

مدلسازی و شبیه‌سازی هیدرودینامیکی ستون استخراج کوهنی با بهره‌گیری از مدل موازنه جمعیت

امیرحسین طاهر شمسی^۱، احد قائمی^{۲*}، منصور شیروانی^۳، میثم تراب مستعدی^۴

۱- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران

۴- دانشیار مهندسی شیمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۸/۰۷ تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۲/۰۸

پیام‌نگار: aghaemi@iust.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، فرایند استخراج مایع-مایع در یک ستون استخراج کوهنی با استفاده از یک مدل دینامیکی غیرتعاملی مدلسازی و شبیه‌سازی شد. معادلات مدل شامل معادلات دیفرانسیل پاره‌ای^۱ و موازنه جمعیت بوده که در جهت محور ستون انفصال‌سازی صورت گرفته است. برای حل کردن عددی معادلات از ترکیب روش خطوط^۲ و روش تفاضل‌های متناهی^۳ استفاده شد. برای ارزیابی و مقایسه نتایج به‌دست‌آمده با نتایج آزمایشگاهی، از یک ستون استخراج کوهنی نیمه‌صنعتی با بهره‌گیری از دو سامانه شیمیایی آب- بوتیل استات و آب- تولوئن استفاده شد. با بهره‌گرفتن از نتایج شبیه‌سازی اثر پارامترهای عملیاتی شامل دور الکتروموتور، موجودی فاز پراکنده، توزیع اندازه قطرات، سرعت جریان فازها و نوع سامانه شیمیایی بر عملکرد ستون ارائه شد. خطای مدل برای قطر میانگین قطرات و موجودی فاز پراکنده به ترتیب ۲٪ و ۴٪ به‌دست آمد.

کلیدواژه‌ها: استخراج مایع-مایع، ستون استخراج کوهنی، مدلسازی، موازنه جمعیت

۱. مقدمه

جزء منتقل‌شونده نام می‌برند. دو مایع به‌کار رفته در استخراج، با حلال، غیرقابل امتزاج‌اند و معمولاً یکی از آنها آب و دیگری یک مایع آلی است که نقش استخراج‌کننده را بازی می‌کند. استخراج‌کننده را معمولاً در مایع مناسبی به نام رقیق‌کننده حل می‌کنند که به بهبود خواص فیزیکی استخراج‌کننده کمک می‌کند [۱]. دامنه‌انواع استخراج‌کننده قابل دسترس برای انجام یک وظیفه مشخص وسیع و نیز دامنه متغیرها پیچیده است؛ بنابراین، انتخاب یک استخراج‌کننده مناسب تصمیم پیچیده‌ای است

فرایند استخراج مایع-مایع، یکی از فرایندهای مهم جداسازی به‌شمار می‌آید که در جریان آن، یک جزء از یک حلال مایع به حلال مایع دیگری انتقال می‌یابد؛ این پدیده را توزیع^۴ می‌نامند و از جزئی که توزیع آن موردنظر است، به‌عنوان توزیع شونده^۵ یا

* تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی

1. Partial Differential Equation
2. Method of Lines
3. Finite Difference
4. Distribution
5. Distributed

روشهای عددی حل کردند[۶]. مارسلو و همکاران، در سال ۲۰۰۳ تغییرات غلظت فلز روی را در یک واکنش شیمیایی حاوی محلول D2EHPA بررسی کردند[۷]. بارت^۳ و همکاران در سال ۲۰۰۵ برای اولین بار به بررسی کاربرد مدل موازنه جمعیت برای پیش‌بینی موجودی فاز پراکنده و قطر قطرات در ستون‌های استخراج کوهنی و قرص چرخان پرداختند. آنان به طور تجربی و نیز از طریق مدل‌سازی، به کمک معادلات موازنه جمعیت، به بررسی میانگین اندازه قطر و میزان موجودی فاز پراکنده در طول این دو ستون، برای آب و تولوئن پرداختند[۸]. گومز و همکاران در سال ۲۰۰۶ روی مدل‌سازی یک مدل صنعتی از ستون کوهنی به ارتفاع ۱۵ متر و قطر ۲/۵۲ متر با به کارگیری معادلات موازنه جمعیت پرداختند. آنان پی بردند که با افزایش ارتفاع ستون، میزان موجودی فاز پراکنده در ستون، به دلیل افزایش نیروی برشی، زیاد می‌شود و مدل موازنه جمعیت به‌خوبی قادر به پیش‌بینی این پدیده است[۹]. اولیویرا و همکاران، در سال ۲۰۰۸ به بررسی اثر پارامترهای عملیاتی، از قبیل سرعت اختلاط و دبی فازهای پراکنده و پیوسته، بر توزیع اندازه قطرات و موجودی فاز پراکنده در طول یک ستون استخراج کوهنی برای آب و اکسول دی ۸۰ پرداختند. بنابر نتایج به‌دست آمده، با افزایش سرعت اختلاط، اندازه قطرات کاهش می‌یابد و در نتیجه توزیع اندازه قطرات متقارن و باریک‌تر و به سمت چپ نمودار منتقل می‌شود[۱۰]. سابین رود و همکاران^۴، در سال ۲۰۱۳ پدیده نامطلوب طغیان را در ستون‌های کوهنی بررسی کردند. آزمایش آنها شامل یک محلول آلی-آبی و یک ستون کوهنی بود. سرعت و قطر میانگین به دست آمده برای این سیستم دو فاز از این امکان را فراهم می‌آورد که پدیده طغیان را به خوبی پیش‌بینی کند[۱۱]. اتارکیها^۵ و همکاران، در سال ۲۰۱۳ با بهره‌گیری از مدل تعادل جمعیت قطرات، روش OPOSPM^۶ را ارائه و آن را در یک ستون کوهنی کوچک مطالعه کردند. نتایج مدل‌سازی آنها به داده‌های تجربی بسیار نزدیک بود[۱۲]. آرتور و همکاران، در سال ۲۰۱۳ با مدل‌سازی دینامیکی ستون استخراج کوهنی و ترکیب آن با معادلات موازنه جمعیت به نتایجی منطبق بر نتایج آزمایشگاهی دست یافتند[۱۳]. همتی و همکاران در سال ۲۰۱۳

