخت شرکت طب‌آزما است که برای هم‌زدن و مخلوط کردن محلول‌های غلیظ یا سنگین (با گرانیوی بالا) و محلول‌های رقیق یا سبک (با گرانیوی پایین) به کار برده می‌شود. این دستگاه، مجهز به نشان‌گر دیجیتالی برای کنترل دقیق تعداد دور در دقیقه (دورسنج) با بازه‌ی ۵۰ الی ۱۴۰۰ دور در دقیقه است. ویژگی‌های ظرف همزن‌دار مورد استفاده در جدول ۲ ارایه شده است.

از آنجایی که مشاهده وارونگی فاز در ظرف‌های همزن‌دار به ویژه در سرعت‌های بالای هم‌زدن دشوار است، برای تشخیص نقطه وارونگی از یک رساناسنج استفاده شده است. رساناسنج مورد استفاده، مدل CMD۵۱۰ ساخت شرکت WPA انگلیس و از نوع دیجیتالی به همراه الکترون و پایه نگه دارنده است.

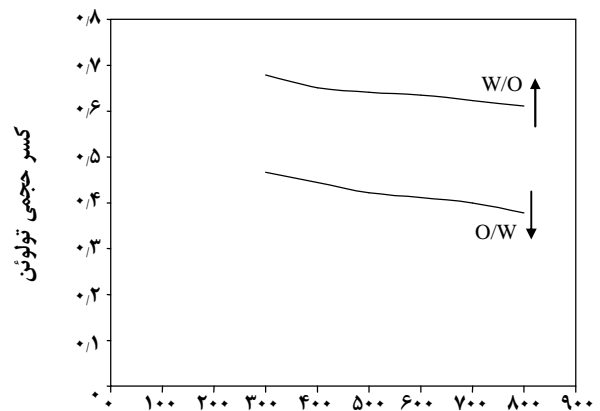
نحوه تشخیص وارونگی فاز به کمک رساناسنج به این صورت است که در نقطه وارونگی فاز، تغییر آشکاری در رسانش الکتریکی رخ می‌دهد و چون رسانایی الکتریکی فاز آبی بسیار بیشتر از فاز

(۱) Merck



سرعت همزن (دور در دقیقه)

شکل ۲- گستره‌ی دوسوگرایی برای سیستم تولوئن - آب.



سرعت همزن (دور در دقیقه)

شکل ۱- گستره‌ی دوسوگرایی برای سیستم نرمال هپتان - آب.

نتیجه‌ها و بحث

اثر سرعت هم‌زدن روی وارونگی فاز

شکل‌های ۱ و ۲ رفتار دوسوگرایی را به ترتیب برای سیستم‌های نرمال هپتان - آب و تولوئن - آب نشان می‌دهد. در این شکل‌ها، تغییرهای کسر حجمی فاز آلی در اثر تغییرهای سرعت هم‌زن برحسب دور بر دقیقه رسم شده است. منحنی بالایی در این شکل‌ها، تغییر کسر حجمی فاز پراکنده را در وارونگی با سرعت هم‌زن برای وارونگی پراکنده‌ی فاز آلی در آب به پراکنده‌ی آب در فاز آلی نشان می‌دهد. منحنی پایینی نیز همان ویژگی‌ها را برای وارونگی در حالت معکوس نشان می‌دهد.

با توجه به شکل‌ها، مشخص است که در کسرهای حجمی کوچک‌تر از ۰/۵ فاز پراکنده (فاز آلی یا فاز آبی) در عمل وارونگی فاز اتفاق نمی‌افتد. البته بازه به دست آمده با شرایط عملیاتی و هیدرودینامیکی سیستم ارتباط نزدیک دارد. اما یک گستره‌ی باریکی از کسرهای حجمی وجود دارد که در آن کسر حجمی فاز پراکنده در وارونگی با سرعت هم‌زن تغییر می‌کند.

