

## بررسی اثر نانوذره و ماده‌ی فعال سطحی بر روی ضریب انتقال جرم در ستون ضربه‌ای پر شده

محمد قزوئی<sup>۱</sup>، مسعود نصیری زرنندی<sup>۲\*</sup>، محمدحسن ملاح<sup>۳</sup> و جابر صفدری<sup>۴</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۲۳ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۲۲	در فرآیندهای استخراج مایع - مایع، مشخصه‌های هیدرودینامیکی سیستم پارامترهای مهمی در انتقال جرم هستند. در این تحقیق اثر سرعت فازهای مداوم، پخش شده و شدت ضربه بر مشخصه‌های هیدرودینامیکی سیستم برای اولین بار با استفاده‌ی همزمان از نانوذرات سیلیس و ماده‌ی فعال سطحی SDS در ستون پر شده‌ی پالسی عمودی بررسی گردید. نتایج بدست آمده نشان داد که شدت ضربه یک پارامتر تاثیرگذار می‌باشد، به‌گونه‌ای که با افزایش شدت ضربه قطر قطره کاهش یافته و هلدآپ در سیستم افزایش می‌یابد. همچنین اثر غلظت نانوذره و ماده‌ی فعال سطحی، بر مشخصه‌های هیدرودینامیکی سیستم مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که با اضافه کردن نانوذره و ماده‌ی فعال سطحی، اندازه قطرات کاهش و هلدآپ افزایش می‌یابد. بعلاوه رابطه‌ی نیمه تجربی برای پیش‌بینی قطر قطره بر حسب پارامترهای عملیاتی و خواص سیستم و غلظت نانوذره ارائه گردید. مقایسه‌ی ضرائب انتقال جرم بدست آمده از روش‌های تجربی و تئوری نشان داد که با افزایش غلظت نانوذره، قطر قطرات کاهش می‌یابد و مکانیسم غالب انتقال جرم، نفوذ مولکولی می‌باشد. همچنین با اضافه کردن ماده‌ی فعال سطحی به سیستم، بازه استخراج از ۷۰ به ۹۱ درصد بهبود می‌یابد. مکانیسم انتقال جرم در سیستم با و بدون حضور نانوذره و ماده‌ی فعال سطحی نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که در سیستم حاوی نانوذره و ماده‌ی فعال سطحی، تئوری کرونیگ-برینک مدل مناسبی برای پیش‌بینی ضریب انتقال جرم محسوب می‌گردد.
<b>واژگان کلیدی:</b> نانوذره، ماده‌ی فعال سطحی، ستون ضربه‌ای، ضریب انتقال جرم، هلدآپ، استخراج مایع - مایع.	

### ۱- مقدمه

ایده استفاده از نانوذرات برای اولین بار توسط ماکسول مطرح شد و سیال حاوی این نانوذرات را نانوسیال نامیدند. نانو سیالات به علت داشتن پتانسیل بالا جهت بهبود انتقال حرارت تاکنون بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند، به‌گونه‌ای که هم به صورت آزمایشگاهی و هم به صورت تئوری جهت بهبود انتقال حرارت مورد از آن‌ها استفاده شده‌است. حضور نانوذرات در سیال پایه باعث بهبود ضریب هدایت حرارتی

سیال می‌شود و در نتیجه انتقال حرارت افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه انتقال جرم و انتقال حرارت دو فرآیند مشابه هستند، در همین راستا استفاده از نانوذرات می‌تواند سبب بهبود انتقال جرم نیز گردد. در مطالعات قبلی اثر حضور نانوذره بر نفوذ قطره رنگ در آب و نانوسیال به صورت آزمایشگاهی بررسی شده و مشخص گردید که قطره رنگ درون نانوسیال با سرعت بیشتری نفوذ می‌کند. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد که با استفاده از نانوذرات،

\* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mnasiri@semnan.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه سمنان

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه سمنان

۳. دانشیار، دانشکده علوم و فناوری هسته ای تهران

۴. استاد، دانشکده علوم و فناوری هسته ای تهران

بر پارامترهای عملیاتی سیستم، استفاده از افزودنی‌ها جهت کاهش کشش سطحی و اندازه قطر قطرات پیشنهاد گردیده‌است که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به افزودن نانو ذرات و مواد فعال سطحی اشاره کرد [۲۳ و ۶]. نتایج این تحقیقات نشان داده‌است که نوع و شکل هندسی نانوذره به علت تاثیر بر حرکت براونی نانوذره‌ی درون سیال، بر انتقال جرم تاثیرگذار بوده و نانوذرات کروی بهترین شکل هندسی برای استفاده در این نوع سیستم‌های انتقال جرم هستند [۲۴-۲۵].

مطابق مرور انجام شده بر روی مطالعات قبلی استفاده از ماده‌ی فعال سطحی برای افزایش پایداری نانوسیال، با تغییر خواص حرارتی سیال می‌تواند سبب تغییر عملکرد حرارتی آن شود. همچنین استفاده از ماده‌ی فعال سطحی با تغییر کشش سطحی بین دو سیال می‌تواند پارامتری موثر بر انتقال جرم باشد و انتقال جرم بین دو فاز مایع را افزایش دهد. [۳۰-۲۵ و ۲۳ و ۱۹]. سلیمی و همکاران نشان دادند که با اضافه نمودن نانوذرات سیلیس به سیستم ستون استخراج پر شده با توجه به گردش داخلی قطرات، ضریب انتقال جرم تا غلظت بحرانی ۰/۰۵ درصد حجمی افزایش می‌یابد [۳۱]. نتایج حاصل از بررسی‌های خوشه چین و همکاران نشان داد که در یک ستون استخراج پر شده پالسی به شکل L هر عاملی که باعث کاهش اندازه قطره شود، سبب افزایش ضریب انتقال جرم می‌گردد. همچنین مشخص گردید شدت ضربه و دبی فاز مداوم بیشترین تاثیر را بر روی ضریب انتقال جرم دارند، درحالی که دبی فاز پخش شده تاثیر کمتری بر روی ضریب انتقال جرم دارد [۳۲]. شکیب و همکاران با مطالعه بر روی ستون پالسی نشان دادند که مقادیر انتقال جرم مشخص می‌کند که عملکرد ستون با بالا رفتن شدت ضربه و سرعت‌های فاز ورودی افزایش می‌یابد [۳۳]. آمروتا<sup>۱</sup> و همکاران با آزمایش اثر نانوذرات تیتانیوم دی اکسید بر روی انتقال جرم ستون پالسی نشان دادند که افزایش شدت ضربه و همچنین افزایش درصد حجمی نانوذره تاثیر مستقیمی بر روی ضریب انتقال جرم و هلدآپ دارد [۳۴].

در این تحقیق اثر استفاده همزمان از نانوذره و ماده‌ی فعال سطحی برای اولین بار بر مشخصه‌های هیدرودینامیکی و انتقال جرم سیستم استخراج مایع - مایع به صورت

ضریب انتقال جرم افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند. همچنین مشاهده گردید، که نوع نانوذره نیز بر میزان انتقال جرم موثر است [۴-۱]. در سیستم‌های استخراج مایع - مایع، هلدآپ پارامتر مهمی است که اثر قابل توجهی بر طراحی سیستم استخراج مایع - مایع دارد. هلدآپ فاز پخش شده، اثر قابل توجهی بر انعقاد قطره، زمان ماندگاری فاز پخش شده و سطح تماس دارد. مطالعات پیشین نشان داده است که اضافه کردن نانوذره در مایعات منجر به افزایش کشش سطحی سیال و کاهش ویسکوزیته سیال پایه می‌شود و این تغییرات بر روی مشخصه هیدرودینامیکی سیستم اثر می‌گذارد. نتایج بدست آمده در بررسی‌های قبلی نشان می‌دهند که قطر قطره و هلدآپ، پارامترهای مهمی در این سیستم‌ها هستند [۷-۵]. یکی دیگر از موادی که می‌تواند بر مشخصه هیدرودینامیکی این سیستم‌ها تاثیرگذار باشد مواد فعال سطحی هستند [۱۴-۹ و ۸ و ۶].

استخراج مایع - مایع یکی از واحدهای مهم در فرآیندهای جداسازی است. این سیستم انتقال جرم اغلب به صورت جریان ناهمسو عمل می‌کند که بازده آن تابع پارامترهای عملیاتی شامل درجه‌ی تلاطم و کشش سطحی است. از بین سیستم‌های استخراج مایع-مایع، ستون ضربه‌ای بازده بالاتری دارد که علت آن سطح تماس زیادی است که با استفاده از یک نیروی خارجی ایجاد می‌گردد [۱۵ و ۱۰]. از پارامترهای کلیدی که بر بازده و انتقال جرم تاثیر می‌گذارند می‌توان به اندازه قطر قطره و تعداد قطرات اشاره کرد. این دو پارامتر ارتباط مستقیمی بر سطح تماس در دسترس برای انتقال جرم داشته و بنابراین بر روی بازده سیستم تاثیرگذار خواهند بود. مطابق تحقیقات انجام شده، شدت ضربه در این سیستم‌ها می‌تواند بر روی تعداد و قطر قطرات تاثیر گذارد [۱۸-۱۶]. تحقیقات زیادی، اثر شدت ضربه بر روی مشخصه‌های هیدرودینامیکی را مورد بررسی قرار داده‌اند که نتایج حاصل از آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش شدت ضربه قطر قطرات کاهش و تعداد قطرات افزایش می‌یابد [۶، ۵، ۱۹-۲۲]. از دیگر پارامترهای عملیاتی این سیستم که می‌تواند بر بازده آن تاثیر گذارد دبی فاز مداوم و پخش شده می‌باشد. به گونه‌ای که با افزایش دبی این دو فاز، قطر قطرات افزایش می‌یابد. علاوه

<sup>1</sup> Amruta

۰/۰۵ و ۰/۱ درصد و هم‌چنین ماده‌ی فعال سطحی SDS با غلظت‌های ۰/۰۰۳، ۰/۰۰۵ و ۰/۰۱ با هدف کاهش قطر قطره و افزایش هلدآپ در سیال پایه استفاده گردید که دلیل استفاده از این غلظت‌های نانو ذره و ماده‌ی فعال سطحی، بر اساس محدوده‌ی در نظر گرفته شده توسط سایر پژوهش‌های انجام شده در این زمینه می‌باشد. با این وجود با غلظت‌های متفاوت دیگر نیز تست آزمایشگاهی انجام گرفت که رقم‌های مورد قبولی حاصل نشد.

