

مدل سازی و مطالعه تجربی ماندگی فاز گاز در یک ستون حبابی همزن دار

اسمائیل اکبری، احد قائمی*، محمد تقی صادقی

دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده: در این پژوهش ماندگی فاز گاز در یک راکتور ستون حبابی گاز-مایع همزن دار به طور تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. برای انجام آزمایش های تجربی از یک ستون حبابی همزن دار به ارتفاع ۵۴ سانتی متر و قطر ۱۰/۴ سانتی متر استفاده شد. سامانه های مورد مطالعه شامل آب - هوا، گازوئیل - هوا و روغن موتور بهران - هوا بودند. آزمایش ها در بازه دور ۴۰۰-۵۰ دور بر دقیقه همزن انجام شده است. براساس مدل پای باکینگهام یک مدل نیمه تجربی برای ماندگی فاز گاز ارائه شد. نتیجه ها نشان داد با افزایش گرانیوی از ۰/۰۰۱ به ۰/۱۳۶ ماندگی گاز به علت چسبندگی بالای حباب ها در گرانیوی بالا و همچنین بزرگ تر شدن اندازه حباب ها در خروجی از توزیع کننده از ۰/۴۱ به ۰/۳۳ کاهش می یابد. در بین سامانه های انتخاب شده بیشترین مقدار ماندگی فاز گاز برای سامانه گازوئیل - هوا به دست آمد. همچنین نتیجه ها نشان داد که در مواد با گرانیوی پایین کاهش ماندگی فاز گاز به دلیل ایجاد حرکت گردابه ای مایع و کانالیزه شدن هوا توسط همزن می باشد. بهترین دور همزن برای افزایش ماندگی فاز گاز در آب و گازوئیل ۱۵۰ دور بر دقیقه و در روغن موتور بهران در ۴۰۰ دور بر دقیقه به دست آمد.

واژه های کلیدی: ستون حبابی، ماندگی فاز گاز، گرانیوی، کشش سطحی، همزن.

KEYWORDS: Bubble column, Gas phase holdup, Viscosity, Surface tension, Agitator.

مقدمه

به عبارت دیگر پارامترهای هیدرودینامیکی جریان مورد ارزیابی قرار گیرند. دینامیک سیال در راکتورهای ستون حبابی اثر چشمگیری بر عملیات و عملکرد ستون های حبابی دارد. بنابراین بررسی هیدرودینامیک حباب ها نسبت به بقیه موردها از همه مهم تر می باشد. ماندگی فاز گاز یک پارامتر کلیدی برای طراحی بوده که پدیده انتقال ستون های حبابی را مشخص می کند و در اساس به عنوان کسر حجمی گاز اشغال کننده توسط حباب های گازی می باشد. از عامل های مؤثر بر میزان ماندگی فاز گاز در درون ستون می توان به ویژگی های مایع، اندازه های ستون،

ستون های حبابی به دلیل ساختار ساده و بالا بودن میزان انتقال جرم و گرما به طور گسترده به عنوان تماس دهنده های فازها در صنایع شیمیایی، پتروشیمی، متالورژی، بیوشیمیایی و تصفیه زیستی پساب مورد استفاده قرار می گیرند. راکتورهای ستون حبابی دارای پارامترهای طراحی و عملیاتی نظیر ضریب انتقال گرما و جرم بالا، نیاز نداشتن به قطعه های متحرک و یکپارچه بودن قطعه ها، هزینه های تعمیر و نگهداری و همچنین هزینه های عملیاتی بسیار پایین می باشند [۱-۳]. به منظور طراحی بهتر راکتورهای ستون حبابی باید رژیم جریان و یا

*E-mail: aghaemi@iust.ac.ir

* عهده دار مکاتب

جدول ۱. مقادیر تجربی سرعت انتقال و ماندگی گاز در راکتورهای ستون حبابی (آب - هوا)

پژوهشگران	$\varepsilon_{g,trans}$	$V_{g,trans} \left(\frac{m}{s} \right)$	سال	مرجع
بیج و پیل هوفر	۰/۲۷۷	۰/۰۴۶	۲۰۰۵	[۸]
الس و همکاران	۰/۱۷۸	۰/۰۳۹	۲۰۰۵	[۸]
کریشنا و همکاران	۰/۱۹۸	۰/۰۳۳	۱۹۹۱	[۲۰]
یاماشیتا و اینوئه	۰/۲۳۴	۰/۰۴۰	۱۹۷۵	[۲۰]
هیندمن و همکاران	۰/۱۳۷	۰/۰۲۷	۱۹۹۷	[۱۴]

