



بررسی روابط تجربی برای محاسبه ضریب درگ اعمالی بر حباب در حال صعود در محلول آبی ساکن در حضور بخار هگزان در فاز گسسته

مهدی رجبزاده دزفولی

کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، mrajabzadehdezfuli@gmail.com

چکیده

تماس دو فاز گاز و مایع کاربردهای بسیار متنوع و گسترده‌ای در فرآیندهای مختلف صنعتی و شیمیایی اعم از تقطیر، تخمیر، جذب، دفع و... دارد. پژوهشگران و صنعتگران با دستیابی به دانش عمیق در این زمینه قادر به طراحی و کنترل دقیق‌تر تجهیزات و فرآیندهای شیمیایی گوناگون خواهند بود. در این پژوهش برای اولین مرتبه، اثر ناخالصی مولکول‌های بخار هگزان در فاز گسسته و هم‌افزایی آن با نانوذرات سیلیکا که به عنوان ناخالصی در فاز پیوسته حضور دارند، با استفاده از تکنیک آزمایشگاهی بسیار دقیق و حساس حباب در حال صعود، بر ضریب درگ تک حباب هوای در حال صعود بررسی شد. مولکول‌های بخار هگزان موجود در فاز گسسته، در نهایت بر روی سطح مشترک گاز-مایع کاندنس می‌شوند و لایه‌ای روغنی پدید می‌آورند. پیدایش لایه روغنی هگزان در سطح مشترک، لغزندگی سطح مشترک را افزایش می‌دهد. بعلاوه، نانوذرات سیلیکای موجود در سطح مشترک گاز-مایع، بطور پیوسته در حال چرخش و لرزش در مکان‌های خود در سطح حباب در حال صعود هستند. بهترین هم‌افزایی ناشی از تشکیل لایه روغنی هگزان با اثرات لرزشی و چرخشی نانوذرات در غلظت 200 ppm اتفاق افتاد که ضریب درگ حباب در مقایسه با صعود حباب در آب خالص به میزان تقریباً 9٪ کاهش یافت. نتایج حاصل از مقایسه داده‌های آزمایشگاهی با مقادیر پیش‌بینی شده توسط روابط محققان پیشین، بیانگر این است که هیچکدام از روابط قادر نیستند ضریب درگ حباب را برای سیستمی که حاوی ناخالصی مولکول‌های بخار هگزان و نانوذرات سیلیکا است، پیش‌بینی کنند و مطالعات بیشتر در این زمینه مورد نیاز است.

واژه‌های کلیدی

سطح مشترک گاز-مایع، حباب در حال صعود، بخار هگزان، نانوذرات سیلیکا، ضریب درگ

مقدمه

حرکت تک حباب در حال صعود در مایع در فرآیندهای مهندسی شیمی اعم از اختلاط و جداسازی گاز و مایع از اهمیت بالایی

برخوردار است. از جمله فرآیندهای صنعتی و شیمیایی که تماس بین دو فاز گاز و مایع در آن‌ها اتفاق می‌افتد می‌توان به تقطیر، جذب، دفع و شناورسازی و... اشاره کرد که کاربردهای فراوان و مستقیمی در صنایع مختلف نظیر صنایع دارویی، غذایی، آرایشی و بهداشتی و روان‌سازی دارد [1-7].