و در غیاب تجربه قبلی با سیستم یکسان حداقل در مقیاس آزمایشگاهی، باید تحت بهترین شرایط ذهنی و با بیشترین دقت صورت گیرد. بررسی اولیه روی انواع استخراج‌کننده‌ها را مرلو و پفنبگر^۱ انجام دادند[۲]. یک طبقه‌بندی کلی از انواع استخراج‌کننده‌ها، همراه با کاربردهای آنها از جانب گادفری ارائه شده است[۳]. امروزه، از ستون‌های استخراج ضربه‌ای یا پره دار، به دلیل توان بالای عملیاتی و بازده جداسازی مناسبی که دارند، بهره‌گیری می‌شود. ستون استخراج کوهنی یکی از انواع ستون پره دار است که در سال‌های اخیر تحقیقات بسیاری در مورد آن انجام شده است. این ستون از پره‌های پوشیده روی یک محور مرکزی و صفحات ثابت سوراخ‌دار تشکیل شده که به واسطه این صفحات مراحل این ستون از هم جدا می‌شوند. پره‌ها یک الگوی جریان گردابی را که تا حدودی مشابه ستون قرص چرخان است، ایجاد می‌کنند. صفحات سوراخ‌دار استفاده شده بین مراحل امکان جریان محوری در ستون را نیز فراهم می‌آورد، اما مراحل را نسبت به ستون‌های قرص چرخان و الدشو-راشتون کامل‌تر از هم جدا می‌کند. این امر به کاهش اختلاط معکوس، به‌ویژه برای فاز پراکنده، می‌انجامد. کومار و همکاران، در سال ۱۹۸۶ برای نخستین بار به بررسی تغییرات نیمرخ موجودی فاز پراکنده و نقطه طغیان در طول این ستون، و نیز برای اولین بار به بررسی اثر سرعت اختلاط بر تغییرات اندازه قطره برای سیستم آب-ارتوزایلن در ارتفاع‌های مختلفی از این ستون پرداختند. آنان مشاهده کردند که در یک سرعت اختلاط ثابت، تغییرات ارتفاع تأثیر چندانی بر اندازه قطرات ندارد، درحالی‌که افزایش سرعت اختلاط، موجب بهبود شکست قطرات و در نتیجه کاهش اندازه قطره می‌شود[۴]. هوفناگل و همکاران^۲ در سال ۱۹۹۱ یک مدل دیفرانسیلی برای ستون کوهنی به‌منظور انتقال جرم تولوئن-استون-آب از فاز پیوسته به پراکنده، ارائه دادند. آنان فقط داده‌های گزینشی را برای ماندگی، قطر قطره، حجم جریان و درصد اجزای فاز پیوسته را برای به دست آوردن پارامترهای تجربی به‌کار گرفتند[۵].

وینستن و لوواین در سال ۱۹۹۸ یک مدل دیفرانسیلی برای ستون کوهنی با سیستم تولوئن-استون-آب و آشوب ۴۰٪ در فاز پراکنده ورودی ارائه دادند. آنان دستگاه معادلات مدل را با بهره‌گیری از

3. Bart
4. Sabine Rode
5. M. Attarakhiha
6. One Primary and One Secondary Particle Method

1. Morello and Poffenberger
2. Hufnagl et. al.

معادله اساسی موازنه جمعیت در حالت دینامیکی را کازاماتا و گلیل بنابر رابطه (۲) بیان کرده‌اند [۱۶]:

$$\frac{\partial P(z, d)}{\partial t} = -\frac{\partial [P(z, d) V_d(z, d)]}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[E_d \frac{\partial P(z, d)}{\partial z} \right] + P(z, d) \quad (2)$$

در رابطه (۲)، $p(z, d)$ عبارت تولید و مصرف است که آثار شکست، ائتلاف، هسته‌زایی و رشد قطرات را دربر می‌گیرد. رابطه (۳) نمایانگر عبارت $p(z, d)$ است:

$$P(z, d) = PB^+(z, d) - PB^-(z, d) + PC^+(z, d) - PC^-(z, d) \quad (3)$$

که $PB^+(z, d)$ و $PB^-(z, d)$ به ترتیب، نمایانگر کاهش و افزایش تعداد قطرات به دلیل شکست قطرات است، عبارتهای $PC^+(z, d)$ و $PC^-(z, d)$ نیز به ترتیب، بیانگر کاهش و افزایش تعداد قطرات ناشی از ائتلاف بین قطرات اند [۳].

$$PC^-(z, d) = P(z, d) \int_0^{\sqrt[3]{d_{\max}^3 - d^3}} h(d_1, d_2) \frac{P(z, d_1)}{v(d_1)} \partial d_1 \quad (4)$$

$$PC^+(z, d) = \frac{1}{2} v(d) \int_0^d h(d_1, d_2) \frac{P(z, d_1) P(z, d_2)}{v(d_1) v(d_2)} \left(\frac{d}{d_2} \right)^2 \partial d_1 \quad (5)$$

ضریب ۰/۵ از آنجا ناشی می‌شود که برخورد ذرات با اندازه (d_2, d_1) با برخورد ذرات با اندازه (d_1, d_2) تفاوتی ندارد. $p(d)$ احتمال شکست و بسامد $r(z, d)$ شکست است و به زمان اقامت قطرات بستگی دارد. $p(d)$ احتمال شکست قطره‌ای با قطر d است، $r(z, d)$ بسامد شکست است و از رابطه (۷) به دست می‌آید [۱۷]:

$$\frac{p(d)}{1 - p(d)} = 0.2148 W e_m^{0.7796} \quad (6)$$

$$r(z, d) = \frac{p(d) v_d(z, d)}{H_c} \quad (7)$$

$$We_m = \frac{\rho_c^{0.8} \mu_c^{0.2} d D_R^{1.6} (\omega^{1.8} - \omega_{crit}^{1.8})}{\sigma} \quad (8)$$

به بررسی آزمایشگاهی تأثیر شرایط عملیاتی بر ضرایب انتقال جرم برای دو سامانه انتقال جرمی آب-تولون-آن بوتیل استات و آب-تولون-استون پرداختند. آنان پی بردند که تأثیر سرعت چرخش الکتروموتور بر ضرایب انتقال جرم نسبت به سایر پارامترهای عملیاتی بیشتر است [۱۴].

در این تحقیق، با بررسی مطالعات صورت گرفته، مدل موازنه جمعیت برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی هیدرودینامیکی ستون استخراج کوهنی، با در نظر گرفتن آثار شکست و ائتلاف قطرات به کار گرفته شد. از دو سامانه شیمیایی آب-آن بوتیل استات، با کشش سطحی متوسط و آب-تولون با کشش سطحی زیاد در انجام آزمایش‌ها استفاده شد. با بهره‌گیری از نتایج شبیه‌سازی، اثر پارامترهای مختلف ستون و شرایط عملیاتی بر کارایی ستون مطالعه شد. نتایج مدل، با داده‌های تجربی به دست آمده از پایلوت استخراج کوهنی ارزیابی شد.