تخمین زده شدند [۱۵]. کریشنا و همکاران معادله‌های ساده‌ای برای توصیف رفتار دسته‌های حباب در ستون‌های حبابی با رژیم جریان آشفته پیشنهاد کردند. بر اساس معادله‌های آن‌ها و با در نظر گرفتن ویژگی‌های جریان گذرا یعنی حالت بین جریان جوشان و جریان آشفته و با نامگذاری $V_{g,trans}$ به معنی سرعت ظاهری گاز در حالت گذرا و $\varepsilon_{g,trans}$ به معنی ماندگی گاز در حالت گذرا، سرعت حباب‌های بزرگ و کوچک و توزیع ماندگی را می‌توان تخمین زد [۲۰، ۲۱]. عامل‌های مؤثر بر اندازه و توزیع اندازه حباب شامل چگالی گاز، گرانیوی مایع، کشش سطحی، و شرایط عملیاتی (دما و فشار) می‌باشند [۲۲، ۲۳]. بسیاری از رابطه‌های که در پژوهش‌ها مطرح شده‌اند، ماندگی گاز و سرعت صعود حباب و اندازه حباب‌ها را پیش‌بینی می‌کنند که مهم‌ترین آن‌ها در جدول‌های ۲ و ۳ آمده است.

ویژگی‌های فاز مایع و شرایط عملیاتی نیز اثر چشمگیری روی ویژگی‌های حباب دارند. سرعت صعود یک حباب گاز به اندازه حباب بستگی دارد. بنابراین، نتیجه‌های بررسی‌ها نشان می‌دهد که میانگین اندازه حباب با کاهش کشش سطحی مایع کاهش می‌یابد و با افزایش گرانیوی افزایش می‌یابد [۳۰]. لو و همکاران، اثر فشار روی دینامیک حباب را بررسی کرده و بیان نمودند که در فشارهای بالا اندازه‌های حباب کم می‌شود. همچنین ادعا کرده‌اند که بالا بردن فشار، سبب افزایش اینرسی گاز و کاهش کشش سطحی می‌شود و در نتیجه بیشینه پایداری اندازه حباب را کاهش می‌دهد [۳۱]. شافر و همکاران، در یک واحد صنعتی مطالعه تجربی بر پایه توزیع اندازه حباب انجام داده‌اند. آن‌ها اثر دانسیته گاز، کشش سطحی، گرانیوی مایع، طراحی توزیع‌کننده و شرایط عملیاتی شامل فشار و دما را روی اندازه حباب بررسی کرده‌اند. پژوهشگران گزارش کرده‌اند که زمانی که کشش سطحی و گرانیوی مایع کاهش می‌یابد پایداری قطر حباب نیز کاهش می‌یابد [۳۲]. تأثیر فشار و دمای عملیاتی نیز مورد بحث قرار گرفت و دیده شد که افزایش دما و فشار در کاهش

گرما و فشار عملیاتی، طراحی توزیع‌کننده اشاره کرد [۸-۴]. با توجه به کاربرد گسترده راکتورهای ستون حبابی، به‌تازگی علاقه زیادی برای پژوهش در زمینه هیدرودینامیک و محاسبه ماندگی فاز گاز دیده شده است [۱۴-۹].

به طور کلی مطالعه‌هایی که تاکنون در زمینه عامل‌های مؤثر بر ماندگی گاز صورت گرفته شامل سرعت ظاهری گاز، ویژگی‌های حباب، ویژگی‌های فاز مایع و شرایط عملیاتی بوده است. رژیم جریان حاکم در ستون‌های حبابی با توجه به سرعت ظاهری گاز موجود در ستون، به سه رژیم همگن، ناهمگن و اسلاگ تقسیم می‌شوند [۱۴]. رژیم جریان در این راکتورها تابعی از سرعت ظاهری و قطر ستون می‌باشد. تورات و جوئسی گزارش کرده‌اند که سرعت انتقال گاز بستگی به اندازه ستون، طراحی توزیع‌کننده و ویژگی‌های فیزیکی سامانه بستگی دارد [۱۵]. رژیم جریان همگن به‌طور معمول در سرعت ظاهری کم‌تر از ۵ سانتی‌متر بر ثانیه گاز رخ می‌دهد که بازه کمی از توزیع اندازه حباب را در بر می‌گیرد و متوسط اندازه حباب‌ها بسیار کوچک می‌باشد. کواگوئه و همکاران دریافتند که در رژیم جریان همگن ماندگی گاز با افزایش سرعت ظاهری گاز به صورت خطی افزایش می‌یابد. در رژیم جریان ناهمگن که سرعت ظاهری گاز بیش‌تر از ۵ سانتی‌متر بر ثانیه بوده، به علت حرکت درهم حباب‌های گاز و همچنین چرخش مایع درون سامانه، گاهی حباب‌ها به یکدیگر چسبیده و اندازه‌های متفاوتی از حباب در این رژیم جریان به وجود آمده و در نتیجه با چسبندگی و شکستن حباب‌ها، بازه گسترده‌ای از توزیع اندازه حباب از چند میلی‌متر تا چند سانتی‌متر به دست می‌آید. متوسط اندازه حباب‌ها که در اثر چسبندگی و شکستن به دست می‌آید متأثر از نرخ انرژی تلف‌شده در توده می‌باشد [۱۷، ۱۶، ۱۴، ۸]. رژیم جریان اسلاگ تنها در ستون‌های با قطر کوچک آزمایشگاهی در نرخ‌های بالای جریان گاز دیده شده است [۸]. این جریان نام خود را از تشکیل حباب‌های اسلاگ گرفته است که در آن حباب‌های بزرگ از طریق دیواره ستون به پایداری می‌رسند [۱۸]. هیلز و میلر نشان دادند که حباب‌های اسلاگ در ستون‌های تا قطر ۱۵ سانتی‌متر دیده شده است [۱۹]. جدول ۱ نتیجه‌های به‌دست‌آمده از مطالعه پژوهش‌هایی در مورد سامانه آب و هوا را برای تغییر ویژگی‌های رژیم جریان نشان می‌دهد [۱۴].