نیروی درگ به عنوان یکی از مهم‌ترین نیروها در کنترل کردن حرکت حباب در حال صعود در مایع به شمار می‌رود که به شدت رفتار سیستم‌های جریان حبابی را تحت تاثیر قرار می‌دهد [8-10]. بنابراین دستیابی به دانش عمیق در زمینه پیش‌بینی ضریب درگ سیستم‌های جریان حبابی بسیار کمک کننده به پژوهشگران و مهندسان است برای طراحی و کنترل هر چه بهتر و دقیق‌تر واحدهای عملیاتی شیمیایی که از آن جمله می‌توان به محاسبه سرعت صعود حباب، زمان ماند، نرخ انتقال حرارت و انتقال جرم، تخمین سایز تجهیزات فرآیندی، نرخ مصرف انرژی و... اشاره کرد. با توجه به موارد ذکر شده و اهمیت بالای تماس میان دو فاز گاز و مایع در فرآیندهای مختلف، مطالعات متعددی بر روی پیش‌بینی ضریب درگ حباب در حال صعود در مایعات خالص و مایعات حاوی ناخالصی (سورفکتانت) با رویکردهای تجربی و نیمه تجربی انجام شده است [9]. از جمله مطالعاتی که بر روی ضریب درگ حباب‌های در حال صعود با فرض اینکه شکل حباب در حال صعود در تمام طول حرکتش در ستون مایع کروی باقی می‌ماند می‌توان به پژوهش‌های تورتن و همکاران [11]، شیلر و همکاران [12]، ایشی و همکاران [13]، بارنیا و همکاران [14] و کلیفت و همکاران [15] اشاره کرد که منجر به ارائه روابطی برای پیش‌بینی ضریب درگ حباب بر حسب تابعی از عدد بدون بعد رینولدز گردید. در سال‌های بعد دانشمندان مختلف دریافتند که شکل حباب در حال صعود در طول حرکتش در مایع دستخوش تغییرات قابل توجهی می‌شود که این تغییرات شکل به شدت بر هیدرودینامیک حباب در حال صعود تاثیرگذار است. بنابراین آن‌ها روابط محققان پیشین را اصلاح کردند؛ یعنی برای ارائه روابط ضریب درگ تغییرات شکل حباب را هم در نظر گرفتند که در نهایت منتج به ارائه روابطی برای پیش‌بینی ضریب درگ بر حسب تابعی از اعداد بدون بعد مورتن، اتوس و وبر گردید. تومیاما و همکاران [16]



مواد و روش‌ها

در این پژوهش، برای ایجاد اتمسفری اشباع از بخار هگزان، هگزان (خالص) از شرکت Carlo Erba Reagents S.A.S. در ایتالیا خریداری شد. بعلاوه نانوذرات کروی سیلیکا به شکل پودر سفیدرنگ با درصد خلوص ۹۹.۹۹٪ و اندازه قطر ۱۰ تا ۲۰ نانومتر از شرکت Evonik Industries در آلمان تهیه شد. همچنین آب دیونیزه که برای ساختن محلول‌های نانوسیال در این پژوهش استفاده شد، تهیه شده از شرکت زلال طب شیمی در ایران با کشش سطحی $0.3 \pm$ میلی نیوتن بر متر می‌باشد. برای اینکه انحلال نانوذرات به خوبی صورت گیرد، علاوه بر قرارگیری بشر حاوی نانوذرات و آب دیونیزه روی همزن، از آنجایی که یک سوسپانسیون کلوییدی ایجاد گردید به جهت پایداری بیشتر، بشر به مدت ۳۰ تا ۳۵ دقیقه در دستگاه حمام اولتراسونیک قرار گرفت. شکل ۱ قرارگیری بشر حاوی محلول نانوسیال را در دستگاه حمام اولتراسونیک نشان می‌دهد. زمانی که بشر حاوی محلول در دستگاه اولتراسونیک قرار می‌گیرد، هر کدام از نانوذرات سیلیکا دارای بار می‌شوند و بدلیل هم نام بودن این بارها دافعه بین نانوذرات به وجود می‌آید که سبب پایداری محلول برای مدت زمانی مطلوب می‌گردد.