۲. مدل موازنه جمعیت در ستون استخراج کوهنی

در فرایند استخراج مایع-مایع، مدل موازنه جمعیت به‌منظور توصیف برهم‌کنش هیدرودینامیکی و انتقال جرم به کار می‌رود که بر اساس ماهیت ماکروسکوپیکی برهم‌کنش، فاز پراکنده و فاز پیوسته قابل توجیه است [۱۵]. تعادل جمعیتی قطره، روش توانمندی برای پیش‌بینی رفتار ستون‌های استخراج است. مدل‌سازی با این روش به تشکیل تعداد زیادی معادله دیفرانسیلی انتگرالی می‌انجامد که با حل آنها، توزیع اندازه قطرات به دست می‌آید. برای شبیه‌سازی هیدرودینامیکی، ستون به عناصری با ارتفاع معین تقسیم‌بندی می‌شود و دسته‌بندی قطرات با قطر مشخص به علت جابه‌جایی جرمی، توزیع محوری، شکست و ائتلاف قطرات تشکیل می‌شود. در این پژوهش، برهم‌کنش قطرات با استفاده از معادله‌های شکست و ائتلاف آنها در مدل موازنه جمعیت استفاده شده است.

۲.۱ روابط مدل موازنه جمعیتی قطره

در این مدل، متغیر پایه، توزیع اندازه قطرات، با $p(z, d, t)$ بیان می‌شود و ماندگی موضعی می‌تواند از رابطه زیر به دست آید [۱۶].

$$\phi(z, t) = \int_0^{d_{\max}} P(t, z, d) \partial d \quad (1)$$

$$PB^+(z, d) = \int_d^{d_{max}} r(z, d_0) P(z, d_0) \beta(d_0, d) \partial d_0 \quad (15)$$

برای توصیف هیدرودینامیکی مسئله، از مدل موازنه جمعیت با در نظر گرفتن شکست و ائتلاف قطرات به صورت همزمان استفاده شد. از آثار اختلاط محوری در فاز پراکنده نیز چشم‌پوشی شد. در نتیجه، معادله اصلی موازنه جمعیت (رابطه (۲)) به شکل زیر تبدیل می‌شود:

$$\frac{\partial P(z, d)}{\partial t} = \frac{[V_d * P(z, d)]_{i+1} - [V_d * P(z, d)]_i}{\Delta z} + PB^+(z, d) - PB^-(z, d) + PC^+(z, d) - PC^-(z, d) \quad (16)$$

با نشان دادن روابط (۴)، (۵)، (۱۴) و (۱۵) در رابطه (۱۶)، شکل نهایی مدل توسعه یافته به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} \frac{\partial [P(z, d) V_d(z, d)]}{\partial z} &= \int_d^{d_{max}} r(z, d_0) P(z, d_0) \beta(d_0, d) \partial d_0 \\ &+ \frac{1}{2} V(d) \int_0^d h(d_1, d_2) \frac{P(z, d_1) P(z, d_2)}{V(d_1) V(d_2)} \left(\frac{d}{d_2}\right)^2 \partial d_1 \\ &- r(z, d) P(z, d) - P(z, d) \int_0^{\sqrt[3]{d_{max}^3 - d^3}} h(d_1, d_2) \frac{P(z, d_1)}{V(d_1)} \partial d_1 \end{aligned} \quad (17)$$

تعداد قطرات در واحد حجم عبارت است از [۲۰]:

$$N(z, d) = \frac{P(z, d)}{V(d)} \quad (18)$$

که $V(d)$ حجم قطره است.

۲. گسسته سازی معادلات

برای حل معادله (۱۷)، لازم است که این معادله از قطر قطره مستقل شود. از این رو، ابتدا دامنه تغییرات قطر قطره به نه رده با فواصل برابر به صورت زیر تقسیم شده است [۲۱]:

$$\sigma_{crit} = 2. \pi. 0.65 \left(\frac{\rho_c D_R^3}{\sigma} \right)^{-0.5} \left(\frac{d}{D_R} \right)^{-0.72} \quad (9)$$

برای محاسبه آهنگ یا سرعت ائتلاف از رابطه زیر بهره برده شده است [۱۸].

$$h(d_1, d_2) = 1.247 \varepsilon^{1/3} (d_1 + d_2)^{7/3} \quad (10)$$

معمولاً، برای محاسبه توزیع اندازه قطرات فرزند، از تابع بتا استفاده می‌کنند. البته تابع بتا در عمل بسیار پیچیده است. اساس رابطه زیر بر این فرض استوار است که اگر شکست قطره رخ دهد، انرژی ضربه تا جایی که امکان دارد جذب قطره می‌شود. سپس، این انرژی به انرژی سطحی برای تبدیل به بهترین حالت ممکن مساحت بین سطحی^۱ تبدیل می‌شود. یعنی، احتمال تشکیل مساحت بین سطحی برای قطرات فرزند که توزیع اندازه قطرات بزرگ‌تری دارند، بیشتر است. توزیع اندازه قطره فرزند با توجه به توزیع بتا، بر اساس قطر قطره مادر، d_0 ، به دست می‌آید [۱۹].

$$\beta(d_0, d) = 3x_m (x_m - 1) \left(1 - \frac{d^3}{d_0^3}\right)^{(x_m - 2)} \frac{d^5}{d_0^6} \quad (11)$$

در اینجا، میانگین قطر قطره فرزند است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$x_m = 2 + 0.838 \left[\left(\frac{d_0}{d_{crit}} \right) - 1 \right]^{1.309} \quad (12)$$

قطر بحرانی برای هر قطره که شروع به شکست می‌کند، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$d_{crit} = 0.65 D_R We_R^{-0.72} \quad (13)$$

مدز^۲ نیز این دو پارامتر، یعنی جمله نابودی و تولید در اثر فرایند شکست را به این قرار نشان داد [۳]:

$$PB^-(z, d) = r(z, d) P(z, d) \quad (14)$$

1. Interface Area
2. Modes

$$d_{\min} = d_0 < d_1 < \dots < d_9 = d_{\max} \quad (19)$$

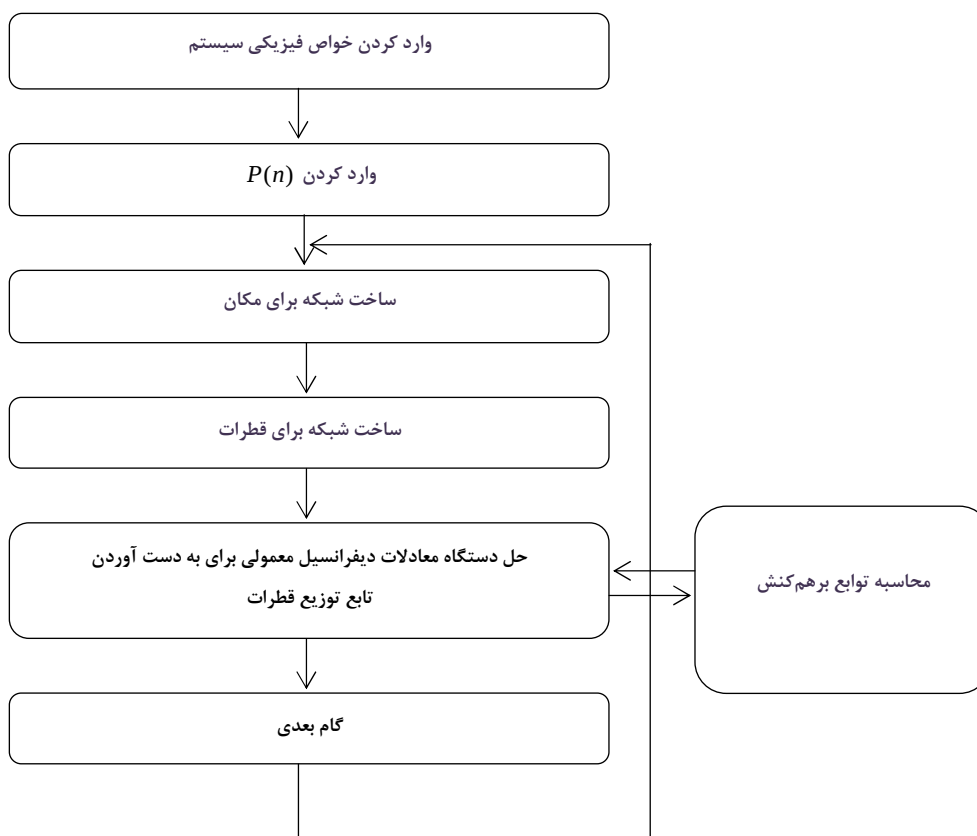
حال می‌توان $p(z, d, t)$ را به این قرار نوشت:

$$P(t, z, d) = \sum_{k=1}^9 P_k(t, z) b_k(d) \quad (20)$$

$$b_k(d) = \begin{cases} 1 & \text{if } d \in [d_{k-1}, d_k] \\ 0 & \text{if } d \notin [d_{k-1}, d_k] \end{cases}$$

پس از مستقل‌سازی رابطه از قطر قطره، گسسته‌سازی در راستای مکان انجام می‌گیرد. با گسسته‌سازی در راستای مکان، یک رشته معادلات دیفرانسیل جزئی به وجود خواهد آمد که این معادلات با نرم‌افزار موردنظر حل می‌شود. شرط مرزی در پایین برج از تابع توزیع لگاریتمی - طبیعی به دست می‌آید [۲۲].

$$p(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[-\left(\frac{(d) - \mu}{\sqrt{2}\sigma} \right)^2 \right] \quad (21)$$

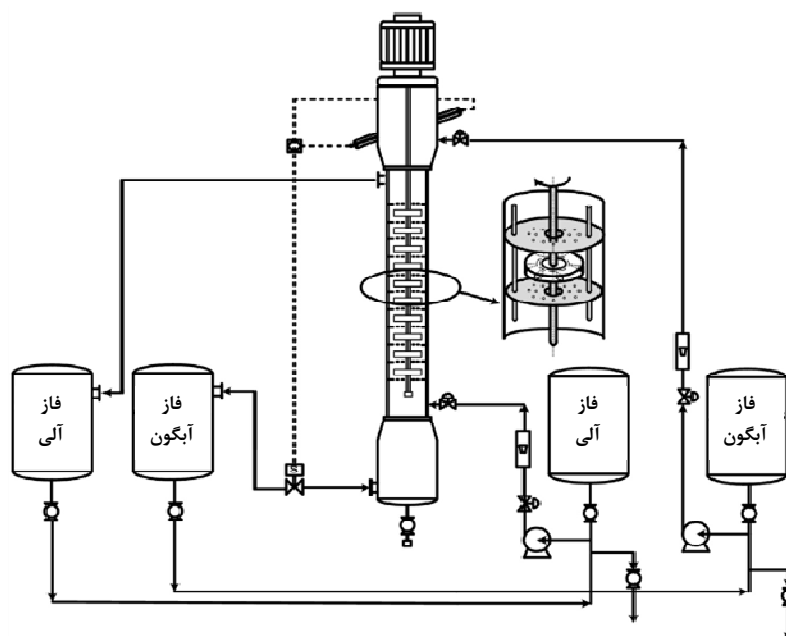


شکل ۱. الگوریتم روش حل موازنه جمعیت.

مقادیر σ و μ از داده‌های تجربی محاسبه می‌شوند. الگوریتم حل معادله موازنه جمعیت را در شکل (۱) مشاهده می‌کنید.

۳. مشخصه‌های ستون و فازها

ستون استخراج کوهنی به‌کار رفته در این پژوهش، یک تماس‌دهنده در مقیاس نیمه صنعتی است؛ جزء فعال این ستون از شیشه ساخته شده است تا در برابر خوردگی مقاوم باشد. ستون کوهنی دارای یک محور است که از یک الکتروموتور برای چرخاندن آن استفاده می‌شود. نمایی از ستون استخراج کوهنی را در شکل (۲) مشاهده می‌کنید. مشخصه‌های هندسی ستون و خواص فیزیکی سامانه‌های مایع-مایع مورد آزمایش، در جدول (۱) و (۲) درج شده‌اند.



شکل ۲. نمایی از ستون استخراج کوهنی [۱۴].

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی سامانه‌های مایع-مایع.

خواص فیزیکی	یکا	تولون - آب	بوتیل استات - آب
چگالی فاز پیوسته	کیلوگرم بر مترمکعب	۹۹۸/۲	۹۹۸/۲
چگالی فاز پراکنده	کیلوگرم بر مترمکعب	۸۶۵/۲	۸۸۰/۹
گرانروی فاز پیوسته	میلی پاسکال.ثانیه	۰/۹۶۳۰	۱/۰۲۷۴
گرانروی فاز پراکنده	میلی پاسکال.ثانیه	۰/۵۸۴	۰/۷۳۴
کشش بین سطحی	میلی نیوتن بر متر	۳۶/۰	۱۴/۱

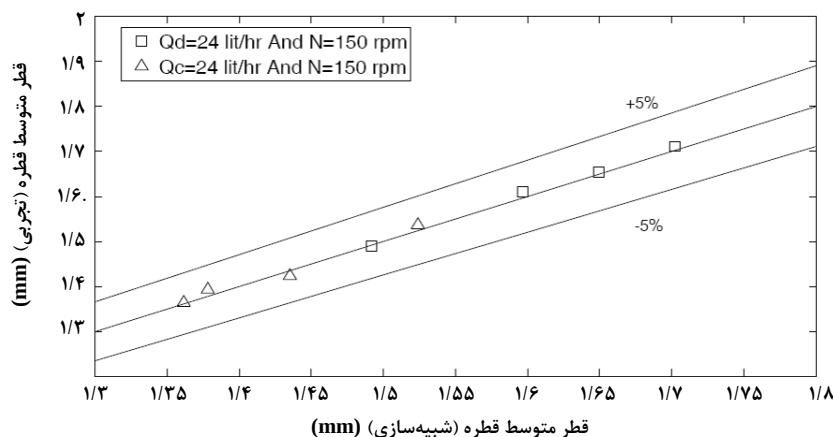
جدول ۱. مشخصه‌های هندسی ستون کوهنی.