## ۲-۲- اندازه‌گیری مشخصه‌های هیدرودینامیکی

### سیستم

قطر قطره و هلدآپ به عنوان مشخصه‌های هیدرودینامیکی سیستم در دبی‌های مختلف فاز مداوم و پخش شده و همچنین شدت ضربه متفاوت، در حضور و عدم حضور نانو ذره و ماده‌ی فعال سطحی اندازه‌گیری گردید. برای اندازه‌گیری مشخصه‌های هیدرودینامیکی، سیستم باید در حالت پایا باشد. برای اطمینان از وضعیت حالت پایای سیستم، ستون در حالت یکنواخت عمل می‌کند تا جایی که هیچ گونه تغییری در سطح تماس فازها مشاهده نشود. به منظور تعیین قطر قطرات و رفتار جریان دو فازی درون ستون از روش عکس برداری استفاده شده است. بدین منظور بعد از طی شدن ۱/۵ برابر زمان پایداری به دلیل پایدار بودن سیستم و عدم تغییر پارامترها با زمان، اقدام به گرفتن عکس از سه ناحیه فعال ستون گردیده است.

برای محاسبه‌ی اندازه‌ی متوسط قطرات ابتدا عکس‌های گرفته شده را به محیط نرم افزار Digimizer انتقال داده و سپس توسط ابزار اندازه‌گیری موجود در نرم‌افزار، قطر قطرات مشخص شده و قطر ستون در همه عکس‌ها اندازه‌گیری می‌شود. با داشتن قطر حدود ۳۰۰ قطره در هر یک از آزمایش‌ها، قطر میانگین قطرات و یا به عبارتی قطر متوسط ساتر توسط رابطه‌ی زیر به دست می‌آید [۳۵].

$$d_{32} = \frac{\sum_{i=0}^n n_i d_i^3}{\sum_{i=0}^n n_i d_i^2} \quad (1)$$

که در رابطه‌ی فوق  $n_i$  تعداد قطراتی است که قطر آن‌ها  $d_i$  می‌باشد.

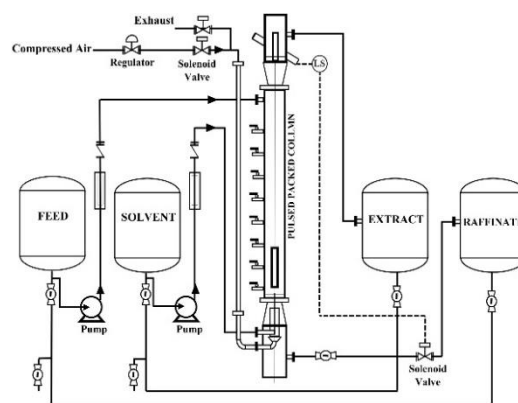
هلدآپ به روش جابجایی تعیین گردید که در این روش در انتهای هر تست، ورودی و خروجی جریان به طور هم‌زمان بسته می‌شوند و سپس اجازه داده می‌شود که فاز مداوم و

آزمایشگاهی بررسی شده و اثر پنج پارامتر دبی فاز مداوم، دبی فاز پخش شده، شدت ضربه، غلظت نانو ذره و غلظت ماده‌ی فعال سطحی در سیال پایه، بر قطر قطره و هلدآپ در سیستم استخراج مایع - مایع بررسی گردید. در انتها رابطه‌ای نیمه تجربی بر اساس اعداد بدون بعد رینولدز و شروود جهت محاسبه‌ی ضریب انتقال جرم در این سیستم‌ها پیشنهاد گردید.

## ۲- شرح آزمایش

### ۱-۲- سیستم آزمایشگاهی

شکل (۱) دستگاه آزمایشگاهی استفاده شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. سیستم آزمایشگاهی شامل آب - استن - تولوئن می‌باشد که استن با غلظت ۳/۵ درصد وزنی به عنوان حل شونده در شرایط انتقال جرم به کار گرفته شده است. آب مقطر به عنوان فاز مداوم و تولوئن با خلوص ۹۹ درصد به عنوان فاز پخش شده مورد استفاده قرار گرفت. لازم بذکر است که سیستم مذکور توسط فدراسیون مهندسی شیمی اروپا در سال ۱۹۱۹ تأیید شده است. کار تجربی حاضر در یک برج ضربه‌ای با قطر ۷/۶ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۵۰ سانتی‌متر انجام گرفت و از رینگ حلقه‌ای با قطر ۱/۹ سانتی‌متر به عنوان پکینگ استفاده شد. به گونه‌ای که ۶۸ درصد ستون از این پکینگ‌ها پر شد. در این سیستم از هوای فشرده شده به عنوان سیستم ضربه استفاده می‌شود و دو تانک برای جریان ورودی و دو تانک برای جریان خروجی با حجم ۵۰ لیتر در نظر گرفته شده است. دبی حجمی جریان با استفاده از دبی‌سنج اندازه‌گیری گردید. سطح تماس دو فاز نیز به طور اتوماتیک به وسیله‌ی سنسور اپتیکال تک سیگنالی با شیر سولونوئید کنترل می‌گردد.



شکل ۱- دستگاه آزمایشگاهی

در این تحقیق از نانو ذره  $\text{SiO}_2$  با غلظت‌های مختلف ۰/۰۱،

هندلس-بارون استفاده گردید که روابط آن به صورت زیر می‌باشد [۳۷].

- تئوری نیومن: این تئوری شامل نفوذ مولکولی در یک قطره‌ی کروی صلب می‌باشد که پیش‌بینی ضریب انتقال جرم توسط این تئوری بر اساس رابطه‌ی ۷ می‌باشد.

$$K_{od} = \left( \frac{-d}{6t} \right) \ln \left[ \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left( \frac{-4n^2 \pi^2 D_d t}{d^2} \right) \right] \quad (7)$$

تئوری کرونیگ-برینک: این تئوری شامل نفوذ آرام با حرکت چرخشی توسط حرکت نسبی یک قطره در فاز مداوم می‌باشد که معادله‌ی آن در رابطه‌ی ۸ نشان داده شده‌است.

$$K_{od} = \left( \frac{-d}{6t} \right) \ln \left[ \frac{3}{8} \sum_{n=1}^{\infty} A_n^2 \exp \left( -\lambda_n \frac{64 D_d t}{d^2} \right) \right] \quad (8)$$

- تئوری هندلس-بارون: این تئوری شامل نفوذ گردابی بین مرکز و خط جریان شعاعی است و مطابق رابطه‌ی ۹ می‌تواند ضریب انتقال جرم را پیش‌بینی کند.

$$K_{od} = \frac{-d}{6t} \ln \left[ 2 \sum_n A_n \exp \left( \frac{-\lambda_n D_d t P_e}{128 d^2} \right) \right] \quad (9)$$

که در روابط فوق،  $D_d$  ضریب نفوذ ( $m^2/s$ )،  $A_n$  ثابت تئوری و  $\lambda$  نسبت ویسکوزیته‌ی فازها می‌باشد. نتایج ارائه شده در مقالات نشان می‌دهد که برای قطرات کوچک، تئوری نفوذ مولکولی یعنی نیومن می‌تواند ضریب انتقال جرم را به خوبی پیش‌بینی کند و با افزایش اندازه‌ی قطره رفتار انتقال جرم از تئوری هندلس-بارون تبعیت خواهد کرد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی مشخصه‌های هیدرودینامیکی سیستم در غیاب هرگونه افزودنی

پارامترهایی که بر روی قطر قطرات تاثیر می‌گذارند شامل دبی فاز های مداوم و پخش شده و شدت ضربه می‌باشد. آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق نشان داد که شدت ضربه و دبی فاز مداوم و پخش شده بر هلدآپ و قطر قطره موثر می‌باشند. به‌گونه‌ای که شدت ضربه در یک دبی ثابت، قطر قطره را کاهش می‌دهد. زیرا با افزایش شدت ضربه قطرات شکسته شده و در نتیجه قطر متوسط ساتر کاهش

فاز پخش شده در سطح تماس به هم متصل شوند. هلدآپ از حجم کل و حجم فاز پخش شده مطابق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\phi = \frac{V_d}{V_d + V_c} \quad (2)$$

که  $V_d$  حجم فاز پخش شده (l) و  $V_c$  حجم فاز مداوم (l) می‌باشد.

#### ۳-۲- پیش‌بینی‌های نظری ضریب انتقال جرم

ضریب کلی انتقال جرم یکی از پارامترهای مهم و ضروری در سیستم استخراج مایع - مایع است که با استفاده از یک روش نیمه تجربی محاسبه می‌شود:

$$-k_d (C_A - C_A^*) . 4\pi r^2 = \frac{4}{3} \pi r^3 \frac{dC_A}{dt} \quad (3)$$

که در رابطه‌ی فوق  $r$  شعاع قطره (m) و  $k_d$  ضریب انتقال جرم (m/s) می‌باشد که با انتگرال‌گیری از معادله ۳ به صورت زیر بدست می‌آید:

$$k_d = \frac{-d_{32}}{6t} \ln(1 - E) \quad (4)$$

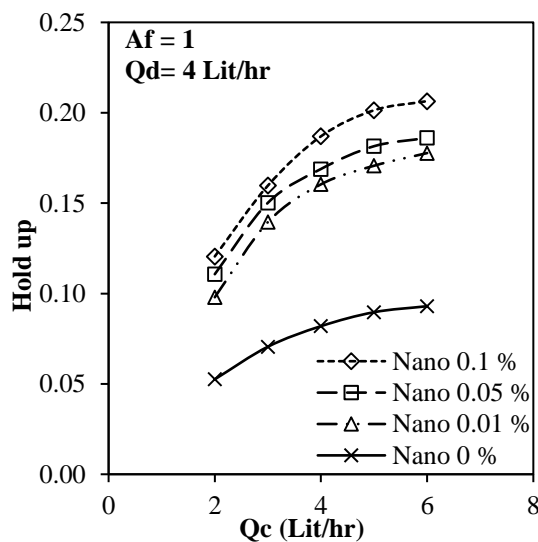
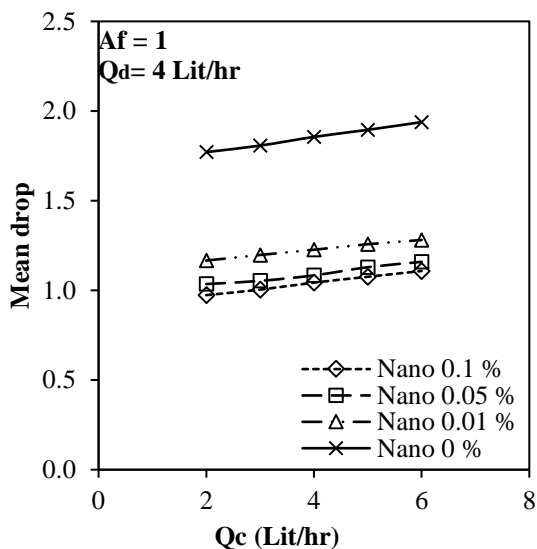
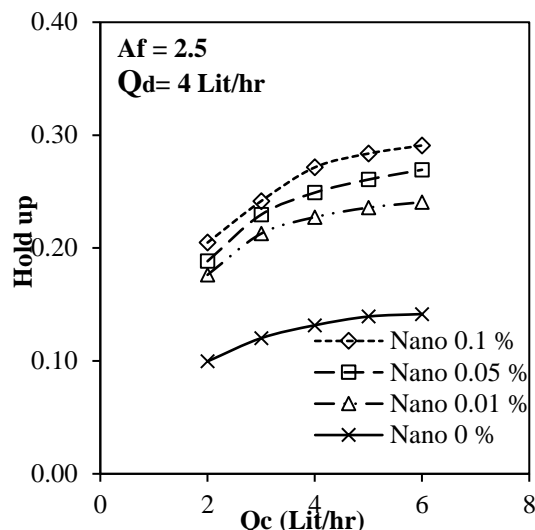
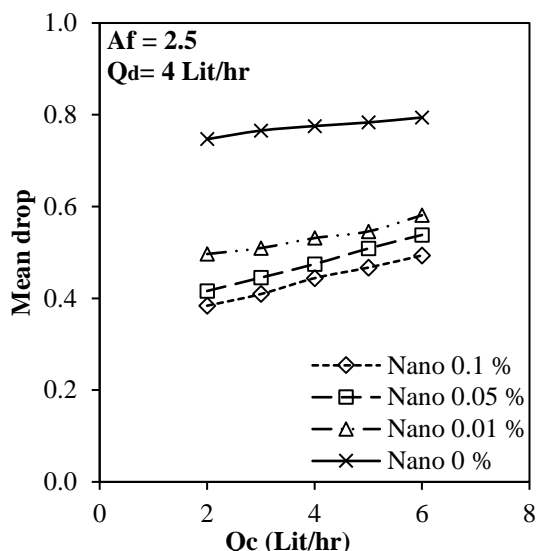
که در این رابطه  $d_{32}$  همان قطر متوسط ساتر (m) و  $t$  زمان تماس (s) می‌باشد و بازده استخراج (E) برابر است با:

$$E = \frac{C_{A0} - C_A}{C_{A0} - C_A^*} \quad (5)$$

که  $C_{A0}$  غلظت اولیه حل شونده (mg/l) زمانی که هنوز انتقال جرمی رخ نداده باشد،  $C_A$  غلظت در موضعی خاص از ستون (mg/l) و  $C_A^*$  غلظت فاز پراکنده‌ی در تعادل با فاز پیوسته (mg/l) می‌باشد. غلظت حل شونده در تعادل با غلظت آن در فاز مداوم با استفاده از داده تعادلی مایع-مایع برای سیستم سه تایی آب - تولوئن - استن تعیین شده است. هم‌چنین زمان تماس، تابعی از دبی حجمی فاز پخش شده ( $Q_d$ ) و مقدار هلدآپ ( $\phi$ ) می‌باشد که با استفاده از رابطه ۶ بدست می‌آید [۳۶]. لازم بذکر است که در رابطه زیر  $L$  طول ستون (m) و  $S$  سطح مقطع آن ( $m^2$ ) می‌باشد.

$$L = \frac{Q_d t}{S \phi} \quad (6)$$

جهت مقایسه‌ی بین ضریب انتقال جرم بدست آمده از رابطه‌ی ۴ و ضرایب انتقال جرم حاصل از پیش‌بینی‌های تئوری، از سه تئوری معمول نیومن، کرونیگ-برینک و



شکل ۲- اثر غلظت نانوذره در سیال پایه بر مشخصه‌های هیدرودینامیکی سیستم

هیدرودینامیکی سیستم را دارد. هدف این بخش تغییر خواص سیال، با استفاده از نانوذره برای تغییر مشخصه‌ی هیدرودینامیکی سیستم می‌باشد. اثر غلظت نانو ذره بر روی قطر قطره در دو شدت ضربه مختلف و در دبی های متفاوت فاز مداوم و فاز پخش شده در شکل (۲) نشان داده شده‌است.

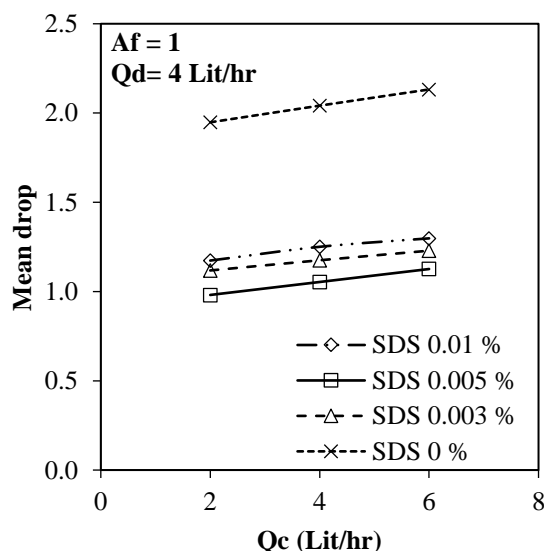
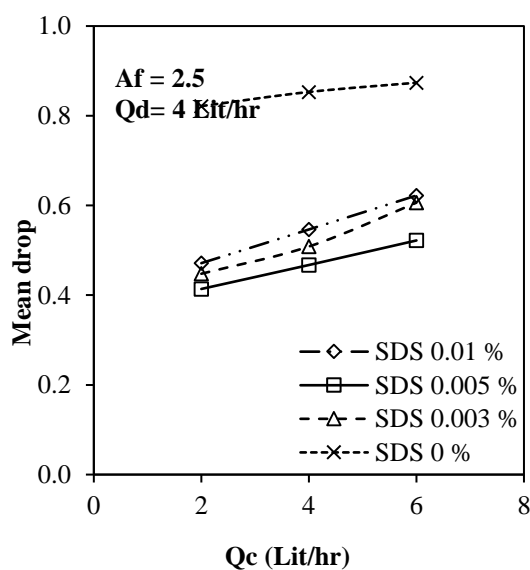
مطابق این شکل با افزایش غلظت نانوذره قطر قطره کاهش می‌یابد. زیرا استفاده از نانو ذره در سیال پایه باعث کاهش کشش بین سطحی شده و این کاهش باعث شکست قطرات و در نتیجه کاهش قطر قطره می‌گردد. اثر غلظت نانوذره در سیال پایه بر هلدآپ نیز بررسی گردید و نتایج نشان داد که با افزایش غلظت نانوذره، هلدآپ افزایش می‌یابد. زیرا حضور نانوذره در سیستم باعث می‌شود که قطر قطرات فاز پخش

می‌یابد. پس از آن اثر دبی فازها بر قطر قطره بررسی گردید و نتایج حاصل نشان داد که با افزایش دبی فاز مداوم، به علت افزایش ائتلاف ایجاد شده، قطر قطره افزایش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش دبی فاز پخش شده، هلدآپ نیز افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش دبی فاز پخش شده، نسبت فاز پخش شده به فاز مداوم در سیستم افزایش یافته که نتیجه آن افزایش قطر قطره می‌باشد. با ائتلاف بیشتر قطرات در سیستم، هلدآپ نیز افزایش می‌یابد.

### ۳-۲- تاثیر نانوذره بر مشخصه‌های هیدرودینامیکی سیستم

در بخش قبلی اثر پارامترهای عملیاتی بر مشخصه های هیدرودینامیکی سیستم بررسی شد. مطابق نتایج بدست آمده شدت ضربه بیشترین تاثیر بر مشخصه‌ی

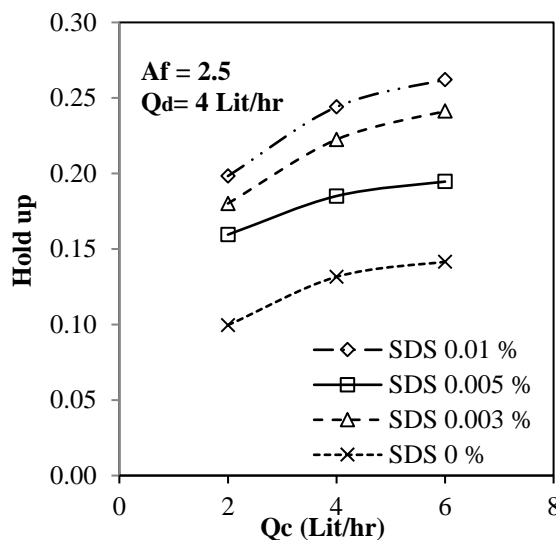
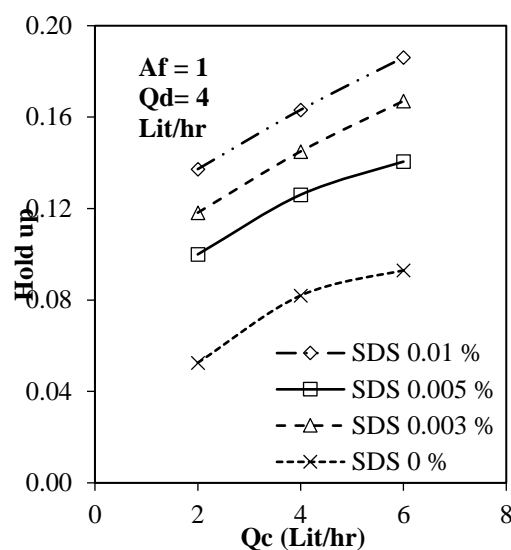
درصد وزنی تا ۰/۰۱ درصدوزنی قطر قطره کاهش می‌یابد. زیرا مواد فعال سطحی تاثیر عمیقی بر رفتار قطرات دارند که با اضافه کردن ماده‌ی فعال سطحی، کشش بین سطحی کاهش یافته و در نتیجه باعث شکست قطرات و به دنبال آن کاهش قطر قطره می‌گردد. همچنین در محدوده‌ی غلظت ماده‌ی فعال سطحی اضافه شده مشاهده گردید، که با افزایش ماده‌ی فعال سطحی هلدآپ کاهش می‌یابد زیرا با کم شدن کشش سطحی ائتلاف قطرات کمتر می‌گردد.



شده کاهش یابد و توزیع قطرات یکنواخت‌تر شود. بنابراین با کاهش قطر قطرات، سرعت قطرات نسبت به فاز مداوم کاهش یافته و در نتیجه با افزایش تعداد قطرات، هلدآپ نیز افزایش می‌یابد.