شکل ۱: قرارگیری محلول نانوسیلیکا در دستگاه حمام اولتراسونیک

برای ساختن اتمسفری اشباع از مولکول‌های بخار هگزان، یک سرنگ ۲۰ سی‌سی با نسبت ۵۰-۵۰ از هگزان مایع و هوا پر شد. سپس سرنگ مذکور به مدت ۳۰ دقیقه بطور کامل از اتمسفر ایزوله شد. پس از این مدت زمان، هوای موجود در سرنگ از مولکول‌های بخار هگزان اشباع می‌شد. سپس اتمسفر اشباع شده به وسیله یک پمپ سرنگی به درون ستون مایع تزریق گردید و تک حباب‌های هگزان با قطر مشخص 0.03 ± 1 میلی‌متر ساخته شدند. شماتیک دستگاه آزمایشگاهی حباب در حال صعود در شکل ۲ نمایش داده شده است. اجزای مختلف این ستاپ شامل یک ستون پلاکسی شیشه‌ای با ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر و مقطعی مربع شکل به مساحت ۱۶ سانتی‌متر مربع، خط‌کش، نازل موئین تهیه شده از موسسه ماکس پلانک آلمان با قطر داخلی ۰.۰۷۵ میلی‌متر، دیفیوزر، دوربین دیجیتالی شرکت Canon با سرعت ۲۰ فریم بر ثانیه و استروپوسکوپ با محدوده فرکانس ۰.۳ تا ۹۹۹.۹ هرتز که در این پژوهش روی مقدار

سه رابطه برای پیش‌بینی ضریب درگ تک حباب هوای در حال صعود برای سیستم‌های خالص، حاوی مقدار اندکی ناخالصی و آلوده بر حسب تابعی از اعداد بدون بعد رینولدز و اتوس ارائه کردند. این محققان گزارش کردند که روابط ارائه شده قابل کاربرد برای محدوده وسیعی از خواص سیال و قطرهای حباب هستند. یان و همکاران [۸] حرکت تک حباب‌های هوا در سایزهای متفاوت را در پنج غلظت مختلف از محلول 2-octanol به صورت آزمایشگاهی ردیابی کردند. این دانشمندان برای ساختن حباب‌ها در اندازه‌های متفاوت از سیزده نازل با قطرهای داخلی ۰.۱۶ تا ۲.۷ میلی‌متری استفاده کردند. در نهایت این محققان با استفاده از روش برازش غیر خطی منحنی بر داده‌های آزمایشگاهی، رابطه‌ای برای پیش‌بینی ضریب درگ حباب بر حسب تابعی از اعداد بدون بعد رینولدز، اتوس، وبر و مورتن ارائه کردند. بعلاوه آن‌ها ذکر کردند که مدل ارائه شده در تطابق بسیار خوبی با داده‌های آزمایشگاهی است (ماکزیمم خطای نسبی کمتر از ۲.۵٪) و قابل کاربرد برای سیستم‌های خالص و آلوده می‌باشد. همچنین در سال‌های اخیر مطالعات متعددی برای حل پیچیدگی تماس میان جریان‌های گاز-مایع در تجهیزات و فرآیندهای مختلف با استفاده از شبیه‌سازی‌های CFD انجام شده است [۱۷-۲۰]. در شبیه‌سازی‌های CFD، مدل درگ برای حل برهمکنش گاز-مایع مورد نیاز است. در جدول ۱ تعدادی از روابطی که پژوهشگران برای پیش‌بینی ضریب درگ تک حباب در حال صعود در مایعات مختلف (خالص و آلوده) توسعه داده‌اند، نمایش داده شده‌اند.

جدول ۱: روابط پیش‌بینی ضریب درگ تک حباب در حال صعود

در مایعات مختلف

شماره	رابطه	محقق
(۱)	$C_D = 1 + \frac{16}{Re} \left[1 + \frac{Re}{8} + \frac{We}{12} + O(Re^2 \ln(Re)) \right]$	تیلور و همکاران [۲۱]
(۲)	$C_D = \frac{24}{Re} \left[\frac{2 + 3\mu^*}{3 + 3\mu^*} \right], \mu^* = \frac{\mu_g}{\mu_l}$	هادامارد [۲۲]
(۳)	$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re} [1 + 0.15 Re^{0.687}] & Re \leq 1000 \\ 0.44 & Re > 1000 \end{cases}$	شیلر و همکاران [۱۲]
(۴)	$C_D = \frac{16}{Re} \left\{ 1 + \left[\frac{8}{Re} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{3.315}{\sqrt{Re}} \right) \right]^{-1} \right\}$	می و همکاران [۲۳]
(۵)	$C_D = \max \left\{ \frac{24}{Re} [1 + 0.1 Re^{0.75}], \min \left[\frac{8}{3}, \frac{2}{3} \sqrt{Eo} \right] \right\}$	ایشی و همکاران [۱۳]