ابعاد	یکا	اجزای ستون
۰/۷۰۰۰	متر	ارتفاع ستون
۰/۱۱۷۰۰	متر	قطر ستون
۰/۰۵۵۰۰	متر	ارتفاع هر مرحله
۱۰	-	تعداد مراحل
۲۷	-	تعداد حفره‌ها در هر سینی
۴۰ درجه	-	زاویه حفره‌ها نسبت به هم
۰/۰۰۲۰۰	متر	ضخامت سینی
۰/۰۰۷۵۲	مترمکعب	حجم فعال ستون

۴. بحث و نتایج

نتایج شبیه‌سازی فرایند حاضر شامل نتایج هیدرودینامیکی‌اند و اثر پارامترهای مختلف عملیاتی بر عملکرد ستون استخراجی را نیز دربر می‌گیرند. نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی مقایسه شده و دقت مدل به‌کار رفته ارائه شده است. در شکل (۳)، قطر قطره محاسبه‌شده برای نتایج تجربی و شبیه‌سازی برای سامانه آب-بوتیل استات ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که داده‌ها با هم تطابق مطلوبی دارند. وقتی هم که جریان فاز پیوسته و تعداد دور الکتروموتور ثابت است، اما جریان فاز پراکنده تغییر می‌کند،

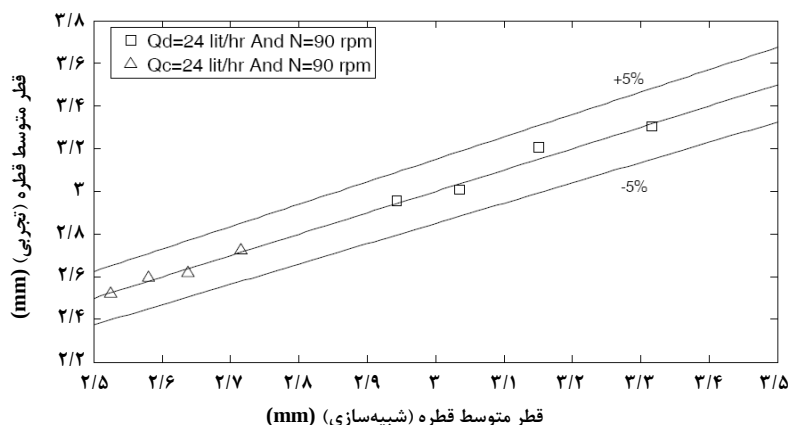
قطر قطرات نسبت به حالتی که جریان فاز پراکنده و دور الکتروموتور ثابت است، اما جریان فاز پیوسته تغییر می‌کند، کم‌تر است، زیرا در این حالت نیروی واپس‌کشی و مقاومت در برابر حرکت قطره کاهش می‌یابد و موجب شکست قطرات می‌شود؛ اما به‌دلیل دور بالای الکتروموتور توزیع اندازه قطرات بالایی نداریم و اختلاف بین بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین قطره به کمتر از ۰/۵ میلی‌متر می‌رسد.



شکل ۳. مقایسه اندازه قطر متوسط قطره تجربی و مدل سازی برای سامانه آب - بوتیل استات.

شکل (۴) مانند شکل (۳)، وقتی جریان فاز پراکنده و دور الکتروموتور ثابت و جریان فاز پیوسته متغیر است، قطر قطرات نسبت به حالتی که جریان فاز پیوسته و دور الکتروموتور ثابت است و جریان فاز پراکنده تغییر می کند بیشتر است، زیرا در این حالت نیروی واپس کشی و مقاومت در برابر حرکت قطره افزایش می یابد و موجب ائتلاف قطرات می شود؛ همچنین، چون دور الکتروموتور در

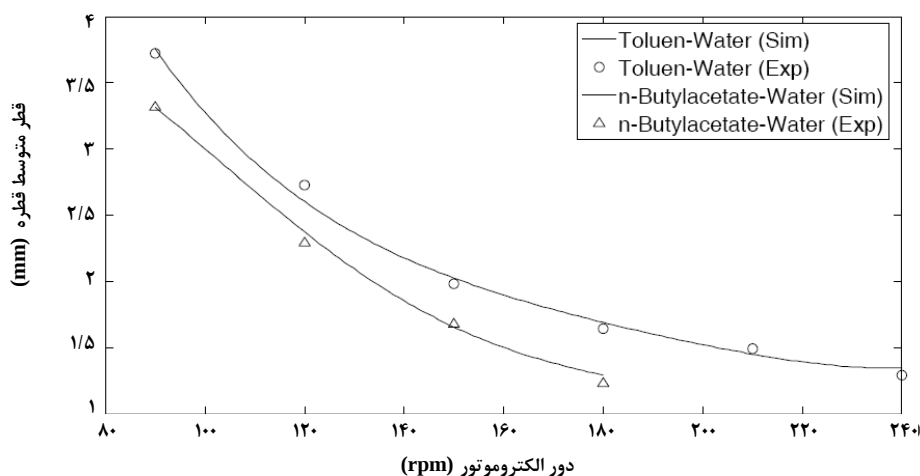
شکل (۴) مانند شکل (۳)، وقتی جریان فاز پراکنده و دور الکتروموتور ثابت و جریان فاز پیوسته متغیر است، قطر قطرات نسبت به حالتی که جریان فاز پیوسته و دور الکتروموتور ثابت است و جریان فاز پراکنده تغییر می کند بیشتر است، زیرا در این حالت نیروی واپس کشی و مقاومت در برابر حرکت قطره افزایش می یابد و موجب ائتلاف قطرات می شود؛ همچنین، چون دور الکتروموتور در



شکل ۴. مقایسه اندازه قطر متوسط قطره تجربی و شبیه سازی برای سامانه آب - بوتیل استات.

جدول ۳. انحراف قطر قطرات شبیه سازی نسبت به مقادیر تجربی در سامانه آب - تولوئن.