### ۳-۳- تاثیر ماده‌ی فعال سطحی بر مشخصه‌های هیدرودینامیکی سیستم

شکل (۳) اثر غلظت ماده‌ی فعال سطحی بر هلدآپ و قطر قطره را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود با افزودن ماده‌ی فعال سطحی از غلظت ۰/۰۰۳

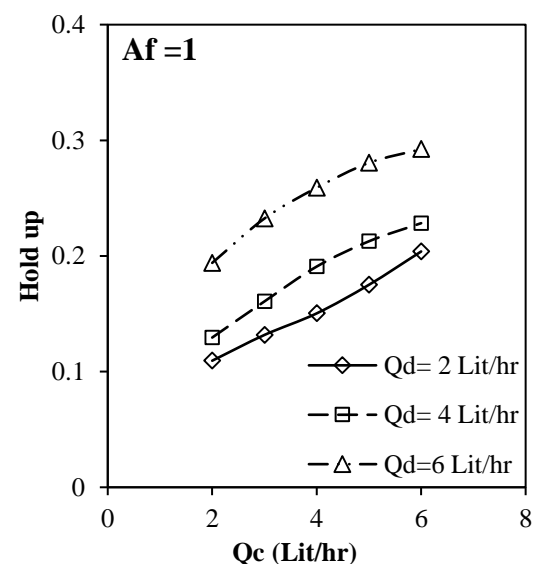
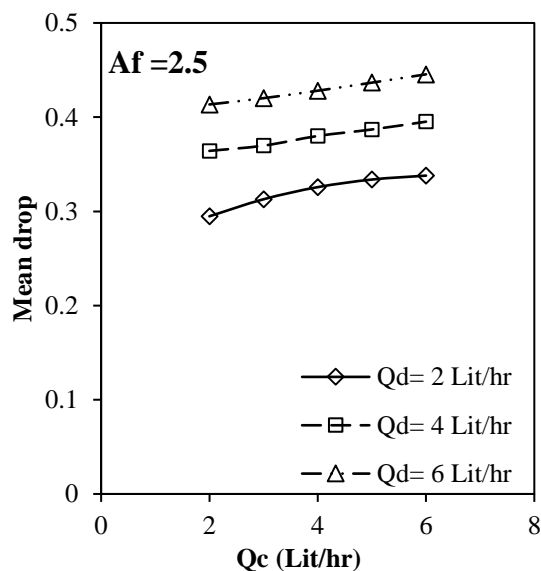
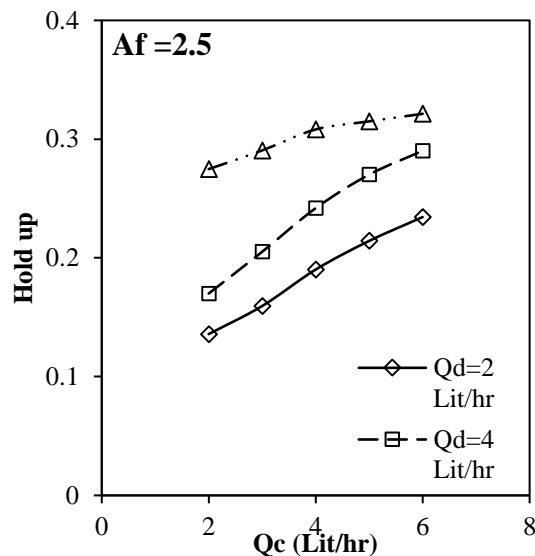
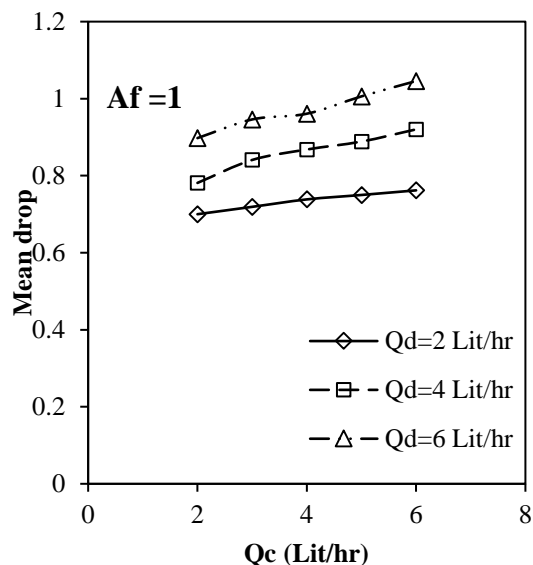


شکل ۳: اثر غلظت ماده‌ی فعال سطحی بر مشخصه‌های هیدرودینامیکی سیستم

درصدوزنی و ماده‌ی فعال سطحی با غلظت ۰/۰۱ درصدوزنی بر مشخصه‌های هیدرودینامیکی سیستم را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، اضافه کردن هم‌زمان نانوذره و ماده‌ی فعال سطحی باعث کاهش قطر قطره و

### ۳-۴- تاثیر استفاده‌ی هم‌زمان از نانوذره و ماده‌ی فعال سطحی بر مشخصه‌های هیدرودینامیکی سیستم

شکل (۴) اثر هم‌زمان اضافه کردن نانو ذره با غلظت ۰/۱



شکل ۴- اثر اضافه کردن ۱٪ درصد وزنی از نانو ذره و ۱۰٪ درصد وزنی از ماده‌ی فعال سطحی به سیستم بر هلدآپ و قطر قطره

هلدآپ و بیشترین میزان انتقال جرم در سیستم می‌گردد.

### ۳-۵- پیش‌بینی قطر متوسط قطره و هلدآپ

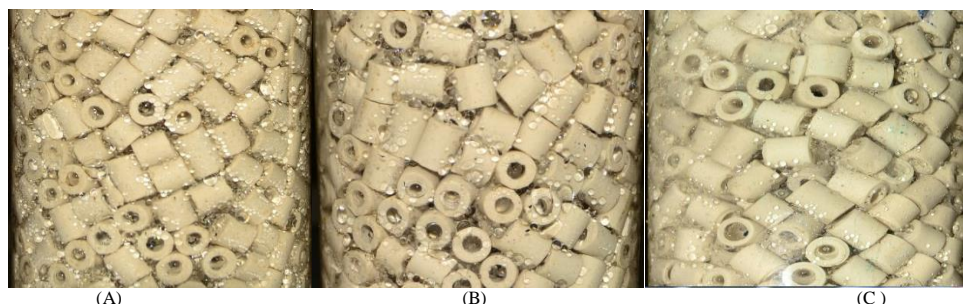
هدف از این مقاله دستیابی به نتایج آزمایشگاهی مربوط به قطر قطره و ارائه‌ی یک رابطه جهت پیش‌بینی قطر قطره و متوسط هلدآپ در ستون‌های پرشده‌ی ضربه‌ای می‌باشد. با استفاده از روش پی‌باکینگهام رابطه‌ای بر حسب پارامترهای عملیاتی شامل شدت ضربه و سرعت فاز مداوم، فاز پخش شده و خواص فیزیکی سیستم بر اساس آنالیز بدون بعد و به کمک نرم افزار SPSS برای تعیین قطر متوسط قطره و هلدآپ بدست آمد. معادله‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب رابطه‌ی قطر متوسط قطره و هلدآپ در ستون، بر حسب درصدوزنی نانو ذره با غلظت ثابت ماده‌ی فعال سطحی در سیستم را نشان می‌دهند.

افزایش هلدآپ می‌گردد.

با اضافه کردن هم‌زمان نانو ذره و ماده‌ی فعال سطحی، هلدآپ نسبت به سیستم وقتی تنها نانو ذره یا ماده‌ی فعال سطحی افزوده می‌گردد، افزایش و همچنین قطر قطره کاهش می‌یابد.

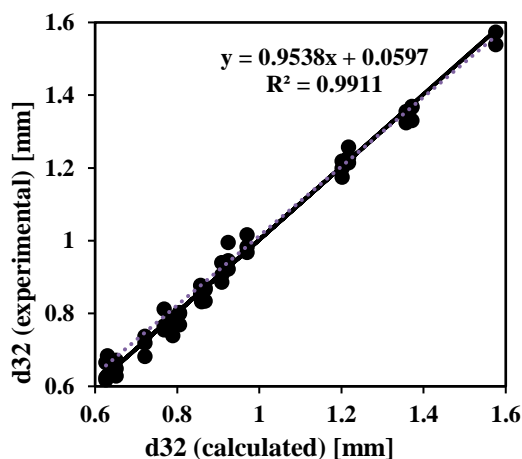
شکل (۵) نشان می‌دهد که استفاده‌ی هم‌زمان از نانو ذره و ماده‌ی فعال سطحی، با توجه به پایداری بیشتری که برای نانوسیال حاصل می‌گردد، باعث می‌شود تا کمترین قطر قطره (۰/۲۹ میلی‌متر) و به‌طور هم‌زمان بیشترین یکنواختی در میزان پراکندگی قطرات بدست آید.

نتیجه‌ی حاصل از موارد ذکر شده مشخص می‌کند که استفاده‌ی هم‌زمان از نانو ذره و ماده‌ی فعال سطحی، که نوآوری این تحقیق می‌باشد، باعث دستیابی به بالاترین



شکل ۵- مقایسه قطر قطره در ستون پر شده ضربه ای با حضور نانو ذره به غلظت ۰/۱ درصدوزنی و ماده‌ی فعال سطحی به غلظت ۰/۰۱ درصد وزنی و استفاده همزمان از آن‌ها؛ (A) قطر متوسط قطره ۰/۲۹ میلی‌متر، سیستم حاوی نانو ذره با غلظت ۰/۱ درصد و سورفکتانت با غلظت ۰/۰۱ درصد وزنی، (B) قطر متوسط قطره ۰/۴۸ میلی‌متر، سیستم حاوی سورفکتانت با غلظت ۰/۰۱ درصد وزنی، (C) قطر متوسط قطره ۰/۳۸ میلی‌متر، سیستم حاوی نانو ذره با غلظت ۰/۱ درصد وزنی

افزایش می‌یابد ولی این تغییر ناچیز می‌باشد. در حالی که هلدآپ تغییر قابل توجهی، به طور متوسط افزایش ۱/۵ برابری، داشته است.