انباشتگی حباب‌ها، در ستون‌های حبابی بر سرعت بالا رفتن و توزیع ماندگی و تغییرهای هیدرودینامیک تأثیر چشمگیری دارد. مطالعه‌های بسیاری روش‌های گوناگونی برای تخمین ویژگی‌های حباب‌ها پیشنهاد داده‌اند. در واقع، همه این روش‌ها بر پایه مدل دو حبابی کریشنا و همکاران می‌باشند. بنابراین، ماندگی حباب و سرعت بالا رفتن برای دو دسته از حباب‌های بزرگ و کوچک

جدول ۲. رابطه‌های ارایه شده برای سرعت صعود حباب

مرجع	سال	رابطه‌ها	پژوهشگران
[۲۴]	۱۹۸۱	$u_{b,small} = \frac{g\rho}{18\mu} d_b^2 \text{ for } Re < 1$	استوکس
[۲۴]	۱۹۸۱	$u_b = \frac{g\rho}{18\mu} d_b^2$	هادامارد - ریبزینسکی
[۲۴]	۱۹۸۱	$u_b = \left[\frac{\rho_l g}{K} \frac{2^{1+n}}{X_n} \left(\frac{4\pi}{3} \right)^{(2+n)3} \right]^{1/n} V_b^{(1+n)3n},$ $X_n = \left(\frac{\rho_l d_b^n u_b^{2-n}}{K} \right),$ (ضریب درگ)	شوگرل
[۲۵]	۱۹۹۴	$\frac{u_{b,sm} \mu_l}{\sigma} = 2.25 \left(\frac{\sigma^3 \rho_l}{g \mu_l} \right)^{-0.273} \left(\frac{\rho_l}{\rho g} \right)^{0.03};$ $\frac{u_{b,lg} \mu_l}{\sigma} = \frac{u_{b,sm} \mu_l}{\sigma} + 2.4 \left(\frac{(V_g - V_{g,trans}) \mu_l}{\sigma} \right)^{0.757} \left(\frac{\sigma^3 \rho_l}{g \mu_l^4} \right)^{-0.077} \left(\frac{\rho_l}{\rho g} \right)^{0.077}$ $\frac{V_{g,trans}}{u_{b,sm}} = 0.5 \exp(-193 \rho_g^{-0.61} \mu_l^{0.5} \sigma_1^{0.11})$	ویلیکینسون
[۲۲]	۲۰۰۰	$u_{b,sm} = u_{b,sm0} \left[1 + \frac{1.073}{u_{b,sm0}} \phi_s \right]$	لی و پراکاش

جدول ۳. رابطه‌های ارایه شده برای اندازه حباب در یک اورفیس

مرجع	سال	روابط	پژوهشگران
[۲۶]	۱۹۹۷	$d_b = \left[\frac{6\sigma d_o}{g(\rho_l - \rho_g)} \right]^{1/3}$	میلر
[۲۴]	۱۹۸۱	$d_b = 0.19 d_o^{0.48} Re_o^{0.32}, Re_o = \frac{4Q\rho_g}{\pi d_o \mu_g}$	مویونگ و بلنچ
[۲۷]	۱۹۵۶	$d_b = 0.18 d_o^{1/2} Re_o^{1/3}, Re < 2000$	لیسون و همکاران
[۲۸]	۱۹۷۰	$V_b = \left(\frac{4\pi}{3} \right)^{1/3} \left(\frac{15\mu_l Q}{2\rho_l g} \right)^{3/4}$	کومار و کولور
[۲۹]	۱۹۷۸	$\frac{d_b}{d_o} = 3.23 \left(\frac{4\rho_l Q}{\pi\mu_l d_o} \right)^{-0.1} \left(\frac{Q^2}{d_o^5} \right)^{0.21}$	هاواراجو و همکاران