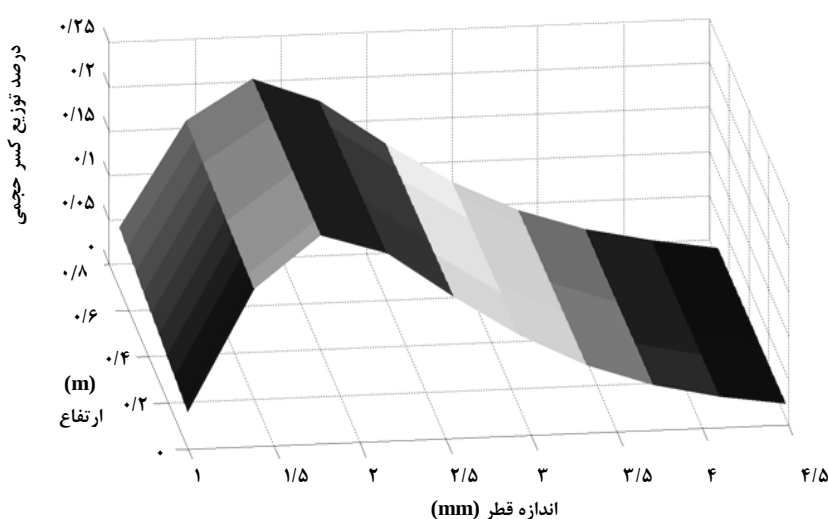
خطای حاصل از محاسبه قطر قطرات در حالت شبیه سازی و آزمایشگاهی (%)	جریان (لیتر بر ساعت)	دور الکتروموتور (دور بر دقیقه)
۱/۹۸۶	$Q_d = 24, Q_c = 18-30-36-42$	۱۸۰
۱/۸۱۲	$Q_c = 24, Q_d = 18-30-36-42$	۱۸۰
۱/۹۶۵	$Q_d = 24, Q_c = 18-30-36-42$	۱۲۰
۱/۹۴۳	$Q_c = 24, Q_d = 18-30-36-42$	۱۲۰



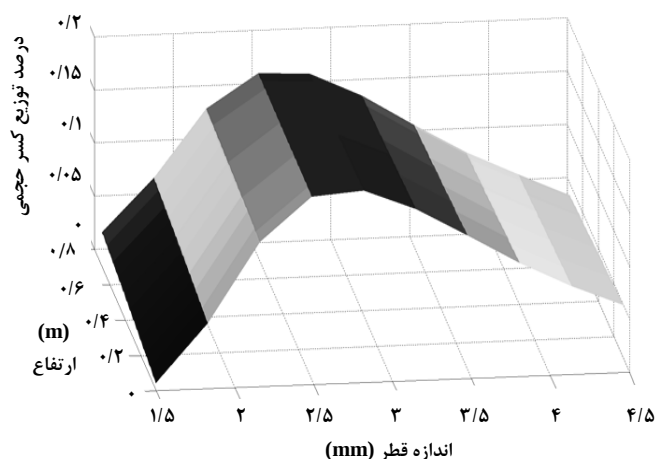
شکل ۵. تغییرات قطر میانگین با تغییر دور الکتروموتور برای سامانه آب- بوتیل استات، آب- تولوئن.

در شکل (۵)، تغییرات قطر میانگین برحسب دور الکتروموتور برای دو سامانه آب - بوتیل استات، آب - تولوئن را مشاهده می‌کنید. با توجه به این که شرایط عملیاتی ثابت بوده، اندازه قطرات در سیستم آب - تولوئن بیشتر از سیستم آب - بوتیل استات است، که دلیل این امر به کشش سطحی بین فازی مربوط می‌شود. کشش بین سطحی آب - تولوئن تقریباً دو برابر کشش سطحی بین آب - بوتیل استات است و خود این عامل موجب افزایش نیروی واپس کشی و افزایش مقاومت در برابر حرکت فاز پراکنده می‌شود، و می‌توان نتیجه گرفت افزایش کشش سطحی بین فازی مانند افزایش

جریان هر دو فاز عمل می‌کند. در شکل‌های (۶) و (۷) توزیع حجمی قطرات برحسب قطر قطرات و طول ستون برای دو سامانه آب- بوتیل استات و آب- تولوئن به ازای جریان برابر فاز پیوسته و گسسته ترسیم شده است، همان‌طور که گفته شد، تأثیر دور الکتروموتور بیشتر از تأثیر جریان‌ها است. با توجه به این که کشش بین سطحی در سامانه آب- تولوئن بیشتر است، نیز باید توان بیشتری برای شکستن قطرات در این سیستم به کار برده شود تا به رده قطرات با قطر کوچک‌تر تبدیل شوند.



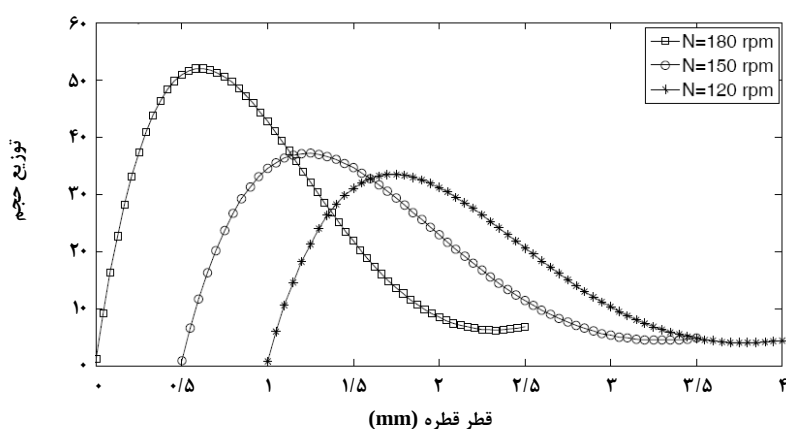
شکل ۶. توزیع حجمی قطرات برای سامانه آب- بوتیل استات در دور الکتروموتور ۹۰ (دور بر دقیقه).



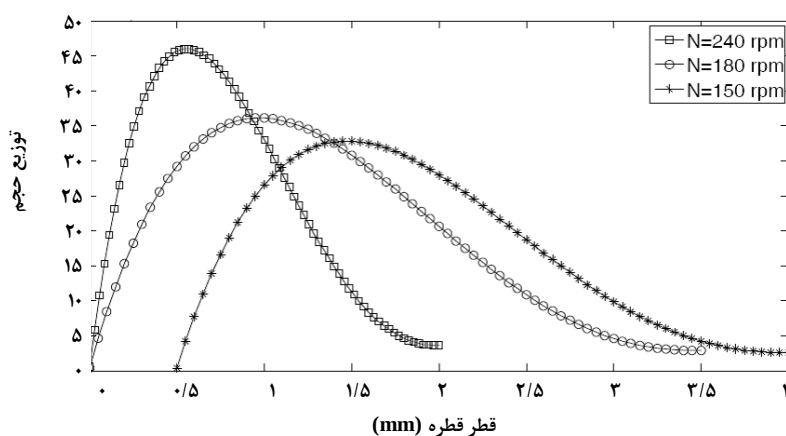
شکل ۷. توزیع حجمی قطره‌ها برای سامانه آب-تولوئن در دور الکتروموتور ۹۰ دور بر دقیقه.

پدید می‌آید که با مقایسه دو نمودار در حالت $N=180$ و رده دوم قطره‌ها، تغییرات تابع حجمی در سامانه آب-بوتیل‌استات بیشتر است.