بین وارونگی از یک پراکنده‌ی فاز آلی در آب و وارونگی از یک پراکنده‌ی آب در فاز آلی، وجود یک اثر پسماند مشاهده می‌شود که خود را به وسیله تشکیل یک ناحیه دوسوگرایی یعنی گستره‌ای از کسرهای حجمی فاز آلی که در آن هر کدام از فازهای آبی یا آلی می‌تواند پیوسته باشد، نشان می‌دهد. گستره دوسوگرایی برابر است با تفاوت پتانسیل بین پیوند و شکست در پراکنده‌ی فاز آلی پیوسته و فاز آبی پیوسته [۱].

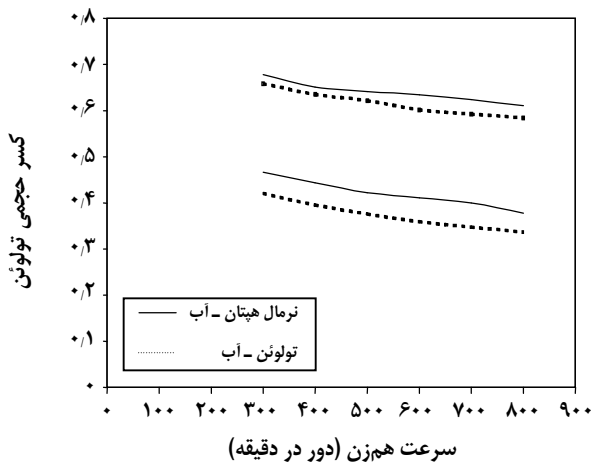
همان‌طور که در شکل‌ها مشخص است، ویژگی‌های وارونگی فاز برای دو نوع پراکنده‌ی فاز آلی در آب و آب در فاز آلی متفاوت

که به وسیله‌ی یک سطح مشترک از هم جدا می‌شوند، تشکیل می‌شود. در سرعت‌های خیلی پایین، هیچ‌گونه پراکنده‌ی مشاهده نمی‌شود. به‌طور کلی برای پراکنده‌ی یک فاز در فاز دیگر، یک حداقل سرعت هم‌زن مورد نیاز است که برای هر نوع سیال (نیوتنی یا غیرنیوتنی) و ویژگی‌های آن (گرانروی، چگالی) و با توجه به نوع و ویژگی‌های هندسی پره، این حداقل سرعت در مراجع ذکر شده است [۱۷].

در هر آزمایش (یعنی در هر کسر حجمی معین از فاز پراکنده)، دور هم‌زن را تغییر داده و سپس وقوع پدیده وارونگی فاز بررسی شد. در مرحله‌های بعدی، ۵ درصد به کسر حجمی فاز پراکنده افزوده و آزمایش با تغییر دور هم‌زن تکرار شد. در هر آزمایش، پدیده وارونگی در یک دور ویژه اتفاق می‌افتد.

بنابراین، باید تمام مرحله‌های هر آزمایش با دقت کامل کنترل شود و افزایش دور هم‌زن باید با دقت و تحت کنترل باشد تا مشکلی از لحاظ نوع پراکنده‌ی پیش نیاید، بنابراین برای اطمینان از نتیجه‌های آزمایش، تعداد آزمایش‌ها در هر کسر حجمی، ۲ تا ۳ بار تکرار شد.

به منظور بررسی اثر وجود نمک بر وارونگی فاز، آزمایش‌ها با حل کردن مقادیرهای متفاوتی از غلظت‌های مولی نمک‌ها در فاز آبی برای هر سیستم دو جزئی و برای هر نمک منفرد تکرار شد. آزمایش‌ها برای ۳ غلظت مولی از هر نمک به طور جداگانه در هر سیستم شیمیایی انجام شد و وقوع وارونگی فاز و اثر وجود نمک روی آن بررسی شد. آزمایش‌ها در دما و فشار محیط یعنی فشار اتمسفری و دمای ۱۸ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد.



شکل ۳- مقایسه رفتار دوسوگرایی برای سیستم تولوئن - آب و نرمال هپتان - آب.

بحرانی بالاتری برای فاز پراکنده می‌انجامد [۳ و ۸]. در آزمایش‌ها نیز مشاهده شد که با افزایش سرعت هم‌زدن، تعداد قطره‌ها افزایش ولی اندازه آن کاهش یافت، اما با افزایش بیشتر سرعت هم‌زدن و نزدیک شدن به نقطه وارونگی فاز، به علت افزایش پیوند قطره‌ها، قطره‌های بزرگ‌تری مشاهده شد.