نتایج

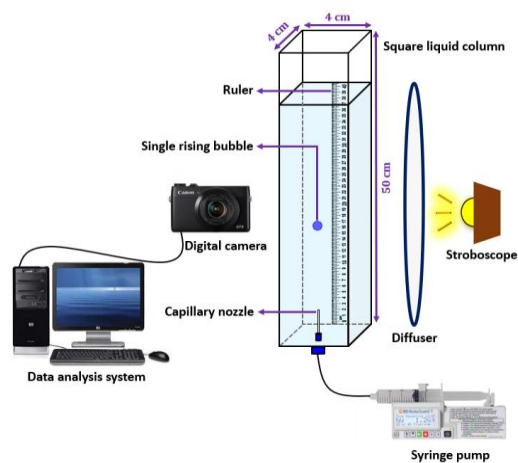
در این پژوهش آزمایشگاهی، ضریب درگ تک حباب‌های هگزان در حال صعود در آب خالص و محلول‌های آبی نانوذرات سیلیکا در پنج غلظت مختلف در محدوده ۵۰ تا ۱۲۰۰ ppm ارزیابی شدند. حبابی که از سر نازل رها می‌شود، به سمت بالا صعود می‌کند. سرعت حباب حین صعود در ستون مایع افزایش می‌یابد تا زمانی که برآیند نیروهای وارد بر حباب در حال صعود (وزن، بویانسی و درگ) صفر شود. پس از آن حرکت حباب بدون شتاب و با سرعت حدی ثابتی انجام می‌شود. در این پژوهش از ارتفاع حدوداً ۶۰ میلی‌متری از سر نازل مویین، حباب به سرعت حدی می‌رسید و ادامه حرکتش را تا سطح مایع موجود در ستون با این سرعت حدی ثابت انجام می‌داد. لازم به ذکر است که در مطالعه حاضر از نیروهای لیفت دیواره و جرم مجازی وارده بر حباب هگزان در حال صعود بدلیل هندسه دستگاه آزمایشگاهی حباب در حال صعود استفاده شده و همچنین قطر حباب رها شده از نازل مویین صرف نظر شده است. با نوشتن موازنه میان نیروهای بویانسی، وزن و درگ وارده بر حباب در حال صعود بر اساس قانون دوم نیوتن، ضریب درگ حباب هگزان در مرحله حرکت با سرعت حدی با استفاده از رابطه (۷) محاسبه می‌شود، مطابق زیر:

$$C_D = \frac{4d_{eq}g(\rho_l - \rho_g)}{3\rho_l V_T^2} \quad (7)$$

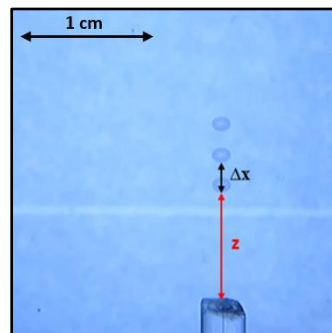
که در این رابطه، d_{eq} ، ρ_l ، ρ_g ، g ، V_T به ترتیب برابر قطر معادل حباب (m)، شتاب گرانش (m/s^2)، چگالی مایع (فاز پیوسته) (kg/m^3)، چگالی گاز (فاز گسسته) (kg/m^3)، و سرعت حدی حباب هگزان در حال صعود (m/s) می‌باشند.