گازوئیل - هوا و هوا - روغن موتور بر ماندگی فاز گاز به طور تجربی مورد بررسی قرار گرفت. سامانه‌های مورد استفاده از نظر گرانروی و دانسیته با هم متفاوت بوده و باعث به وجود آمدن اندازه حباب‌های گوناگون می‌شوند. همچنین با استفاده نظریه پای باگینگهام یک مدل نیمه تجربی بر اساس عددهای بدون بعد ارایه شد. ثابت‌های مدل نیمه تجربی

اندازه حباب مؤثر می‌باشد که این یافته‌ها از پژوهش‌های لو و همکاران می‌باشد [۳۱]. ورا و همکاران، آزمایش تجربی با مایع‌های کفزا انجام دادند و گزارش کرده‌اند که اندازه حباب با افزایش غلظت عامل کفزا کاهش می‌یابد [۳۳]. در این پژوهش تأثیر سامانه‌های گوناگون شامل آب - هوا،

جدول ۴. جدول نشانه‌های اختصاری و واحد پارامترهای آزمایش

کمیت	علامت	واحد	دیمانسیون
کشش سطحی	σ_l	N/m	MT^{-2}
گرانروی مایع	μ_l	Pa.s	$ML^{-1}T^{-1}$
گرانروی گاز	μ_g	Pa.s	$ML^{-1}T^{-1}$
دانسیته مایع	ρ_l	Kg/m^3	ML^{-3}
دانسیته گاز	ρ_g	Kg/m^3	ML^{-3}
سرعت ظاهری گاز	v_g	m/s	LT^{-1}
قطر ستون	D_c	M	L
قطر روزنه توزیع کننده	D_d	M	L
ارتفاع مایع	H_l	M	L
دور همزن	N	rpm	T^{-1}

در این پژوهش این رابطه برای سه سامانه آب - هوا، گازوئیل - هوا و روغن - هوا استفاده شده و در ادامه ثابت‌های هر سامانه بر اساس داده‌های تجربی محاسبه شده است.

بخش تجربی

شرح دستگاه

راکتور ستون حبابی مورد نظر با مقیاس آزمایشگاهی و مشخصاتی که در زیر آمده است در شکل ۱ نشان داده شده است. راکتور ستون حبابی شامل یک ستون شیشه‌ای با قطر درونی ۱۰/۴ سانتی‌متر و قطر خارجی ۱۱ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۵ سانتی‌متر می‌باشد که روی پایه‌ای از جنس پلی‌اتیلن با دو واشر سیلیکونی نصب شده است. ورود مایع به درون راکتور از مخزنی است که در بالای راکتور تعبیه شده و به وسیله شیر ورودی به درون راکتور صورت می‌پذیرد و خروج آن از طریق شیر خروجی که در پائین راکتور قرار دارد، می‌باشد. در این دستگاه برای هوادهی از یک کمپرسور با حجم ۳۰۰ لیتر استفاده شده است. فشار ورودی سامانه یک بار می‌باشد که به وسیله شیر فشار شکن تنظیم شده است. برای تنظیم شدت جریان گاز ورودی به سامانه، روتامتری با بازه شدت جریان (۵-۱۰۰) لیتر بر دقیقه به کار گرفته شده است. ورودی هوا از پایین و به وسیله توزیع کننده‌ای با قطر ۷۶ میلی‌متر و تعداد ۶ سوراخ به قطر ۱ میلی‌متر صورت می‌گیرد که در شکل ۲ نشان داده شده است. همزن به کار رفته در این سامانه شامل موتوری با مدل KSG و توان ۰/۱۸ کیلووات و قدرت ۵/۵ اسب بخار ساخت کشور چین می‌باشد. برای اندازه‌گیری دور همزن از یک دیمر ساخت شرکت کره‌ای LS که ولتاژ ورودی آن ۲۲۰ ولت با ۵/۵ آمپر بوده و خروجی آن از (۲۲۰-۰) ولت

با استفاده از روش بر غیرزش خطی محاسبه شد. تأثیر سایر پارامترهای عملیاتی مانند دور همزن، شرایط عملیاتی، سرعت ظاهری گاز و نوع توزیع کننده بر ماندگی گاز در ستون‌های حبابی همزن دار مورد بررسی قرار گرفت.