اثر کشش بین سطحی روی وارونگی فاز

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، تغییر سیستم شیمیایی از نرمال هپتان - آب به تولوئن - آب، باعث پایین آمدن مرزهای دوسوگرایی و پهن شدن منحنی دوسوگرایی شده است. دلیل چنین رفتاری به تغییر ویژگی‌های فیزیکی فاز آلی و کشش بین سطحی در این دو سیستم بستگی دارد.

از آنجا که با تغییر سیستم شیمیایی از نرمال هپتان - آب به تولوئن - آب، مقدار کشش بین سطحی کاهش می‌یابد (از ۵۰/۱ به ۳۶/۱ mN/m) و با توجه به این که مقدار تغییر کشش بین سطحی در دو سیستم در مقایسه با تغییر سایر ویژگی‌های فیزیکی بیشتر است، به نظر می‌رسد که رفتار دوسوگرایی شکل ۳ را برای دو سیستم متفاوت بتوان با اثر کشش بین سطحی روی وارونگی فاز توضیح داد.

با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که منحنی بالایی و پایینی دوسوگرایی برای سیستم نرمال هپتان - آب با کاهش کشش بین سطحی به سمت پایین انتقال پیدا کرده است. منحنی بالایی دوسوگرایی برای سیستم نرمال هپتان - آب تفاوت کم‌تری با

است. با افزایش سرعت هم‌زدن، کسر حجمی فاز آلی لازم برای وارونگی فاز در پراکندگی‌های O/W (منحنی بالایی دوسوگرایی) کاهش پیدا می‌کند. این رفتار را می‌توان با افزایش بسامد پیوند به علت افزایش سرعت هم‌زدن توجیه کرد.

با این وجود منحنی پایینی که بیان‌گر وارونگی فاز از W/O به O/W است با افزایش سرعت هم‌زدن، کسر حجمی فاز آلی بالاتری را برای وقوع وارونگی فاز در پراکندگی‌های W/O پیش‌بینی می‌کند. این پدیده ممکن است مربوط به این واقعیت باشد که قطره‌های آب در محیط فاز آلی، به علت نبودن نسبی نیروهای دافعه الکتروستاتیکی، به طور مؤثری می‌توانند با هم پیوند یابند، یعنی قطره‌های آبی در مقایسه با قطره‌های فاز آلی در محیط آبی، که به دلیل هم‌پوشانی لایه‌های مضاعف الکتریکی اطراف قطره‌های فاز آلی که به هم می‌رسند، یکدیگر را می‌رانند، چنین نیروهای دافعه مشابهی را از خود نشان نمی‌دهند. این بدان معناست که برخی از پیوندهای قطره‌های آبی در فاز آلی می‌تواند در ناحیه پره نیز ظاهر شود که باعث اصلاح اندازه متوسط قطره خواهد شد [۱ و ۸].

تفسیر روند معکوس منحنی وارونگی پایینی نسبت به منحنی بالایی، نیازمند در نظر گرفتن مسایل دیگری است. از آنجایی که ساختار قطره‌های ریز در قطره (پراکندگی ثانویه^(۱)) فقط در پراکندگی‌های آب در فاز آلی مشاهده شده است، می‌توان این رفتار منحنی پایینی دوسوگرایی را توجیه کرد. مشخص شده است که کسر حجمی مؤثر برای وارونگی یک پراکندگی W/O از کسر حجمی اندازه‌گیری شده بیشتر است، زیرا قطره‌های آبی حاوی قطره‌های ریز فاز آلی در داخل خود است. افزایش سرعت هم‌زدن، قطره‌های کوچک‌تری با نیروی بازگرداننده‌ی بالا و نوسان‌های متناوب بیشتر پدید می‌آورد که به کاهش مقدار فاز خارجی به دام افتاده در درون فاز پراکنده می‌انجامد و در نتیجه کسر حجمی مؤثر فاز پراکنده کم می‌شود. با افزایش سرعت هم‌زدن، کاهش شدیدی در تفاوت بین اندازه‌ی میانگین قطره‌ها برای پراکندگی‌های فاز آلی در آب و آب در فاز آلی روی می‌دهد که از سویی دیگر اندازه میانگین قطره‌ها ارتباط مستقیمی با مقدار فاز خارجی به دام افتاده در فاز آبی پراکنده در پراکندگی‌های آب در فاز آلی دارد. لذا پدیده وارونگی فاز در سرعت‌های بالای هم‌زدن، تنها هنگامی روی می‌دهد که فاز پراکنده بیشتری برای افزایش کسر حجمی مؤثر آن در کل سیستم اضافه شود، که در نتیجه به کسرهای حجمی