شکل ۴ ضریب درگ حباب هگزان در حال صعود در آب خالص و محلول‌های نانوذرات سیلیکا در غلظت‌های مختلف را نشان می‌دهد. در این شکل، اولین نمودار میله‌ای اثر حضور مولکول‌های بخار هگزان به عنوان ناخالصی در فاز گسسته را به تنهایی بر ضریب درگ تک حباب در حال صعود در آب خالص نشان می‌دهد و سایر میله‌ها نشان‌دهنده اثر هم‌افزایی مولکول‌های بخار هگزان و نانوذرات سیلیکا در سطح مشترک حباب در حال صعود بر ضریب درگ است. مولکول‌های بخار هگزان موجود در فاز گسسته، در نهایت بر سطح مشترک حباب در حال صعود کاندنس می‌شوند و لایه‌ای روغنی پدید می‌آورند. بعلاوه، نانوذرات سیلیکایی که در سطح مشترک گاز-مایع حضور دارند، بطور پیوسته در حال چرخیدن و لرزیدن در مکان‌های خود در سطح حباب در حال صعود هستند. طبق شکل ۴، تا غلظت ۲۰۰ ppm روندی نزولی در ضریب درگ حباب در حال صعود مشاهده می‌شود، در حالی که در غلظت‌های بالاتر (۴۰۰ و ۱۲۰۰)، مقدار ضریب درگ حباب در حال افزایش یافتن است. کاهش

۱۵۰ هرتز تنظیم شد. تمامی آزمایشات در این پژوهش در فشار اتمسفر و دمای ۲۲ درجه سانتیگراد انجام شدند. ستون پلاکسی شیشه‌ای با آب خالص و محلول‌های نانوسیلیکا در غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۱۲۰۰ ppm تا ارتفاع حدوداً ۴۵ سانتی‌متر پر شد و از حرکت تک حباب‌های هگزان جدا شده از نازل مویین تا سطح مایع موجود در ستون توسط دوربین فیلمبرداری شد. ویدیوهای ضبط شده از حرکت حباب در مقاطع مختلف ستون به یک سیستم آنالیز داده منتقل شدند و با استفاده از نرم‌افزار Camtasia به تصاویر متوالی تبدیل شدند. سپس تصاویر استخراج شده از حباب هگزان در حال صعود در مایع با استفاده از نرم‌افزار پردازش تصویر ImageJ آنالیز شدند. در شکل ۳ روش آنالیز تصویر نمایش داده شده است. مطابق شکل مذکور فاصله بین قطب‌های زیرین تصویر حباب در دو مکان متوالی در ستون در مدت زمانی مشخص (عکس فرکانس استروبو اسکوپ) و فاصله قطب پایینی حباب زیرین تا سر نازل اندازه‌گیری شد و مقادیر سرعت محلی حباب هگزان در تمام طول حرکتش محاسبه شدند.



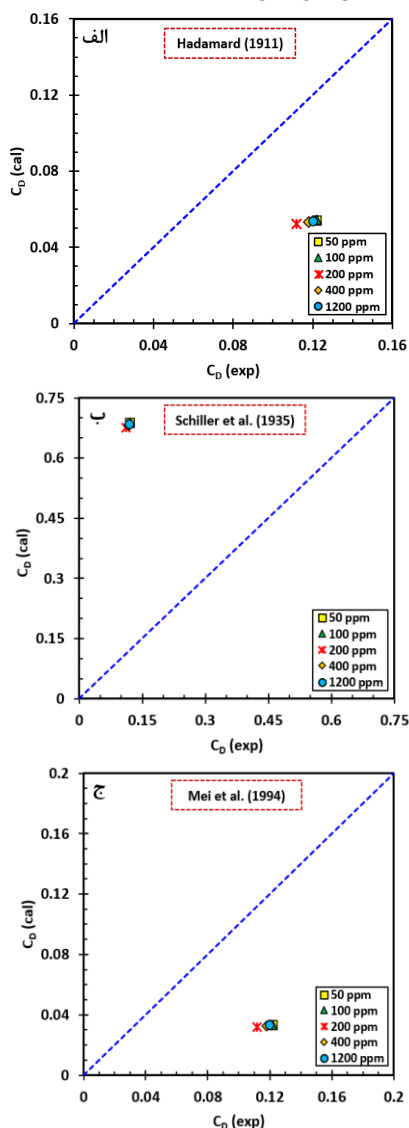
شکل ۲: شماتیک دستگاه آزمایشگاهی حباب در حال صعود