شکل ۶- مقایسه داده‌های تجربی بدست آمده برای قطر متوسط ساتر با مقادیر محاسبه شده

با افزایش شدت ضربه، قطر قطرات کاهش می‌یابد؛ زیرا با افزایش شدت ضربه قطرات شکسته می‌شوند و قطرات کوچکتری تشکیل می‌شود. بنابراین می‌تواند باعث بهم پیوستن قطرات در طول ستون و در نتیجه افزایش هلدآپ شود. در دبی پایین فاز پخش شده، شدت ضربه اهمیت بیشتری دارد به طوری که با تغییر شدت ضربه از ۱ تا ۱/۷۵، قطر متوسط قطرات و هلدآپ تغییرات ۵۰ درصدی دارد. با افزایش  $Q_c$  نیز وقتی شدت ضربه از ۱ به ۱/۷۵ تغییر می‌کند، هلدآپ افزایش ۲۰ درصدی و قطر قطرات افزایش ۴۸ درصدی دارد. این بدین معنا می‌باشد که شدت ضربه تاثیر بیشتری بر قطر قطرات نسبت به هلدآپ دارد. علاوه با تغییر  $Q_d$  از ۲ به ۶ و تغییرات شدت ضربه، هلدآپ

$$\frac{d_{32}}{\sqrt{\gamma/\Delta\rho g}} = 3.41 \times 10^{-5} \left( \frac{Af}{U_d} \right)^{-0.243} \left( \frac{\Delta\rho}{\rho_c} \right)^{-1.637} \left( \frac{\mu_c}{\mu_d} \right)^{0.112} \left( \frac{\mu_d U_d}{\gamma} \right)^{-0.152} \times \left( 1 + \frac{U_d}{U_c} \right)^{-0.074} (1+w)^{-0.565} \quad (10)$$

$$\varphi = 0.441 \times \left( 1 + \frac{V_c}{V_d} \right)^{0.159} \left( \frac{A_f \cdot \rho_c}{g \sigma} \right)^{-0.12} \left( \frac{V_d \cdot \rho_c}{g \sigma} \right)^{0.82} \left( \frac{\Delta\rho}{\rho_c} \right)^{-0.187} \left( \frac{\mu_d \cdot g}{\sigma \cdot \rho_c} \right)^{-0.0051} \times \left( 1 + 0.22w \right)^{0.54} \quad (11)$$

که در روابط فوق  $g$  شتاب جاذبه ( $m/s^2$ )،  $Af$  شدت ضربه ( $cm/s$ )،  $\mu_d$  و  $\mu_c$  به ترتیب ویسکوزیته فاز مداوم و فاز پخش شده ( $kg/m.s$ )،  $\Delta\rho$  اختلاف جرم حجمی دو فاز ( $kg/m^3$ )،  $\rho_d$  و  $\rho_c$  به ترتیب جرم حجمی فاز مداوم و فاز پخش شده ( $kg/m^3$ )،  $U_d$  و  $U_c$  به ترتیب سرعت فاز مداوم و فاز پخش شده ( $m/s$ ) و  $\sigma$  کشش بین سطحی ( $N/m$ ) و  $w$  درصد وزنی نانو ذرات می‌باشد. در شکل (۶) نتایج آزمایشگاهی بدست آمده برای قطر متوسط ساتر با مقادیر محاسبه شده از رابطه‌ی ۱۰ مقایسه شده است که متوسط خطا در این برازش ۵/۴ درصد می‌باشد.

### ۳-۶- تاثیر مشخصه‌های هیدرودینامیکی سیستم بر انتقال جرم

نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها نشان داد که دبی فاز مداوم و شدت ضربه بر هلدآپ و قطر قطره در سیستم موثر هستند. به گونه‌ای که با افزایش دبی فاز مداوم قطر قطره و هلدآپ به دلیل افزایش همبستگی قطرات افزایش خواهد یافت. در یک شدت ضربه‌ی ثابت، اگرچه قطر قطرات



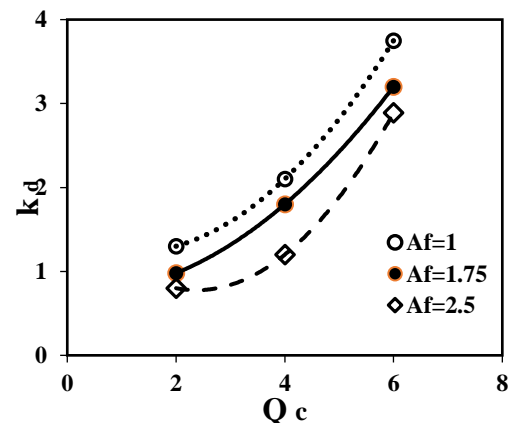
### ۳-۷- تاثیر استفاده از نانوذره و ماده‌ی فعال سطحی

#### بر بهبود ضرائب انتقال جرم

استفاده از نانوذره علاوه بر تغییر مشخصه هیدرودینامیکی با ایجاد حرکت براونی درون قطره می‌تواند سبب بهبود ضریب انتقال جرم شود. شکل (۸) تغییرات هلدآپ، قطر قطره و ضریب انتقال جرم را با غلظت نانوذره در بیشترین دبی فاز مداوم، پخش شده و شدت ضربه نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، با افزایش غلظت نانوذره با توجه به اینکه شدت ضربه و دبی فازهای مداوم و پخش شده ثابت می‌باشند، هلدآپ افزایش و قطر قطرات کاهش می‌یابد. با افزودن نانوذره به سیستم، کشش بین سطحی در سیستم کاهش می‌یابد. بنابراین با اعمال ضربه، قطرات به راحتی شکسته شده و قطر قطرات کاهش می‌یابد. با توجه به ارتباطی که بین اندازه‌ی قطره و ضریب انتقال جرم وجود دارد اثر ضریب انتقال جرم در غلظت‌های مختلف نانو ذره بررسی شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، با افزایش غلظت نانو ذره از ۰/۰۱ تا ۰/۱ درصدوزنی، ضریب انتقال جرم ۳۲ درصد کاهش می‌یابد. زیرا قطر قطرات کاهش یافته و قطرات شبیه کره‌های سختی عمل می‌کنند که گردش داخلی کمتری دارند. بنابراین پدیده نفوذ مولکولی در انتقال جرم غالب خواهد شد. اثر ماده‌ی فعال سطحی SDS بر هلدآپ و قطر قطره بررسی گردید و نتایج بدست آمده نشان داد که افزودن ماده‌ی فعال سطحی، باعث کاهش کشش بین سطحی فازهای مداوم و پخش شده می‌گردد. این پدیده بر مشخصه‌های هیدرودینامیکی سیستم تاثیر قابل توجهی می‌تواند داشته باشد. با افزودن ماده‌ی فعال سطحی از غلظت ۰/۰۰۳ تا ۰/۰۱ درصدوزنی به سیستم، قطر قطره کاهش و هلدآپ افزایش می‌یابد. همان‌طور که در قبل بیان شد، کاهش ماده‌ی فعال سطحی باعث کاهش کشش بین سطحی می‌گردد. این امر باعث شکست قطرات و کاهش قطر قطرات می‌شود. آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش غلظت ماده‌ی فعال سطحی از غلظت ۰/۰۰۵ به ۰/۰۱ درصدوزنی، قطر قطره و هلدآپ تغییر می‌کند. قطر قطرات افزایش و هلدآپ کاهش می‌یابد که علت این تغییر روند را می‌توان به ائتلاف قطرات در این بازه از غلظت ماده‌ی فعال سطحی مربوط دانست. با توجه به اینکه ماده‌ی فعال سطحی باعث تغییر مشخصه‌های هیدرودینامیکی سیستم می‌شود، بنابراین می‌تواند بر ضریب انتقال جرم نیز موثر باشد.

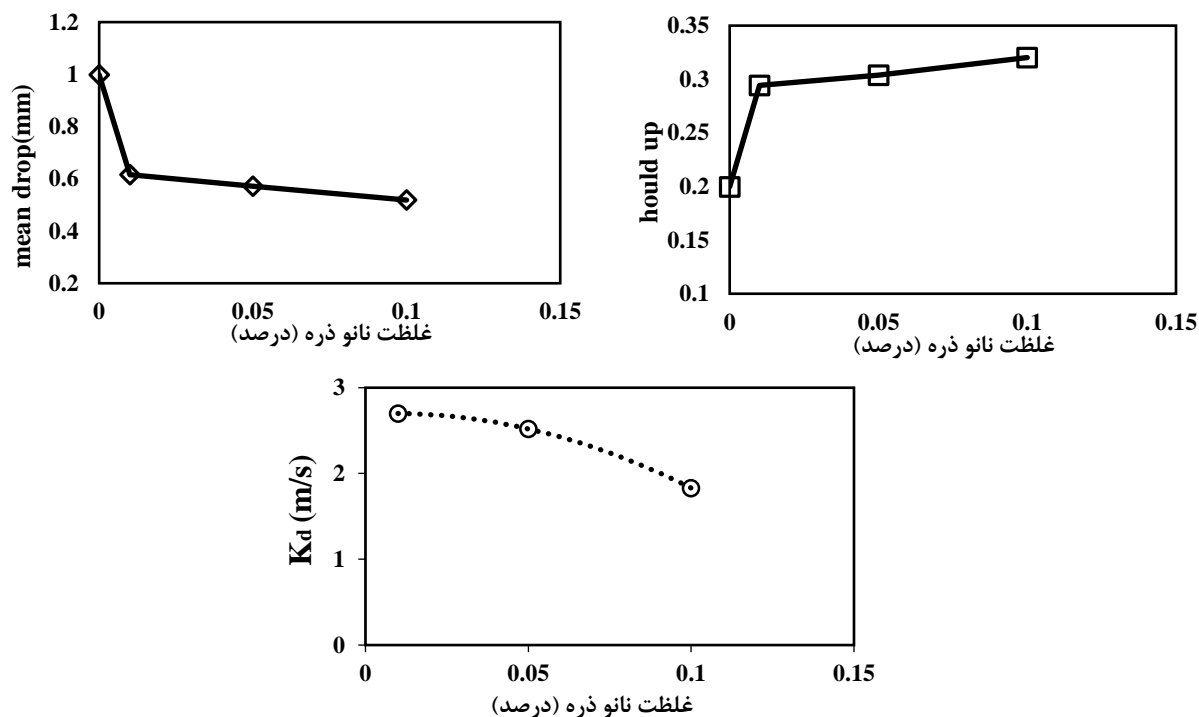
به طور متوسط افزایش ۱۴ درصدی داشته و قطر متوسط قطرات افزایش ۳۸ درصدی خواهد داشت. زیرا در دبی‌های بالای فاز مداوم و فاز پخش شده، قطر قطرات افزایش می‌یابد و با افزایش شدت ضربه تغییرات قطر قطرات کمتر می‌باشد.