(۱) Secondary dispersion

وارونگی فاز روی می‌دهد کاهش می‌دهد، یعنی وقوع وارونگی فاز آسان‌تر می‌شود و منحنی بالایی وارونگی فاز به سمت پایین منتقل می‌شود که این اثر در مورد نمک منیزیم سولفات بیشتر است. به عبارت دیگر، افزایش غلظت نمک در فاز آبی، کسر حجمی بحرانی فاز پراکنده را برای پراکندگی‌های O/W کاهش داده است. این نتیجه‌ها مطابق با یافته‌های تجربی نوراتو و همکاران (۱۹۹۸) و کومار (۱۹۹۶) است [۶ و ۸].

اثر نمک روی کسر حجمی به احتمال به یکی از دلیل‌های زیر است:

۱- اثر نمک روی کشش بین سطحی و گرادیان آن

۲- اثر نمک روی برهم کنش‌های الکترواستاتیکی

دلیل اول به این علت که به پیوند کمینه‌ای در غیاب نمک می‌انجامد، قابل قبول نیست و در تناقض با همه بررسی‌های تجربی پیشین است. در ضمن اندازه‌گیری‌های ویژگی‌های سیال‌ها (گرانروی، چگالی و کشش بین سطحی) نشان می‌دهد که تفاوت از سیستم‌های خالص در گستره خطای آزمایشگاهی است و لذا می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. از این‌رو برای توضیح این رفتار باید از دلیل دوم استفاده کرد.

پژوهشگرانی با اندازه‌گیری‌های الکتریکی حرکت ذره‌های معلق^(۱) دریافته‌اند که حتی هنگامی که هیچ یون اضافه شونده‌ای وجود ندارد، قطره‌های فازهای هیدروکربنی، قطبی یا غیرقطبی، پتانسیل زتای^(۲) قابل توجهی را دارا می‌باشند و چنانچه pH فاز آبی افزایش یابد، پتانسیل زتای قطره‌ها منفی‌تر می‌شود. بنابراین، در سیستم‌های مایع-مایع خالص، قطره‌ها باردار می‌شوند. منشاء این بار به دقت مشخص نیست. بعضی از پژوهشگران آن را به علت جذب سطحی گزینشی یون‌های هیدروکسیل روی سطح مشترک نسبت داده‌اند. وجود این بار به وسیله‌ی اندازه‌گیری‌های اسمز الکتریکی^(۳) نیز ثابت شده است. قانون تجربی کوهن نیز وجود این بار را تأیید می‌کند [۸].

اضافه کردن نمک به پراکندگی، باعث افزایش قدرت یونی فاز آبی می‌شود و دافعه الکترواستاتیکی بین دو قطره فاز آبی باردار را در فاز آبی کاهش می‌دهد. وجود یون‌ها، لایه مضاعف الکتریکی را تا اندازه‌ای که نیروهای جاذبه وان‌در‌والس با نیروهای دافعه الکتریکی هم‌پوشانی کند، متراکم می‌کند. این اثر، بارهای سطحی را خنثی می‌کند و در نتیجه بازده پیوند افزایش می‌یابد و لذا

سیستم تولوئن- آب در مقایسه با منحنی پایینی دارد، یعنی کاهش کشش بین سطحی در منحنی بالایی دوسوگرایی تغییر به نسبت کم‌تری ایجاد کرده است، درحالی که منحنی پایینی دوسوگرایی با کاهش کشش بین سطحی به مقدار به نسبت بیشتری به پایین منتقل شده است که در مجموع باعث پهن شدن گستره‌ی دوسوگرایی شده است. به‌طور کلی همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، کاهش کشش بین سطحی یک سیستم مایع- مایع، پایداری پراکندگی‌های فاز آبی پیوسته را افزایش داده ولی پایداری پراکندگی‌های فاز آلی پیوسته را کاهش می‌دهد.