در شکل‌های (۸) و (۹) با افزایش دور الکتروموتور فرایند شکست قطرات بر ائتلاف قطرات غالب شده و اندازه رده قطره‌ها به سمت قطره‌های کوچک‌تر میل می‌کند. با افزایش کشش بین سطحی تمایل قطره‌ها برای ائتلاف نیز بیشتر می‌شود و قطره‌های بزرگ‌تری



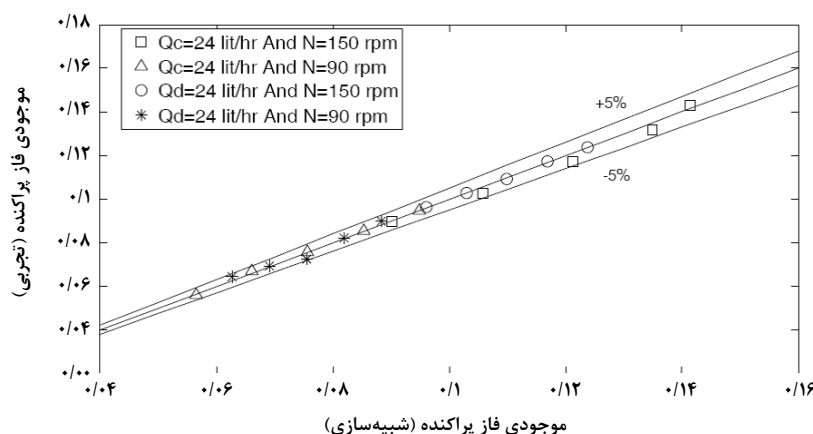
شکل ۸. نمودار تغییرات تابع حجمی توزیع قطرات بر اساس قطر قطره‌ها برای سامانه آب-بوتیل‌استات.



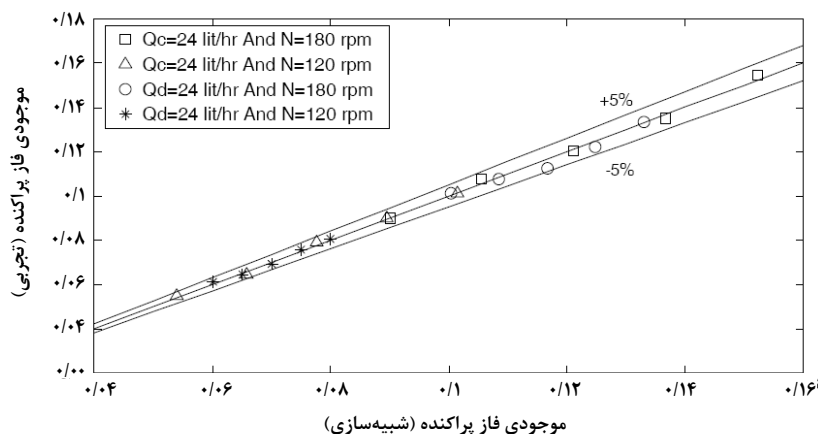
شکل ۹. نمودار منحنی تغییرات تابع حجمی توزیع قطره‌ها بر حسب قطر قطرات برای سامانه آب-تولوئن.

در شکل (۱۲)، تأثیر کشش بین سطحی دو فاز موجود و تأثیر دور الکتروموتور را مشاهده می‌کنید. با افزایش دور الکتروموتور، قطرات مادر با توجه به افزایش نیروی برشی به قطرات فرزند شکسته می‌شوند و ائتلاف قطرات به کمترین مقدار خود می‌رسد. با افزایش تعداد قطرات، موجودی فاز پراکنده در ستون استخراجی افزایش می‌یابد. با افزایش کشش بین سطحی، ائتلاف قطرات افزایش می‌یابد و در نتیجه موجب افزایش قطر قطرات می‌شود؛ همچنین سرعت نسبی فازها افزایش می‌یابد و این امر موجب کاهش موجودی فاز پراکنده می‌شود. نکته مهم در شکل بالا از این قرار است که افزایش دور الکتروموتور بر موجودی فاز پراکنده در سامانه آب - تولوئن که کشش بین سطحی بیشتری دارد، مؤثرتر است، زیرا شکست قطرات در این سیستم بیشتر است و موجب افزایش موجودی فاز پراکنده می‌شود.

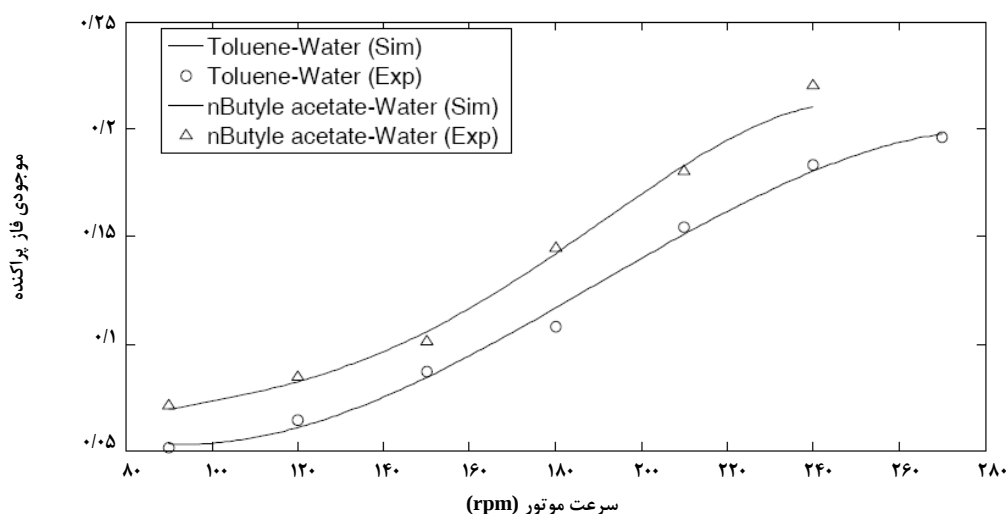
در دو شکل (۱۰) و (۱۱)، موجودی فاز پراکنده ناشی از شبیه‌سازی و آزمایش بررسی شده است. مطابق شکل، خطای ناشی از شبیه‌سازی، کمتر از ۵ درصد است. اثر جریان فاز پراکنده بر موجودی فاز پراکنده نیز بیشتر از تأثیر جریان فاز پیوسته است. با افزایش جریان فاز پیوسته، موجودی فاز پراکنده افزایش می‌یابد، زیرا مقاومت در برابر حرکت قطره‌ها و نیروی واپس‌کشی افزایش می‌یابد. با توجه به شکل، تأثیر دور الکتروموتور بر موجودی فاز پراکنده نسبت به دیگر پارامترهای عملیاتی بیشتر است و با افزایش آن هنگامی که دیگر پارامترهای عملیاتی ثابت است، موجودی فاز پراکنده نیز افزایش می‌یابد، زیرا نیروی‌های برشی افزایش می‌یابد و موجب شکست قطرات می‌شود و به همین علت قطرات با قطر کوچک‌تر پدید می‌آیند و سرعت صعودی قطرات کاهش می‌یابد؛ بنابراین، موجودی فاز پراکنده در ستون افزایش می‌یابد.