تغییر اندازه قطرات بر ضریب انتقال جرم تاثیر دارد و همان‌طور که قبلاً هم بیان شد با تغییر پارامترهای عملیاتی قطر قطره تغییر می‌کند. شکل (۷) اثر شدت ضربه و دبی فاز مداوم بر ضریب انتقال جرم را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود با افزایش دبی فاز مداوم، ضریب انتقال جرم افزایش می‌یابد. ولی با افزایش شدت ضربه، ضریب انتقال جرم کاهش خواهد یافت. وقتی قطر قطرات کاهش می‌یابد، اگرچه سطح تماس افزایش یافته ولی مکانیسم انتقال جرم غالب، نفوذ مولکولی شده که در شدت ضربه‌های بالاتر قطر قطرات آنقدر کوچک می‌شود که قطرات معمولاً به صورت کره‌های سفت و سخت می‌گردند که گردش داخلی ناچیزی دارند. بنابراین انتقال جرم درون قطره به وسیله‌ی نفوذ مولکولی کنترل می‌شود و به همین دلیل ضریب انتقال جرم، با افزایش شدت ضربه کاهش می‌یابد. با افزایش دبی فاز مداوم و پخش شده قطر قطرات افزایش یافته و سهم انتقال جرم جابجایی، افزایش می‌یابد و در نتیجه ضریب انتقال جرم نیز زیاد خواهد شد. با افزایش دبی فاز مداوم از ۲ تا ۶، ضریب انتقال جرم در شدت ضربه ثابت ۱/۸۸ برابر افزایش می‌یابد. در حالی که در دبی ثابت ( $Q_d = 6$ )، با افزایش شدت ضربه از ۱ تا ۲/۵، ضریب انتقال جرم ۲۲ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین دبی فاز مداوم و پخش شده، تاثیر بیشتری بر ضریب انتقال جرم دارد.



شکل ۷- اثر دبی فاز مداوم و شدت ضربه بر ضریب انتقال جرم

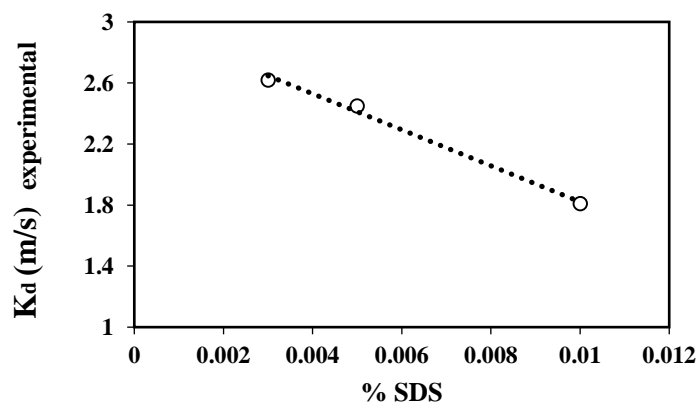
در  $Q_d = 2$



شکل ۸- اثر غلظت نانوذره بر هلدآپ، قطر متوسط و ضریب انتقال جرم در شدت ضربه و دبی فازهای مداوم و پخش شده‌ی ثابت

علت کاهش قابل توجه ضریب انتقال جرم را می‌توان به عواملی همچون تجمع ماده‌ی فعال سطحی در فصل مشترک، جلوگیری از تلاطم و کاهش چرخش قطره و نوسانات سطح آن در طول تشکیل نسبت داد.

شکل (۹) تغییرات ضریب انتقال جرم بر حسب غلظت ماده‌ی فعال سطحی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، با افزایش غلظت ماده‌ی فعال سطحی از ۰ تا ۰/۰۱ درصدوزنی در سیستم، ضریب انتقال جرم از عدد ۲/۶۲ به ۱/۷۸ کاهش می‌یابد.



شکل ۹- اثر غلظت ماده‌ی فعال سطحی بر ضریب انتقال جرم در شدت ضربه و دبی فازهای مداوم و پخش شده‌ی ثابت

۳-۸- مقایسه ضریب انتقال جرم کلی آزمایشگاهی و تئوری  
همان‌طور که قبلاً اشاره شد از بین تئوری‌های موجود، سه تئوری نیومن، کرونینگ-برینک، هندلس-بارون برای پیش‌بینی ضریب انتقال جرم به کار می‌روند. در این قسمت ضرائب انتقال جرم بدست آمده از این سه تئوری با ضریب انتقال جرم آزمایشگاهی مقایسه شده و نتایج در جدول ۱

نشان داده شده‌است. مطابق مقادیر گزارش شده در جدول ۲، با مقایسه ضریب انتقال جرم آزمایشگاهی با این سه تئوری می‌توان نوع مکانیسم غالب در انتقال جرم را پیش‌بینی کرد. ضریب انتقال جرم برای سیستم بدون حضور نانو ذره و ماده‌ی فعال سطحی نیز در شدت ضربه‌های مختلف بررسی شده‌است. همان‌طور که در جدول ۱ دیده می‌شود؛ درصد خطای بدست آمده از تئوری‌های

در شدت ضربه‌های بالاتر، قطر قطره کوچکتر می‌شود و قطره مانند یک جسم صلب عمل کرده و مکانیسم انتقال جرم به صورت نفوذ مولکولی می‌باشد. در شدت ضربه‌ی بالا، تئوری نیومن و کرونیگ-برینک تئوری مناسبی برای پیشگویی نتایج آزمایشگاهی می‌باشد. ضریب انتقال جرم سیستم حاوی درصدهای مختلف نانوذره نیز با استفاده از تئوری‌ها محاسبه شده‌است که بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۲، در شدت ضربه پایین و اندازه قطرات بزرگتر، مدل هندلس-بارون، ضرایب انتقال جرم را  $1.75/5$  درصد بزرگتر از نتایج آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌کند. زیرا در این مدل داخل هر قطره با توجه به وجود نانوذره گردش براونی در نظر گرفته شده‌است. این در حالی است که در عمل این شرایط بدست نمی‌آید و قطره‌ها یک حالت گذار بین جریان و جریان متلاطم کامل را تجربه می‌کنند. بنابراین طبق نتایج بدست آمده تئوری کرونیگ-برینک، تئوری مناسبی برای مدلسازی ضرایب انتقال جرم در حضور نانو ذرات و ماده‌ی فعال سطحی می‌باشد. تئوری کرونیگ-برینک ضریب انتقال جرم را تنها  $3/3$  درصد کمتر از نتایج آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌کند.

### ۳-۹- بازده استخراج

شکل (۱۰) تغییرات بازده نرخ انتقال جرم را برای سیستم آب - تولوئن - استن همراه با نانوذره با شدت ضربه‌های مختلف در  $Af=1, 1.75, 2.5$  cm/s را نشان می‌دهد. غلظت نانو ذره  $SiO_2$  از صفر تا  $0/1$  درصد متغیر است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، با افزایش غلظت نانوذره در شدت ضربه ثابت، بازده استخراج افزایش می‌یابد. به طوری که بیشترین بازده، در غلظت نانو ذره  $0/05$  درصد و  $Af=2.5$  cm/s بدست آمده‌است. علت افزایش قابل توجه انتقال جرم با افزایش نانوذره، حرکت براونی درون قطرات است که باعث می‌شود انتقال جرم جابجایی افزایش یابد و مکانیسم غالب، انتقال جرم جابجایی باشد. با افزایش شدت ضربه همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، بازده استخراج افزایش می‌یابد. اما مطابق نتایج در  $Af=2.5$  cm/s و در بالاترین غلظت نانوذره ( $0/1$  درصد)، بازده نسبت به شدت ضربه کمتر کاهش یافته است که علت این کاهش می‌تواند به دلیل کاهش قطر قطرات باشد. زیرا با افزایش شدت ضربه اندازه قطرات کاهش می‌یابد و قطرات همانند کره سختی خواهند شد که حرکت براونی نانوذرات درون قطرات کاهش یافته و مکانیسم غالب انتقال جرم نفوذ مولکولی می‌باشد.

نیومن و کرونیگ-برینک در شدت ضربه پایین ( $Af=1$ ) cm/s، به ترتیب ۳۷ و ۱۸ درصد می‌باشد که در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی رقم پایین‌تری را ارائه می‌کند. علت این اختلاف می‌تواند به این دلیل باشد که در این تئوری‌ها حرکت براوانی در قطر در نظر گرفته نشده‌است. این در حالی است که ضریب انتقال جرم محاسبه شده با تئوری هندلس-بارون، ۳۰ درصد بالاتر از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت مدل هندلس-بارون در شدت ضربه پایین پیش‌بینی بهتری از ضریب انتقال جرم نسبت به مدل نیومن دارد. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مکانیسم غالب انتقال جرم در این شرایط، انتقال جرم جابجایی است. این در حالی است که در کمترین دبی فاز مداوم و پخش شده، با افزایش شدت ضربه اختلاف نتایج آزمایشگاهی و تئوری نیومن و کرونیگ-برینک کاهش یافته‌است.

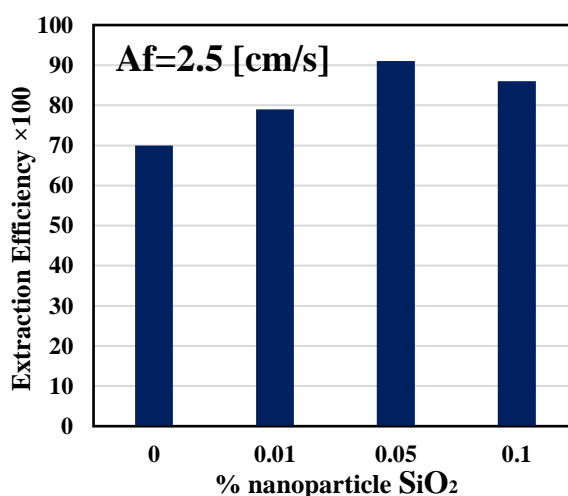
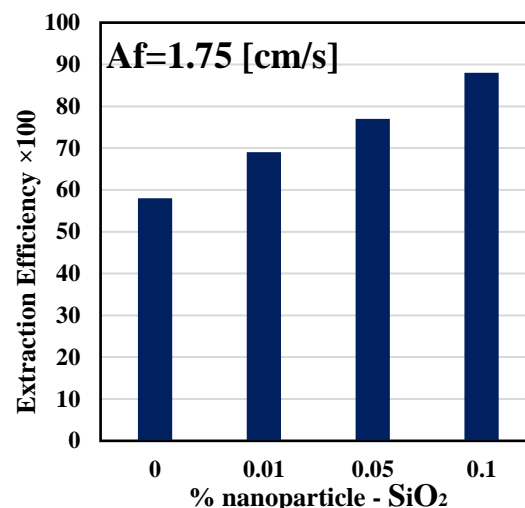
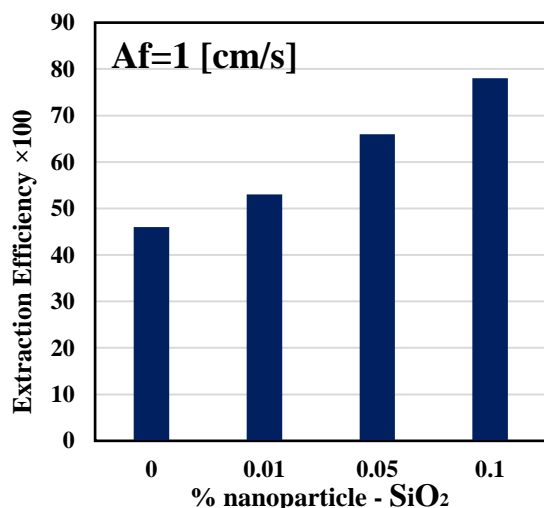
جدول ۱- مقایسه‌ی ضریب انتقال جرم آزمایشگاهی با ضریب انتقال جرم بدست آمده از سه تئوری در شدت ضربه‌های