کاهش کشش بین سطحی، باعث ایجاد نیروی دافعه بین مولکولی در بین قطره‌ها می‌شود که باعث می‌شود قطره‌ها به هم نزدیک شوند. کاهش کشش بین سطحی، شکست قطره را آسان می‌کند و باعث پایداری سطح مشترک می‌شود و همچنین از پیوند مجدد قطره‌ها جلوگیری می‌کند، در نتیجه اندازه قطره باید کوچک‌تر باشد. از این رو، پیوند در درصد بالاتری از فاز پراکنده روی خواهد داد [۱۸]. هر دو اثر افزایش شکست قطره و کاهش سرعت پیوند قطره، کسر حجمی بالاتر فاز پراکنده را برای وقوع وارونگی فاز پیشنهاد می‌کند.

شکل ۳ نشان می‌دهد که در سیستم تولوئن- آب (کشش بین سطحی کم‌تر) کسر حجمی فاز پراکنده در وارونگی فاز، بیش از سیستم نرمال هپتان- آب برای وارونگی فاز پراکنده‌ی آب در فاز آلی به مخلوط معلق فاز آلی در آب می‌باشد. این مشاهده با رفتار مورد انتظار تطابق دارد، اما کسر حجمی فاز پراکنده در وارونگی فاز در سیستم آب- تولوئن کم‌تر از مقدار آن در سیستم آب- نرمال هپتان برای وارونگی پراکنده‌ی فاز آلی در آب به پراکنده‌ی آب در فاز آلی است. این مشاهده برخلاف رفتار مورد انتظار است و نشان می‌دهد سایر عامل‌ها مانند چگالی و گرانروی و کشش بین سطحی نقش مؤثری در رفتار وارونگی فاز دارند [۶].

بررسی تأثیر وجود نمک بر رفتار وارونگی فاز

نتیجه‌های حاصل از آزمایش‌های وارونگی با وجود دو نمک در جدول‌های ۳ تا ۶ ارائه شده است. در این جدول‌ها ϕ_c کسر حجمی فاز آلی است. با توجه به نتیجه‌ها مشخص است که در یک کسر حجمی ثابت فاز پراکنده در پراکنده‌ی فاز آلی در آب، افزایش غلظت مولی نمک، سرعتی از هم‌زدن را که در آن

(۱) Electrophoretic

(۲) Zeta potential

(۳) Electro-osmosis

جدول ۵ - تأثیر اضافه کردن منیزیم سولفات بر وارونگی فاز در سیستم تولوئن - آب در $f_0 = 0.76$.

غلظت سدیم کلرید (mol/lit)	سرعت همزن در نقطه وارونگی فاز (rpm)
۰	۵۶۵
۰.۵	۴۸۵
۱	۴۵۵
۱.۵	۴۱۵

جدول ۶ - تأثیر اضافه کردن منیزیم سولفات بر وارونگی فاز در سیستم نرمال هپتان - آب در $f_0 = 0.76$.

غلظت سدیم کلرید (mol/lit)	سرعت همزن در نقطه وارونگی فاز (rpm)
۰	۷۷۵
۰.۵	۶۸۵
۱	۶۱۵
۱.۵	۵۷۵

جدول ۳- اثر اضافه کردن سدیم کلرید بر وارونگی فاز در سیستم تولوئن - آب در $f_0 = 0.76$.

غلظت سدیم کلرید (mol/lit)	سرعت همزن در نقطه وارونگی فاز (rpm)
۰	۵۶۵
۰.۵	۵۲۵
۱	۴۹۵
۱.۵	۴۷۵

جدول ۴- اثر اضافه کردن سدیم کلرید بر وارونگی فاز در سیستم نرمال هپتان - آب در $f_0 = 0.76$.