شکل ۳: روش آنالیز تصویر حباب در حال صعود در نرم‌افزار ImageJ



انتخاب شدند. مطابق شکل ۵ هیچکدام از روابط مذکور قادر به پیش‌بینی مناسبی از ضرایب درگ نیستند و خطاهای بسیار زیادی با داده‌های آزمایشگاهی دارند. بنابراین مطالعات و بررسی‌های بیشتر در این زمینه مورد نیاز است تا بتوان رابطه‌ای جدید برای پیش‌بینی ضریب درگ حباب در حال صعود ارائه نمود که ناخالصی از نوع نانوذرات سیلیکا و مولکول‌های بخار هگزان را به ترتیب در فازهای پیوسته و گسسته در نظر بگیرد.

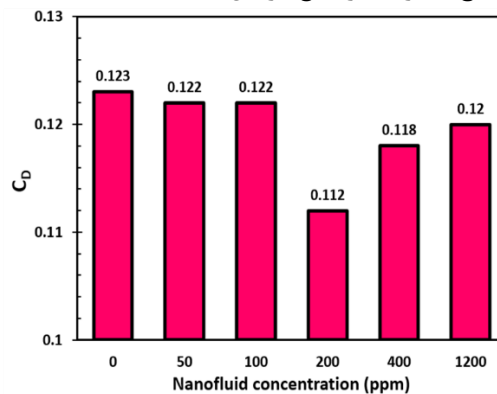


شکل ۵: مقایسه داده‌های آزمایشگاهی ضریب درگ حباب هگزان در حال صعود در محلول‌های نانوسیال با مقادیر پیش‌بینی شده توسط رابطه الف) هادامارد، ب) شیلر و همکاران و ج) می و همکاران

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مطالعه آزمایشگاهی با استفاده از تکنیک حباب در حال صعود، اثر نانوذرات کروی سیلیکا و مولکول‌های بخار هگزان که به ترتیب به

ضریب درگ تا غلظت ۲۰۰ ppm بدین دلیل است که اثر پیدایش لایه روغنی هگزان در سطح مشترک حباب در حال صعود که سبب لغزنده‌تر شدن سطح مشترک گاز-مایع می‌شود با اثرات ناشی از چرخش و لرزش نانوذرات تلفیق شده است و در نهایت موجب کاهش درگ وارده بر حباب در حال صعود می‌گردد. کمترین ضریب درگ در غلظت ۲۰۰ ppm اتفاق افتاده است که درگ وارده بر حباب هگزان در حال صعود در مقایسه با صعود حباب هگزان در آب خالص به میزان تقریباً ۹٪ کاهش یافته است. در غلظت‌های بالاتر از ۲۰۰ ppm، بدلیل افزایش تعداد نانوذرات در سطح مشترک حباب در حال صعود، ضخامت لایه روغنی هگزان به مرور کاهش می‌یابد. مولکول‌های بخار هگزان تمایل دارند تا از توده گاز بر روی سطح مشترک گاز-مایع قرار گیرند؛ در حالی که در غلظت‌های ۴۰۰ و ۱۲۰۰ ppm نیروی مقاوم زیادی در برابر قرارگیری آن‌ها روی سطح مشترک گاز-مایع بدلیل تجمع نانوذرات در سطح مشترک حباب در حال صعود وجود دارد. بنابراین اثر ناشی از تشکیل لایه روغنی هگزان در لغزنده‌تر کردن سطح مشترک حباب در حال صعود و متعاقب آن در کاهش درگ وارده بر حباب در حال صعود در غلظت‌های ۴۰۰ و ۱۲۰۰ ppm نسبت به غلظت ۲۰۰ ppm کمتر است و ضریب درگ و اصطکاک سطح مشترک گاز-مایع افزایش یافته است.