مختلف و  $Q_d = 2$  (m<sup>3</sup>/s)

Qc (m <sup>3</sup> /s)	Items	Af		
		۱	۱/۷۵	۲/۵
۲	k_exp (m/s)	۱/۳	۰/۹۸	۰/۸
	k_Newman(m/s)	۰/۸۱	۰/۶۹	۰/۶۱
	درصد خطا	۳۷	۳۰	۲۳
	k_Kronig-Brink (m/s)	۱/۱	۰/۹۲	۰/۸۷
	درصد خطا	۱۸	۶	۸
	k_Handlos-Baron (m/s)	۱/۷	۱/۳	۱/۱
	درصد خطا	۳۱	۳۲	۳۷
۴	k_exp (m/s)	۲/۱	۱/۸	۱/۲
	k_Newman(m/s)	۱/۲	۰/۹۳	۰/۸۱
	درصد خطا	۴۳	۴۸	۳۲
	k_Kronig-Brink (m/s)	۱/۸	۱/۵	۰/۹۵
	درصد خطا	۱۴	۱۶	۲۱
	k_Handlos-Baron (m/s)	۳/۲	۲/۳	۱/۸۹
	درصد خطا	۵۲	۲۸	۵۷
۶	k_exp (m/s)	۳/۷۵	۳/۲	۲/۸۹
	k_Newman(m/s)	۱/۹	۱/۲	۰/۹۴
	درصد خطا	۴۹	۶۲	۲۰۷
	k_Kronig-Brink (m/s)	۳/۲	۲/۹۱	۲/۴۵
	درصد خطا	۱۴	۹	۱۵
	k_Handlos-Baron (m/s)	۴/۲	۳/۸۷	۳/۱
	درصد خطا	۱۲	۲۱	۷

جدول ۲- مقایسه‌ی ضریب انتقال جرم آزمایشگاهی با ضریب انتقال جرم بدست آمده از سه تئوری در غلظت‌های مختلف نانوذره

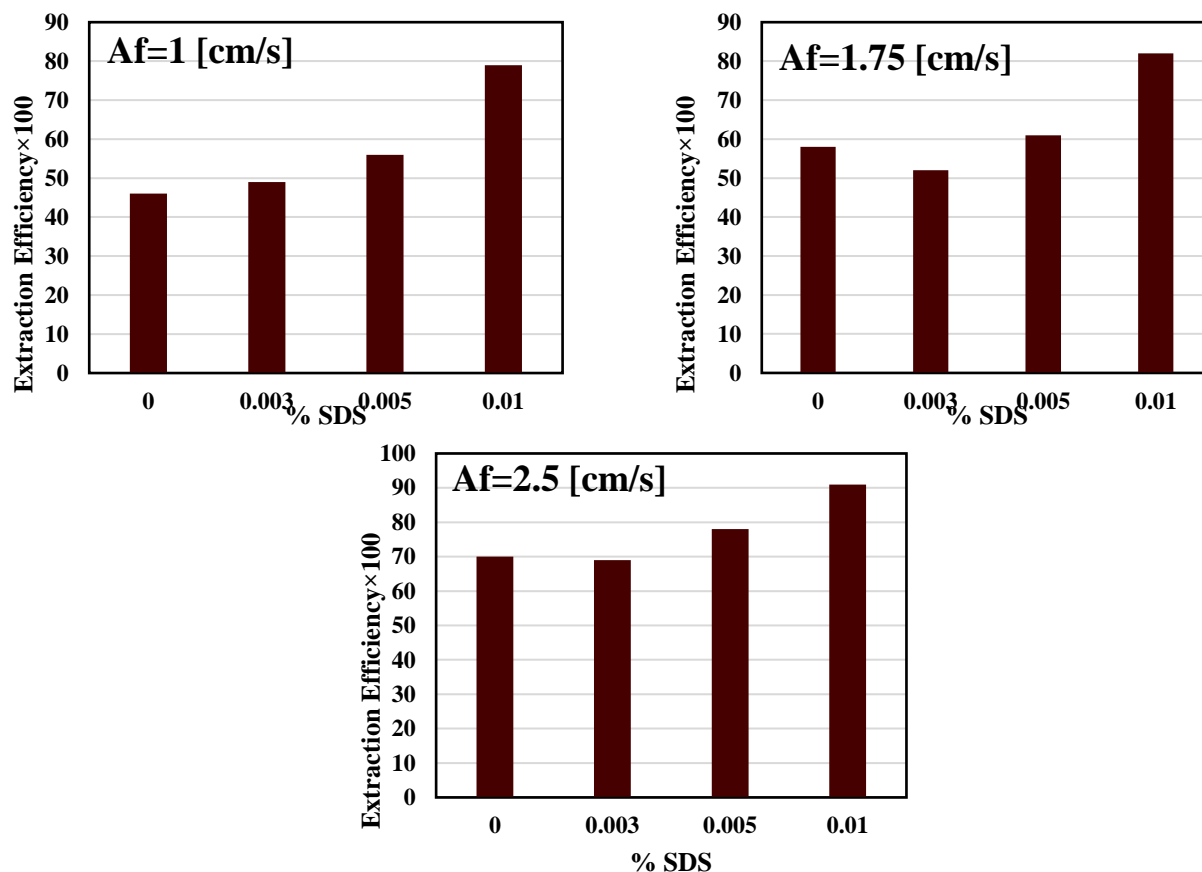
غلظت نانوذره (wt%)	k_exp (m/s)	k_Newman (m/s)	درصد خطا	k_Kronig-Brink (m/s)	درصد خطا	k_Handlos-Baron (m/s)	درصد خطا
۰/۰۱	۲/۷۰	۲/۵۴	۵/۹	۲/۶۱	۳/۳	۳/۲۰	۱۸/۵
۰/۰۵	۲/۵۲	۲/۴۹	۱/۲	۲/۵۰	۰/۸	۲/۸۳	۱۲/۳
۰/۱	۱/۸۳	۱/۶۵	۹/۸	۱/۸۲	۰/۵	۲/۴۰	۳۱/۱



شکل ۱۰- بازده استخراج سیستم‌های با شدت ضربه‌ی متغیر ( $Af=1, 1.75$  and  $2.5$  cm/s) در دبی فازهای مداوم و پخش شده‌ی ثابت

مکانیسم انتقال جرم نفوذ خواهد بود. مطابق شکل (۱۱)، برای همه‌ی شدت ضربه‌های بررسی شده، با افزایش غلظت ماده‌ی فعال سطحی، بازده استخراج افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت با افزایش ماده‌ی فعال سطحی در سیستم، سطح تماس به اندازه‌ای افزایش می‌یابد که به طور کلی باعث افزایش بازده استخراج می‌شود. بیشترین بازده در شرایط  $SDS=0.01$  wt% و  $Af=2.5$  cm/s بدست آمده‌است که برابر با ۹۱ درصد می‌باشد.

شکل (۱۱) بازده استخراج بر حسب درصد‌های مختلف ماده‌ی فعال سطحی و شدت ضربه را نشان می‌دهد. برای یک فرایند استخراج، بازده کلی انتقال جرم توسط ضریب انتقال جرم و سطح مشترک تعیین می‌شود. مقادیر کم ماده‌ی فعال سطحی، ضریب انتقال جرم را کم می‌کند ولی سطح مشترک را زیاد می‌کند. بنابراین بازده استخراج به علت دو فاکتور رقابتی تغییر می‌کند. اگر ماده‌ی فعال سطحی باعث جلوگیری از چرخش‌های درونی شود،



شکل ۱۱- بازده استخراج بر حسب درصدهای مختلف ماده‌ی فعال سطحی و شدت ضربه (Af) در دبی فازهای مداوم و پخش شده‌ی ثابت

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر پارامترهای عملیاتی شامل دبی فاز مداوم و پخش شده و شدت ضربه بر مشخصه‌های هیدرودینامیکی سیستم استخراج مایع-مایع به صورت آزمایشگاهی بررسی گردید. نتایج بدست آمده نشان داد که شدت ضربه مهم‌ترین فاکتور موثر بر مشخصه‌ی هیدرودینامیکی ستون بوده و کمترین تاثیر را فاکتور دبی فاز مداوم بر عملکرد سیستم دارد. همچنین اثر غلظت نانوذره و ماده‌ی فعال سطحی بر روی قطر قطره و هلدآپ مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج نشان داد که با اضافه کردن نانوذره و ماده‌ی فعال سطحی قطر قطره کاهش و هلدآپ در سیستم افزایش می‌یابد. در همین راستا اضافه کردن هم‌زمان نانوذره و ماده‌ی فعال سطحی سبب کاهش قطر قطره و افزایش قابل توجه هلدآپ می‌گردد.

بعلاوه رابطه‌ی نیمه تجربی برای پیش‌بینی قطر قطره بر حسب پارامترهای عملیاتی و خواص هیدرودینامیکی سیستم ارائه گردید که تغییر این پارامترها سبب تغییر مشخصه‌های هیدرودینامیکی سیستم می‌شود. به گونه‌ای

که با افزایش شدت ضربه از ۱ تا ۲/۵ در بیشترین دبی فاز مداوم، قطر قطره ۵۸ درصد کاهش و به موجب آن ضریب انتقال جرم ۲۳ درصد کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از مقایسه تئوری‌های پیش‌بینی کننده‌ی ضریب انتقال جرم با مدل تجربی ارائه شده نیز نشان داد که در اندازه‌های کوچک قطره، مکانیسم غالب نفوذ مولکولی می‌باشد. به همین دلیل در شدت ضربه‌های بالاتر ضریب انتقال جرم نیز کاهش می‌یابد. در این حالت افزودن نانوذره سبب افزایش بازده استخراج از ۴۶ به ۷۸ درصد گردید. اثر افزودن هم‌زمان غلظت‌های مختلف نانوذره و ماده‌ی فعال سطحی بر مشخصه‌ی هیدرودینامیکی نیز حاکی از آن می‌باشد که با افزایش غلظت نانوذره و ماده‌ی فعال سطحی در سیستم، قطر قطرات کاهش یافته و در نتیجه ضریب انتقال جرم نیز کم می‌شود. همچنین با بررسی تئوری‌های محاسبه‌ی ضریب انتقال جرم مشاهده شد که تئوری کرونیگ-برینک جهت پیش‌بینی ضریب انتقال جرم در سیستم حاوی نانوذره‌ی سیلیس و ماده‌ی فعال سطحی SDS، مدل مناسبی می‌باشد.