غلظت سدیم کلرید (mol/lit)	سرعت همزن در نقطه وارونگی فاز (rpm)
۰	۷۷۵
۰.۵	۷۲۰
۱	۶۸۵
۱.۵	۶۵۰

آزمایش‌ها حاکی از عدم تقارن بین رفتار پراکندگی‌های O/W و W/O است. به طوری که با افزایش سرعت همزدن پراکندگی‌های O/W در مقادیر کمی کمتری از کسر حجمی بحرانی فاز پراکنده وارونه می‌شود، در حالی که پراکندگی‌های W/O روند معکوسی را دنبال می‌کند (مطابق نتیجه‌های نوراتو و همکاران (۱۹۹۸) و کومار (۱۹۹۶)). دلیل آن به تشکیل پراکندگی‌های ثانویه در پراکندگی‌های W/O نسبت داده شده است که در پراکندگی‌های O/W وجود ندارد. همچنین مشاهده شد که کشش بین سطحی از جمله عامل‌های مؤثر بر وارونگی فاز است و باعث پایین آمدن و پهن شدن ناحیه دوسوگرایی می‌شود (مطابق نتیجه‌های نوراتو و همکاران (۱۹۹۸)).

همچنین اضافه کردن نمک در فاز آبی برای پراکندگی‌های O/W باعث آسان‌تر شدن وقوع وارونگی فاز می‌شود که این امر به افزایش قدرت یونی فاز آبی به واسطه افزایش غلظت نمک نسبت داده شد.

چون منیزیم سولفات قدرت یونی فاز آبی را بیشتر افزایش می‌دهد، لذا اثر آن بر تسهیل پدیده وارونگی فاز آشکارتر است که این نتیجه‌ای که در مورد نوع نمک و اثر آن بر وارونگی به دست آمد یک کار و نتیجه‌گیری جدید در این زمینه است.

پراکندگی فاز آلی در آب، در کسرهای حجمی پایین‌تر شروع به وارونگی فاز می‌کند [۶]. بنابراین، افزودن نمک به پراکندگی، قدرت یونی فاز آبی را افزایش می‌دهد و از آنجا که قدرت یونی فاز آبی بر وارونگی فاز تأثیر دارد و باعث کاهش دافعه بین قطره‌های فاز آلی و افزایش سرعت پیوند قطره‌های فاز آلی در آب می‌شود، لذا با افزایش غلظت نمک، وقوع وارونگی فاز آسان‌تر می‌شود و در کسر حجمی ثابت فاز پراکنده، وارونگی فاز در سرعت‌های کمتر هم‌زدن روی می‌دهد. از آنجا که نمک منیزیم سولفات اثر بیشتری بر افزایش قدرت یونی آب، به علت آزاد کردن یون‌های با دو بار مثبت و منفی، دارد لذا اضافه کردن آن نسبت به نمک سدیم کلرید باعث آسان‌تر شدن پدیده وارونگی فاز می‌شود و در نتیجه اثر افزایش غلظت آن در پراکندگی مشهودتر از اثر اضافه کردن سدیم کلرید است.

نتیجه‌گیری نهایی

آزمایش‌هایی که انجام شد در تطابق با کارهای قبلی روی پدیده وارونگی فاز است. در این آزمایش‌ها اثر سرعت همزدن و ویژگی‌های فیزیکی سیال و همچنین وجود نمک روی پدیده وارونگی فاز بررسی شد.