شکل ۴: ضریب درگ حباب هگزان در حال صعود در آب خالص و محلول‌های نانوسیال در غلظت‌های مختلف

مقایسه میان ضرایب درگ آزمایشگاهی بدست آمده برای حباب‌های هگزان در حال صعود در محلول‌های نانوذرات سیلیکا با برخی از روابط موجود در جدول ۱ که برای پیش‌بینی ضریب درگ حباب توسط محققان ارائه شدند، در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به شرایط آزمایشگاهی حاکم در این پژوهش، یعنی نوع رژیم جریان (آرام)، رفتار سیال (نیوتنی)، وجود آلودگی در فازهای گسسته و پیوسته و... روابط ارائه شده توسط هادامارد، شیلر و همکاران و می و همکاران برای راستی آزمایی با مقادیر آزمایشگاهی حاصل شده برای ضریب درگ حباب هگزان در حال صعود در محلول‌های مختلف،

- [4] Premlata, A., Tripathi, M.K., Sahu, K.C., 2015. "Dynamics of rising bubble inside a viscosity-stratified medium". *Physics of Fluids*, 27(7), pp. 072105.
- [5] Bastani, D., Fayzi, P., Lotfi, M., Arzideh, S.M., 2018. "CFD simulation of bubble in flow field: investigation of dynamic interfacial behaviour in presence of surfactant molecules". *Colloid and Interface Science Communications*, 27, pp. 1-10.
- [6] Fayzi, P., Bastani, D., Lotfi, M., 2020. "A note on the synergistic effect of surfactants and nanoparticles on rising bubble hydrodynamics". *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 155, pp. 108068.
- [7] Fayzi, P., Bastani, D., Lotfi, M., Miller, R., 2021. "Influence of Surface-Modified Nanoparticles on the Hydrodynamics of Rising Bubbles". *Chemical Engineering & Technology*, 44(3), pp. 513-520.
- [8] Yan, X., Zheng, K., Jia, Y., Miao, Z., Wang, L., Cao, Y., Liu, J., 2018. "Drag coefficient prediction of a single bubble rising in liquids". *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57(15), pp. 5385-5393.
- [9] Yan, X., Jia, Y., Wang, L., Cao, Y., 2017. "Drag coefficient fluctuation prediction of a single bubble rising in water". *Chemical Engineering Journal*, 316, pp. 553-562.
- [10] Kulkarni, A.A., Joshi, J.B., 2005. "Bubble formation and bubble rise velocity in gas-liquid systems: a review". *Industrial & engineering chemistry research*, 44(16), pp. 5873-5931.
- [11] Turton, R., Levenspiel, O., 1986. "A short note on the drag coefficient for spheres". *Powder Technol*, 47, pp. 83-86.
- [12] Naumann, Z., Schiller, L., 1935. "A drag coefficient correlation". *Z. Ver. Deutsch. Ing*, 77(318), pp. e323.
- [13] Ishii, M., Zuber, N., 1979. "Relative motion and interfacial drag coefficient in dispersed two-phase flow of bubbles, drops and particles". *AIChE J*, 25, pp. 843-855.
- [14] Barnea, E., Mizrahi, J., 1973. "A generalized approach to the fluid dynamics of particulate systems: Part 1. General correlation for fluidization and sedimentation in solid multiparticle systems". *The Chemical Engineering Journal*, 5(2), pp. 171-189.
- [15] Clift, R., Grace, J., Weber, M., Bubbles, D., Particles, Academic Press, New York, 1978.
- [16] Tomiyama, A., Kataoka, I., Zun, I., Sakaguchi, T., 1998. "Drag coefficients of single bubbles under normal and micro gravity conditions". *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, 41(2), pp. 472-479.
- [17] Lane, G., Schwarz, M., Evans, G., 2002. "Predicting gas-liquid flow in a mechanically stirred tank". *Applied Mathematical Modelling*, 26(2), pp. 223-235.
- [18] Montante, G., Horn, D., Paglianti, A., 2008. "Gas-liquid flow and bubble size distribution in stirred tanks". *Chemical engineering science*, 63(8), pp. 2107-2118.