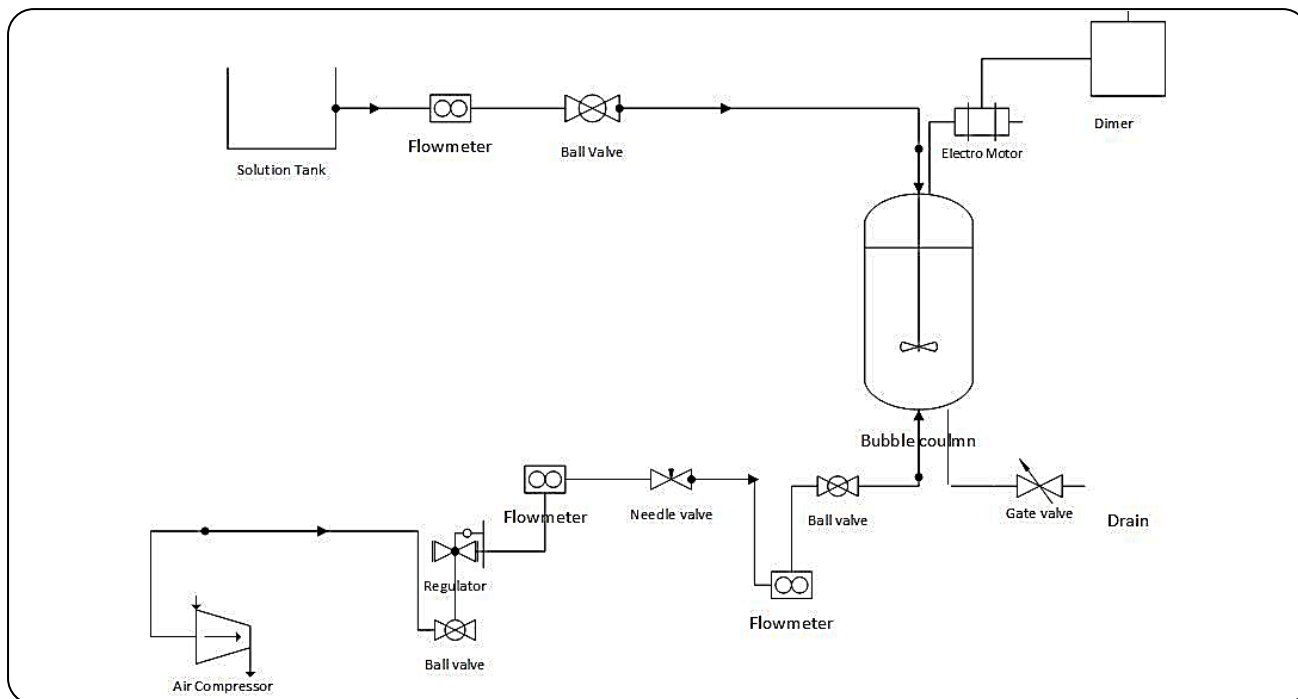
پارامترهای مؤثر بر ماندگی گاز

عامل‌های مؤثر بر ماندگی گاز شامل مشخصه‌های شیمی فیزیکی فازهای گاز و مایع، شرایط عملیاتی و پارامترهای هندسی تماس دهنده می‌باشد. از عامل‌های مؤثر بر ماندگی فاز گاز می‌توان کشش سطحی مایع (σ_l)، گرانروی مایع و گاز (μ_l, μ_g)، دانسیته مایع و گاز (ρ_l, ρ_g)، سرعت ظاهری گاز (v_g)، قطر راکتور ستون حبابی (D_c)، قطر روزنه توزیع کننده (D_d)، ارتفاع مایع (H_l) و دور همزن (N) نام برد. همان‌گونه که مشخص است ۱۰ عامل مؤثر بر ماندگی فاز گاز مشخص شده و برای به دست آوردن یک رابطه مشخص بین این عامل‌های از قضیه باکینگهام استفاده می‌شود. این عامل‌ها در معادله (۱) آمده است.

$$\varepsilon_g = f(\sigma_l, \mu_l, \mu_g, \rho_l, \rho_g, v_g, D_c, D_d, H_l, N) \quad (1)$$