فهرست علائم

$\phi_{d,i}$	کسر حجمی فاز پراکنده در نقطه وارونگی فاز		
$\phi_{o,i}$	کسر حجمی فاز آلی پراکنده در نقطه وارونگی فاز	d_{pp}	قطر میانگین حجمی - سطحی ساتر (m)
$\phi_{o,i}^L$	کسر حجمی فاز آلی پراکنده برای منحنی پایینی وارونگی	D_I	قطر پره (m)
$\phi_{o,i}^U$	کسر حجمی فاز آلی پراکنده برای منحنی بالایی وارونگی	g	شتاب گرانشی (m^2/s)
$\phi'_{o,i}$	مقدار مجانبی کسر حجمی فاز آلی پراکنده در وارونگی	$g(d)$	بسامد شکست دوجزیی (l/s)
		$N(k)$	تعداد قطره‌ها با اندازه d_k بر واحد حجم (m^{-3})
		N_I	سرعت هم‌زدن پره (r.p.m)
	زیرنویس‌ها و اعداد بدون بعد	P	توان ورودی (W)
A,aq	فاز آبی	V_I	حجم ناحیه پره (m^3)
c	ناحیه چرخش یا فاز پیوسته	V_T	حجم کلی ظرف هم‌زن دار (m^3)
d	فاز پراکنده	W	پهنای گستره دوسوگرایی
i	ناحیه پره	α	عدد ثابت
I	پره	η	گرانروی (mPa.s)
O,org	فاز آلی	$\lambda(d)$	بسامد پیوند (s^{-1})
W	آب	ρ	چگالی (kg/m^3)
Fr_I	عدد فرود پره ($Fr_I = N_I^2 D_I^2 / g$)	μ	گرانروی مایع (mPa.s)
Re_I	عدد رینولدز پره ($Re_I = N_I D_I^2 / \nu_c$)	ν	گرانروی سینماتیک (m^2/s)
We_I	عدد ویر پره ($We_I = \rho_c N_I^2 D_I^2 / \sigma$)	σ	کشش بین سطحی (mN/m)
		ϕ_o	کسر حجمی فاز آلی

تاریخ دریافت: ۱۴/۶/۲۸ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۵/۱/۲۸

مراجع

- [1] Hu, B., Angeli, P., Matar, O. K., Hewitt, G. F., *Chem. Eng. Sci.*, **60**, p. 3487 (2005).
- [2] Ioannou, K., Nydal, O. J., Angeli, P., *Experimental Thermal and Fluid Sci.*, **29**, p. 331 (2005).
- [3] Yeo, L. Y., Matar, O. K., Perez de Ortiz, E. S., Hewitt, G.F., *Multiphase Sci. Technol.*, **12**, p. 51 (2000).
- [4] Tsouris, C., Dong, J., *Chem. Eng. Sci.*, **55**, p. 3571 (2000).
- [5] Deshande, K. B., Kumar, S., *Chem. Eng. Sci.*, **58**, p. 3829 (2003).
- [6] Norato, M. A., Tsouris, C., Tavlarides, L. L., *Can. J. Chem. Eng.*, **76**, p. 486 (1998).
- [7] Noui-Mehdi, M. N., Wu, J., Zhu, Y., *AIChE J.*, **50**, p. 3281 (2004).
- [8] Kumar, S., *Chem. Eng. Sci.*, **51**, p. 831 (1996).
- [9] Walde, A., Tesmann, H., Leonard, M., Förster, T., "Phase Inversion in Emulsions: CAPICO-Concept and Application", In "Surfactants in Cosmetics", Rieger, M.M. and Rhein, L.D. (Eds.), 2nd Ed., Marcel Dekker, NewYork (1997).
- [10] Gilchrist, A., Dyster, K. N., Moore, I. P. T., Nienow, A. W., Carpenter, K. J., *Chem. Eng. Sci.*, **44**, p. 2381 (1989).
- [11] Sajjadi, S., Zerfa, M., Brooks, B. W., *Colloids Surf. A: Phys. Eng. Aspects*, **218**, p. 241 (2003).

- [12] Bouchma, F., Van Aken, G.A., Autin, A. J. E., Koper, G. J. M., *Colloids Surf. A: Phys. Eng. Aspects*, **231**, p. 11 (2003).
- [13] Davis, G. A., "Mixing and Coalescence Phenomena in Liquid-Liquid Systems", Science and Practice of Liquid-Liquid extraction, Vol. 1, Thornton, J. D., Ed., Oxford, London (1992).
- [14] McClarey, M. J., Mansoori, G. A., *AIChE Symposium Series*, **74**, p. 134 (1978).
- [15] Arashmid, M., Jeffreys, G. V., *AIChE J.*, **26**, p. 51 (1980).
- [16] Yeo, L. Y., Matar, O.K., Perez de Ortiz, E.S., Hewitt, G.F., *Chem. Eng. Sci.*, **57**, p. 1069 (2002).
- [17] Skelland, A. H. P., Kanel, J., *Ind. Eng. Chem. Res.*, **29**, p. 1300 (1990).
- [18] Brösel, S., Schuber, H., *J. Chem. Eng. Proc.*, **38**, p. 533 (1999).