عنوان ناخالصی در فازهای پیوسته و گسسته وارد شدند بر ضریب درگ حباب در حال صعود بررسی شدند. نانوذرات سیلیکا ذراتی جامد هستند که بطور پیوسته در حال چرخش و لرزش در سطح مشترک حباب در حال صعود می‌باشند. مولکول‌های بخار هگزان موجود در فاز گسسته در نهایت در سطح مشترک گاز-مایع کاندنس می‌شوند و لایه‌ای روغنی پدید می‌آورند که سبب افزایش لغزندگی سطح مشترک حباب در حال صعود می‌شوند. بهترین هم‌افزایی میان مولکول‌های بخار هگزان و نانوذرات سیلیکا در غلظت ۲۰۰ ppm رخ داد که در این غلظت ضریب درگ حباب هگزان در مقایسه صعود حباب در آب خالص حدوداً ۹٪ کاهش یافت. در غلظت‌های بالاتر از ۲۰۰ ppm، بدلیل افزایش تعداد نانوذرات در سطح مشترک حباب در حال صعود، نیروی مقاوم زیادی در برابر حرکت مولکول‌های بخار هگزان از توده گاز برای قرارگیری در سطح مشترک گاز-مایع وجود دارد و در نتیجه لایه روغنی هگزان با ضخامت کمتری ایجاد می‌شود. در نتیجه کاهش ضخامت لایه روغنی، اثر مثبت این لایه در لغزنده‌تر کردن سطح مشترک کمتر می‌شود و به همین دلیل ضریب درگ در غلظت‌های ۴۰۰ و ۱۲۰۰ ppm نسبت به غلظت ۲۰۰ ppm افزایش یافت. بعلاوه داده‌های آزمایشگاهی ضریب درگ حباب هگزان در حال صعود در محلول‌های حاوی نانوذرات سیلیکا با روابط ارائه شده برای پیش‌بینی ضریب درگ حباب توسط هادامارد، شیر و همکاران و می‌همکاران مقایسه شدند. نتایج بدست آمده از مقایسه داده‌های آزمایشگاهی با روابط ارائه شده توسط محققان بیانگر این است که هیچکدام از روابط قادر به پیش‌بینی ضریب درگ حباب در حال صعود که حاوی ناخالصی از نوع نانوذرات سیلیکا و مولکول‌های بخار هگزان در فازهای پیوسته و گسسته است، نمی‌باشند و مطالعات و بررسی‌های بیشتر در این زمینه مورد نیاز است.

مراجع

- [1] Huang, C., Wang, L., Chen, X., Wei, X., Liang, J., 2018. "The rising behaviors of single bubbles in stagnant turpentine and pine resin solutions". *Experimental Thermal and Fluid Science*, 98, pp. 170-180.
- [2] Dabestani, M., Yeganehzad, S., Krzan, M., Miller, R., 2019. "Characterisation of egg white adsorption layers under equilibrium and dynamic conditions". *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 568, pp. 29-35.
- [3] Lotfi, M., Bastani, D., Ulaganathan, V., Miller, R., Javadi, A., 2014. "Bubble in flow field: A new experimental protocol for investigating dynamic adsorption layers by using capillary pressure tensiometry". *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 460, pp. 369-376.



- [19] McClure, D.D., Aboudha, N., Kavanagh, J.M., Fletcher, D.F., Barton, G.W., 2015. "Mixing in bubble column reactors: experimental study and CFD modeling". *Chemical Engineering Journal*, 264, pp. 291-301.
- [20] Masood, R., Khalid, Y., Delgado, A., 2015. "Scale adaptive simulation of bubble column flows". *Chemical Engineering Journal*, 262, pp. 1126-1136.
- [21] Taylor, T., Acrivos, A., 1964. "On the deformation and drag of a falling viscous drop at low Reynolds number". *Journal of Fluid Mechanics*, 18(3), pp. 466-476.
- [22] Hadamard, J., 1911. "Mouvement permanent lent d'une sphere liquid et visqueuse dans un liquide visqueux". *CR Hebd. Seances Acad. Sci. Paris*, 152, pp. 1735-1738.
- [23] Mei, R., Klausner, J.F., Lawrence, C.J., 1994. "A note on the history force on a spherical bubble at finite Reynolds number". *Physics of fluids*, 6(1), pp. 418-420.