در این روش در یک مسئله فیزیکی شامل n کمیت که دارای m بعد اصیل هستند، کمیت‌ها را می‌توان به صورت n-m پارامتر بی‌بعد مستقل، مرتب کرد. دیمانسیون و واحد عامل‌های تأثیرگذار بر ماندگی فاز گاز در جدول (۴) به تفصیل بیان شده است. پس از تعیین دیمانسیون از بین m کمیت عدد آن‌ها انتخاب شده که دیمانسیون آن‌ها متفاوت باشد و شامل n بعد اصلی باشند. از این کمیت‌ها به عنوان متغیرهای تکراری استفاده می‌شود. آنگاه هر Π را به صورت حاصل ضرب متغیرهای تکراری و یکی دیگر از کمیت‌ها نوشته شده و به آن‌ها نمادهای گوناگون داده می‌شود. تعداد اعداد بی‌بعدی که در آزمایش به دست می‌آید از فرمول m-n محاسبه می‌شود. به این ترتیب ۱۰ کمیت (m) با سه بعد اصلی (n) در نتیجه تعداد عددهای بی‌بعد برابر ۷ می‌شود. در این آزمایش از چگالی گاز، سرعت ظاهری گاز و قطر ستون به عنوان متغیرهای تکراری استفاده شده است. ارتفاع مایع به عنوان اولین کمیت استفاده شده است. رابطه‌ای که برای ماندگی فاز گاز بر اساس پارامترهای بدون بعد جدول شماره (۴) آمد به صورت معادله (۲) می‌باشد:

$$\varepsilon_g = k \left(\frac{H_l}{D_c} \right)^a \left(\frac{\rho_g V_g D_c}{\mu_g} \right)^b \left(\frac{\rho_g V_g^2 D_c}{\sigma_l} \right)^c \left(\frac{\rho_g V_g D_c}{\mu_l} \right)^d \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^e \left(\frac{D_d}{D_c} \right)^f \left(\frac{D_c N}{V_g} \right)^g \quad (2)$$



شکل ۱. شماتیک پایلوت راکتور ستون حبابی



(ب)



(الف)

شکل ۴. الف) شکل بالا رفتن حباب در ستون بدون حرکت همزن
ب) شکل بالا رفتن حباب در دورهای بالای همزن

دلیل اصلی طراحی این نوع پره همزن، کاهش گردابه‌های ناشی از حرکت همزن، شکست حباب‌های خروجی از اسپارجر و همچنین جلوگیری از بالارفتن حباب‌ها دور محور همزن می‌باشد که منجر به ایجاد یک کانال هوا تنها در اطراف همزن می‌شود. که این موضوع در شکل ۴ آورده شده است.



شکل ۲. توزیع کننده فاز گاز در راکتور حبابی



شکل ۳. پره همزن مورد استفاده در آزمایش‌ها

می‌تواند متغیر باشد و میزان جریان خروجی آن برابر با $2/5$ آمپر بوده، استفاده شده است. محور همزن از یک میله استیل با ارتفاع 58 سانتی‌متر و قطر 1 سانتی‌متر تشکیل شده است. پره همزن دیسکی با قطر 85 میلی‌متر بوده و شامل روزنه‌های بسیار بیضی‌شکل بوده که در شکل ۳ نشان داده شده است.

جدول ۵. خواص فیزیکی مواد مورد استفاده در آزمایش

نام ماده	دانسیته (kg/m ³)	گرانروی (Pa.s)	کشش سطحی (N/m)
آب	۹۹۸/۲۱	۰/۰۰۱۰۰	۰/۰۷۲۰
گازوئیل	۸۳۲/۰۰	۰/۰۰۶۰۰	۰/۰۲۷۳
روغن موتور بهران	۸۷۷/۰۲	۰/۰۱۳۵۹	۰/۰۳۰۹

مواد مورد استفاده

برای آزمایش‌های تجربی از سه ماده آب، گازوئیل و روغن موتور بهران (به علت تفاوت در ویژگی‌های فیزیکی این مواد) به عنوان مایع درون ستون و از هوا به عنوان فاز گاز ورودی به سامانه استفاده شده است. این مواد با توجه به ویژگی‌های فیزیکی آن‌ها (دانسیته، کشش سطحی و گرانروی) مورد استفاده قرار گرفتند که محاسبه ویژگی‌های این مواد به کمک دستگاه‌های آزمایشگاهی به ترتیب پیکنومتر، تانسیموتر و ویسکومتر بروکفیلد انجام شد که در جدول (۵) ارایه شده است.