## فهرست علائم و نشانه‌ها

واحد	توضیحات	نشانه
m	دامنه ضربه	A
$m^2 / s$	ضریب نفوذ	$D_d$
m	قطر متوسط ساتر	$d_{32}$
Dimensionless	موجودی فاز پراکنده	$\varphi$
1/s	فرکانس ضربه	f
$m / s^2$	شتاب جاذبه	g
m	طول ستون	L
Dimensionless	عدد پکله	Pe
$m^3 / s$	دبی حجمی فاز مداوم	$Q_c$
$m^3 / s$	دبی حجمی فاز پخش شده	$Q_d$
m/s	سرعت فاز مداوم	$U_c$
m/s	سرعت فاز پخش شده	$U_d$
Dimensionless	نسبت ویسکوزیته فازها	$\lambda$
kg/m.s	ویسکوزیته فاز مداوم	$\mu_c$
kg/m.s	ویسکوزیته فاز پخش شده	$\mu_d$
$kg / m^3$	جرم حجمی فاز مداوم	$\rho_c$
$kg / m^3$	جرم حجمی فاز پخش شده	$\rho_d$
$kg / m^3$	اختلاف جرم حجمی دو فاز	$\Delta\rho$
N/m	کشش بین سطحی	$\gamma_{or\sigma}$
Dimensionless	درصد وزنی نانو ذرات	$\omega$
m/s	ضریب انتقال جرم	$K_d$

## ۵- مراجع

- [1] J. C. Maxwell, "A treatise on electricity and magnetism Dover Publications", Unabridged Third Edition, Vol. 1, 1954.
- [2] J. Happel, "Viscous flow in multiparticle systems: slow motion of fluids relative to beds of spherical particles", AIChE journal, Vol. 4, No. 2, 1958, pp.197-201.
- [3] R. L. Hamilton, and O. K. Crosser, "Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems", Industrial & Engineering chemistry fundamentals, Vol. 1, No. 3, 1962, pp. 187-191.
- [4] A. S. Ahuja, "Augmentation of heat transport in laminar flow of polystyrene suspensions. I. Experiments and results", Journal of Applied Physics, Vol. 46, No. 8, 1975, pp. 3408-3416.
- [5] S. Krishnamurthy, P. Bhattacharya, P. E. Phelan, and R. S. Prasher, "Enhanced mass transport in nanofluids", Nano letters, Vol. 6, No. 3, 2006, pp. 419-423.
- [6] A. Bahmanyar, N. Khoobi, M. R. Mozdianfar, and H. Bahmanyar, "The influence of nanoparticles on hydrodynamic characteristics and mass transfer performance in a pulsed liquid-liquid extraction column", Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, Vol. 50, No. 11-12, 2011, pp. 1198-1206.
- [7] S. P. Jang, and S. U. Choi, "Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids", Applied physics letters, Vol. 84, No. 21, 2004, pp. 4316-4318.
- [8] A. Bahmanyar, N. Khoobi, M. M. A. Moharrer, and H. Bahmanyar "Mass transfer from nanofluid drops in a pulsed liquid-liquid extraction column", Chemical Engineering Research and Design, Vol. 92, No. 11, 2014, pp. 2313-2323.

- [9] N. Khoobi, A. Bahmanyar, H. Molavi, D. Bastani, M. R. Mozdianfard, and H. Bahmayar, "Study of droplet behaviour along a pulsed liquid-liquid extraction column in the presence of nanoparticles", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 91, No. 3, 2013, pp. 506-515.
- [10] M. A. G. Roozbahani, M. S. Najafabadi, K. N. Hassan Abadi, and H. Bahmanyar, "Simultaneous investigation of the effect of nanoparticles and mass transfer direction on static and dynamic holdup in pulsed-sieve liquid-liquid extraction columns", *Chemical Engineering Communications*, Vol. 202, No. 11, 2015, pp. 1468-1477.
- [11] A. Mirzazadeh Ghanadi, "The effect of nanoparticles on the mass transfer in liquid-liquid extraction", *Chemical Engineering Communications*, Vol. 202, No. 5, 2015, pp. 600-605.
- [12] G. Nematbakhsh, and A. Rahbar-Kelishami, "The effect of size and concentration of nanoparticles on the mass transfer coefficients in irregular packed liquid-liquid extraction columns", *Chemical Engineering Communications*, Vol. 202, No. 11, 2015, pp. 1493-1501.
- [13] J. Saien, and H. Bamdadi, "Mass transfer from nanofluid single drops in liquid-liquid extraction process", *Industrial and engineering chemistry research*, Vol. 51, No. 14, 2012, pp. 5157-5166.
- [14] J. Saien, H. Bamdadi, and Sh. Daliri, "Liquid-liquid extraction intensification with magnetite nanofluid single drops under oscillating magnetic field", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 21, 2015, pp. 1152-1159.
- [15] P. Keblinski, J. A. Eastman, and D. G. Cahill, "Nanofluids for thermal transport", *Materials today*, Vol. 8, No. 6, 2005, pp. 36-44.
- [16] X. Qi. Wang, and A. S. Mujumdar, "Heat transfer characteristics of nanofluids: a review", *International journal of thermal sciences*, Vol. 46, No. 1, 2007, pp. 1-19.
- [17] J. Lee, and I. Mudawar. "Assessment of the effectiveness of nanofluids for single-phase and two-phase heat transfer in micro-channels", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, No. 3-4, 2007, pp. 452-463.
- [18] J. Buongiorno, "Convective transport in nanofluids", 2006, pp. 240-250.
- [19] H. Beiki, M. Nasr Esfahany, and N. Etesami, "Turbulent mass transfer of  $Al_2O_3$  and  $TiO_2$  electrolyte nanofluids in circular tube", *Microfluidics and nanofluidics*, Vol. 15, No. 4, 2013, pp. 501-508.
- [20] H. Beiki, M. Nasr Esfahany, and N. Etesami, "Laminar forced convective mass transfer of  $\gamma-Al_2O_3$ /electrolyte nanofluid in a circular tube", *International journal of thermal sciences*, Vol. 64, 2013, pp. 251-256.
- [21] S. P. Jang, and S. U. Choi, "Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids", *Applied physics letters*, Vol. 84, No. 21, 2004, pp. 4316-4318.
- [22] N. Keshishian, M. Nasr Esfahany, and N. Etesami. "Experimental investigation of mass transfer of active ions in silica nanofluids", *International communications in heat and mass transfer*, Vol. 46, 2013, pp. 148-153.
- [23] A. Rezamohammadi, H. Bahmanyar, M. Sattari, and M. A. Gh. Roozbahani, "Investigation of characteristic velocity in a pulsed packed column in the presence of  $SiO_2$  nanoparticles", *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 94, 2015, pp. 494-500.
- [24] M. Amani, P. Amani, A. Kasaeian, O. Mahian, and S. Wongwises, "Thermal conductivity measurement of spinel-type ferrite  $MnFe_2O_4$  nanofluids in the presence of a uniform magnetic field", *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 230, 2017, pp. 121-128.
- [25] M. Amani, P. Amani, A. Kasaeian, O. Mahian, F. Kasaeian, and S. Wongwises, "Experimental study on viscosity of spinel-type manganese ferrite nanofluid in attendance of magnetic field", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 428, 2017, pp. 457-463.
- [26] X. Fang, Y. Xuan, and Q. Li, "Experimental investigation on enhanced mass transfer in nanofluids", *Applied Physics Letters*, Vol. 95, No. 20, 2009, p. 203108.
- [27] A. N. Turanov, and Y. V. Tolmachev, "Heat-and mass-transport in aqueous silica nanofluids", *Heat and mass transfer*, Vol. 45, No. 12, 2009, pp. 1583-1588.
- [28] S. Ozturk, A. H. Yassin, and M. U. Victor, "Interfacial complexation explains anomalous diffusion in nanofluids", *Nano letters*, Vol. 10, No. 2, 2010, pp. 665-671.
- [29] J. Veilleux, and S. Coulombe, "A total internal reflection fluorescence microscopy study of mass diffusion enhancement in water-based alumina nanofluids", *Journal of Applied Physics*, Vol. 108, No. 10, 2010, p. 104316.

- [30] V. Subba-Rao, P. Hoffmann, and A. Mukhopadhyay. "Tracer diffusion in nanofluids measured by fluorescence correlation spectroscopy", *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 13, No. 12, 2011, pp. 6313-6319.
- [31] B. Sunden, and F. Salimi Nanagedani, "Prediction of mass transfer coefficient of the continuous phase in a structured packed extraction column in the presence of SiO<sub>2</sub> nanoparticles", *Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT)*, Vol. 14, 2020.
- [32] S. Khooshechin, J. Safdari, M. A. Moosavian, and M. H. Mallah, "Applying forward mixing model in an L-shape pulsed packed extraction column to investigate the influence of drop size distribution on mass transfer", *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 145, 2019, pp. 279-287.
- [33] B. Shakib, R. Torkaman, M. T. Mostaedi, and M. Asadollahzadeh, "The performance of pulsed scale-up column for permeable of selenium and tellurium ions to organic phase, case study: Disc and doughnut structure", *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, Vol. 157, 2020, p. 108042.
- [34] A. S. Shet, and K. Sh. Vidya, "TiO<sub>2</sub> nanofluid for oxygen mass transfer intensification in pulsed plate column", *Chemical Engineering Communications*, 2020, pp. 1-23.
- [35] H. R. C. Pratt, and G. W. Stevens, "Selection, design, pilot-testing and scale-up of extraction equipment", *Science and Practice of Liquid-Liquid Extraction*, Edited by JD Thornton, 1992, pp. 492-589.
- [36] R. E. Treybal, "Mass transfer operations." New York 466, 1980.
- [37] A. Kumar, and S. Hartland, "Correlations for prediction of mass transfer coefficients in single drop systems and liquid-liquid extraction columns", *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 77, No. 5, 1999, pp. 372-384.