شکل ۱۰. تغییرات موجودی فاز پراکنده در شرایط مختلف عملیاتی برای سامانه آب-تولیل استات.



شکل ۱۱. تغییرات موجودی فاز پراکنده در شرایط مختلف عملیاتی برای سامانه آب-تولوئن.



شکل ۱۲. تأثیر دور الکتروموتور بر موجودی فاز پراکنده برای سامانه آب- بوتیل استات، آب- تولوئن.

مراجع

- [1] Thakur, N. V., "Separation of Rare Earths by Solvent Extraction"m Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, Vol. 21, pp. 277-306, (2000).
- [2] Morello, V. S., Poffenberger, N., "Commercial Extraction Equipment", Chemical Engineering & Processing, Vol. 3, pp. 5-23, (1953).
- [3] Godfery, J. C., Slater, M. J., "Liquid-Liquid Extraction Equipment", John Wiley & Sons pp.45-46, (1994).
- [4] Hufnagl, H., McIntyre, M., Blab, E., "Dynamic behavior and simulation of liquid-liquid extraction column", Chemical Engineering & Technology, Vol. 3, pp. 301-306, (1991).
- [5] Kumar, A., Steiner, L., Hartland, S., "Capacity and hydrodynamics of an agitated extraction column", Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 3, pp. 728-733, (1986).
- [6] Weinstein, O., Semiat, R., Lewi, D. R., "Modeling, simulation and control of liquid-liquid extraction columns", Chemical Engineering Science, Vol. 53, pp. 325-339, (1998).
- [7] Marcelo, B., Michael, J., Evaristo, C., "Reactive Extraction of Zinc Sulfate with Bis (2-ethylhexyl) phosphoric Acid in a Short Kuhni Column Used in Batch Mode" Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 42, pp. 4068-4076, (2003).
- [8] Bart, H., Meniai, A., Lehocine, M., "Assessment of drop coalescence and breakup for stirred extraction columns", Chemical Engineering & Technology, Vol. 28, pp. 552-560, (2005).
- [9] Gomes, L. N., Regueiras, P. F. R., Guimaraes, M. L., Stichlmair, J. Cruz Pinto, J. J., "Simulated and Experimental Dispersed-Phase Breakage and Coalescence Behavior in a Kuhni Liquid-Liquid Extraction Column-Steady State", Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 45, pp. 3955-3968, (2006).

۵. نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش، شکست و ائتلاف قطرات و تأثیر آن بر کاهش و افزایش تعداد قطرات در معادله موازنه جمعیت در نظر گرفته شد. پدیده‌ترین تأثیر بر شکست قطرات، به ترتیب، مربوط به دور الکتروموتور، کشش بین سطحی، جریان فاز گسسته، و جریان فاز پیوسته است. افزایش دور الکتروموتور موجب افزایش نیروی برشی و شکست قطرات می‌شود، در نتیجه، قطر قطرات کاهش می‌یابد و موجب کاهش سرعت صعودی قطرات می‌شود؛ با عنایت به این امر موجودی فاز پراکنده افزایش می‌یابد. افزایش کشش بین سطحی موجب افزایش قطر قطرات و سرعت نسبی فازها می‌شود و به کاهش موجودی فاز پراکنده می‌انجامد. با افزایش جریان هر یک از فازها، ائتلاف قطرات سهم عمده‌ای در معادله موازنه جمعیت می‌یابد و بنابراین قطر میانگین قطرات در ستون استخراج کوهنی افزایش می‌یابد. بر اثر افزایش جریان فاز پراکنده و پیوسته موجودی فاز پراکنده ما نیز افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش جریان فاز پراکنده، تعداد قطرات افزایش می‌یابد و مطابق تعریف موجودی فاز پراکنده، این مقدار افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج قطر میانگین قطرات و موجودی فاز پراکنده نشان داد که اثر افزایش دور الکتروموتور در سامانه آب- بوتیل استات (کشش سطحی کم) کمتر از سامانه آب- تولوئن (کشش سطحی بالا) است که این اتفاق ناشی از محدود بودن شکست قطرات در سامانه‌ای با کشش سطحی کم پیش می‌آید.

- [10] Oliveira, N. S., Moraes Silva, D., Gondim, M. P., "A study of the drop size distributions and hold-up in short kuhni columns", *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 25, pp. 729-741, (2008).
- [11] Rode, Sa., "Flooding characteristics of an aqueous two-phase system in a counter-current Kühni-type column" *Chemical Engineering Science*, Vol. 98, pp. 98-103, (2013).
- [12] Attarakih, M., Hlawitschkac., M., "A Hyperbolic Population Balance Model for Dynamic Analysis of Liquid Extraction Columns", *Kuala Lumpur. ASIA*, pp.25-27, (2013).
- [13] Artur, P., Marcelo, B., "Transient modeling of zinc extraction with D2EHPA in a Kühni column", *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 91, pp. 2323-2332, (2013).
- [14] Hemmati, A. R., Torab-Mostaedi, M., Asadollahzadeh, M., "Mass transfer coefficients in a Kühni extraction column" *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 93, pp.747-754, (2015).
- [15] Arshad, K., Anuar, T., Jamalludin, M., "Mathematical modelling of mass transfer in a multistage rotating disc contactor column", *Faculty of Science*, Vol. 21, pp. 30-35, (2006).
- [16] Casamatta, G., Vogelpohl, A., "Modeling of fluid dynamics and mass transfer in extraction column." *German chemical engineering*, Vol. 6, pp. 96-103, (1985).
- [17] Bart, H., Modes, G., Rodriguez-Perancho, D., Broder, D., "Simulation of Solvent Extraction Column Fluid Dynamics from Single Droplet Parameters" *Chemical Engineering & Technology*, Vol. 22, pp. 231-236, (1999).
- [18] Steiner, L., Kumar, A., Hartland, S., "Determination and correlation of axial-mixing parameters in an agitated liquid-liquid extraction column", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 6, pp. 241-247, (1988).
- [19] Wang, T., Wang, J., Jin, Y., "A novel theoretical break-up kernel function for bubble/droplets in a turbulent flow", *Chemical Engineering Science*, Vol. 43, pp. 4629-4637, (2003).
- [20] Schmidt, A. S., "Populationsdynamische Modellierung gerührter Extraktions-kolonnen basierend auf Einzeltropfen", *Aachen: Shaker Verlag*, pp.89, (2006).
- [۲۱] حسینی، سید میثم "مدلسازی و شبیه‌سازی دینامیکی ستون استخراج ضربه‌ای سینی‌دار"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، ص. ۴۵، (۱۳۹۱).
- [22] Oliveira, N. S., Moraes Silva, D., Gondim, M. P. C., Borges Mansur, M., "A study of the drop size distributions and hloed-up in short kuhni columns", *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 25, pp.729-741, (2008).