روش‌های بسیاری برای اندازه‌گیری تجربی ماندگی فاز گاز وجود دارد. به عنوان نمونه می‌توان از روش پردازش تصویر و روش اندازه‌گیری تغییرهای ارتفاع مایع نام برد. در این پژوهش برای به‌دست‌آوردن مقدار ماندگی گاز از روش اندازه‌گیری تغییرهای ارتفاع سطح مایع استفاده شده است. در این روش نخست مایع مورد نظر را درون ستون ریخته و ارتفاع مایع محاسبه شده، پس از یادداشت ارتفاع اولیه مایع، کمپرسور را روشن و با تنظیم فشار سامانه از طریق شیر فشارشکن و شدت‌جریان گاز از طریق روتامتر نصب شده روی دستگاه، گاز به درون ستون حبایی تزریق شد. پس از تزریق گاز و یکنواخت شدن سامانه میزان تغییر ارتفاع سطح مایع تعیین می‌شود. پس از اندازه‌گیری ماندگی گاز در حالت بدون همزن، دور همزن از طریق دیمر تعبیه شده، روی دور مورد نظر تنظیم شده و در دوره‌های متفاوت میزان تغییر ارتفاع مایع محاسبه می‌شود. برای محاسبه تغییر ارتفاع مایع از معادله (۳) استفاده شده است.

$$\varepsilon_g = \frac{H - H_0}{H} = \frac{\Delta H}{H} \quad (3)$$

در فرمول شماره (۳)، H_0 ارتفاع اولیه مایع قبل از تزریق گاز، H ارتفاع مایع پس از تزریق گاز و ε_g ماندگی فاز می‌باشد. همان‌گونه که از فرمول بالا مشخص است ε_g یک عدد بی‌بعد می‌باشد.

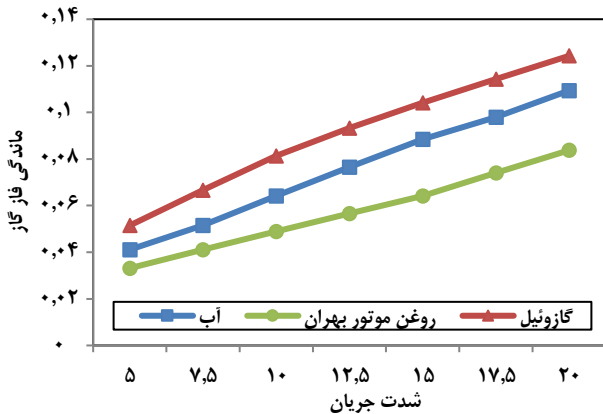
نتیجه‌ها و بحث

در این پژوهش عامل‌های مؤثر بر ماندگی گاز شامل شدت‌جریان گاز، دور همزن و نوع مایع به طور تجربی بررسی شده است. همچنین

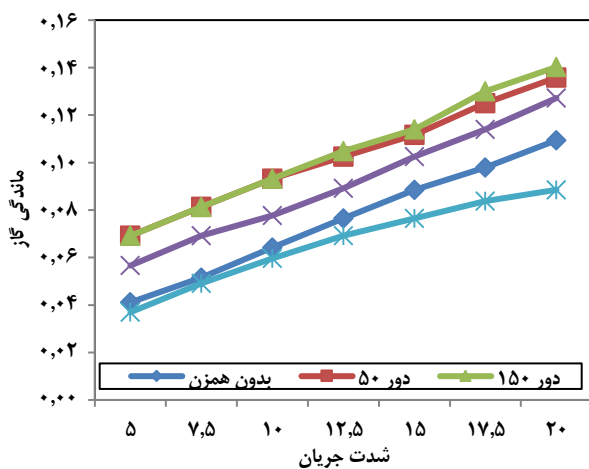
برای اندازه‌گیری تغییرهای دما و ارتفاع مایع درون راکتور به ترتیب از یک ترمومتر جیوه‌ای و یک نوار پلاستیکی مدرج با مقیاس ۱ میلی‌متر استفاده شد.

چگونگی انجام آزمایش‌ها

برای بررسی تأثیر همزن بر ماندگی فاز گاز در راکتور ستون حبایی گاز - مایع، همه آزمایش‌ها یکبار در شرایط بدون همزن، و سپس در همان شرایط و در حضور همزن انجام شدند. برای اندازه‌گیری ماندگی هوا در هر ماده، نخست با هفت شدت‌جریان گوناگون (۵ تا ۲۰ لیتر بر دقیقه) آزمایش انجام شده، سپس همین آزمایش برای ۴ دور گوناگون همزن انجام شد. در مجموع همه آزمایش‌ها در ۱۰۵ حالت گوناگون انجام شد. پس از پایان آزمایش‌های تجربی داده‌های تجربی با هم مقایسه شدند تا تأثیر عوامل گوناگون بر ماندگی فاز گاز را به‌دست‌آید. برای انجام آزمایش نخست راکتور شسته شده و پس از خشک‌کردن، با مایع مورد نظر پر شد. برای آغاز آزمایش، از آب به عنوان اولین سیال استفاده شد. به این منظور، ۳۵ سانتی‌متر از ستون با آب پر شد. برای هوادهی به سامانه، کمپرسور را روشن شده و پس از بازکردن شیر خروجی هوا، فشار گاز با شیر فشارشکن روی ۱ بار تنظیم شد. میزان شدت‌جریان هوای ورودی به سامانه با روتامتری که در مسیر هوای خروجی از کمپرسور قرار دارد تنظیم می‌شود. در آغاز این مقدار ۵ لیتر بر دقیقه بوده و پس از تزریق هوا، میزان تغییرهای سطح مایع ثبت شد. به همین صورت شدت‌جریان گاز ورودی هر بار به میزان ۲/۵ لیتر بر دقیقه تا رسیدن به شدت‌جریان ۲۰ لیتر بر دقیقه برای هر سیال افزایش داده شد. پس از اندازه‌گیری ماندگی فاز گاز در شرایط بدون همزن، در مرحله دوم، همزن را درون راکتور نصب و با دیمر تعبیه‌شده در مسیر جریان برق ورودی به موتور همزن، دور آن تنظیم شد. برای انجام آزمایش‌ها از چهار دور از دور ۵۰ تا ۴۰۰ دور بر دقیقه استفاده شد. چگونگی انجام آزمایش با همزن، همانند آزمایش در شرایط بدون همزن بوده، با این تفاوت که نخست موتور همزن روی دور مورد نظر تنظیم شده و سپس با تزریق گاز در دبی‌های گوناگون، میزان تغییر ارتفاع مایع تعیین می‌شود. در این پژوهش دما برابر ۲۰ درجه سلسیوس بوده و فشار درون راکتور فشار جو می‌باشد. از دیگر شرایط عملیاتی انجام آزمایش به صورت پیوسته و یا ناپیوسته می‌باشد، که در این آزمایش فاز مایع ناپیوسته و فاز گاز به صورت پیوسته به سامانه تزریق می‌شود. برای بررسی تأثیر همزن در ماندگی فاز گاز، آزمایش‌ها در دو حالت با همزن و بدون همزن انجام شده و آزمایش‌های همزن‌دار در چهار دور متفاوت انجام شد.



شکل ۵. تغییر ماندگی فاز گاز بر حسب شدت جریان گاز در سامانه بدون همزن



شکل ۶. تغییر ماندگی گاز بر حسب شدت جریان در سامانه آب - هوا

تأثیر دور همزن بر ماندگی فاز گاز

برای بررسی تأثیر همزن در راکتورهای ستون حبابی در چهار دور همزن، آزمایش‌های انجام شده در شرایط بدون همزن دوباره تکرار شد. پس از انجام آزمایش‌ها نمودار تغییر ماندگی گاز بر حسب تغییر شدت جریان برای هر یک از مواد به صورت جداگانه رسم و تحلیل شدند.

سامانه آب - هوا

نمودار تغییرات ماندگی گاز بر حسب تغییرات دبی برای سامانه آب و هوا در شکل ۶ قابل دیدن است. هر یک از این خط‌های تغییر شدت جریان بر حسب ماندگی گاز در دوره‌های گوناگون همزن را نمایش می‌دهد. همان گونه که در شکل ۶ دیده می‌شود می‌توان تأثیر مثبت همزن در ماندگی گاز در دوره‌های ۵۰ و ۱۵۰ دور بر دقیقه را دید ولی در دوره‌های بالاتر همزن، می‌توان کاهش ماندگی را به صورت محسوس دید.

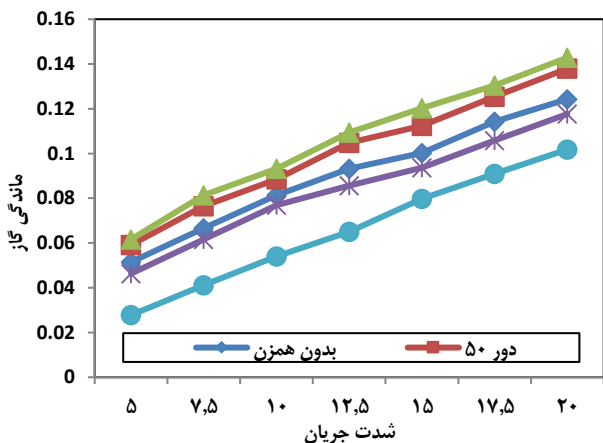
با استفاده از روش بدون بعد باکینگهام یک مدل براساس پارامترهای سامانه‌ها ارائه شد. در ادامه تأثیر تک تک پارامترها بر ماندگی فاز گاز ارائه شده است.

نتیجه‌های ماندگی گاز بدون حضور همزن

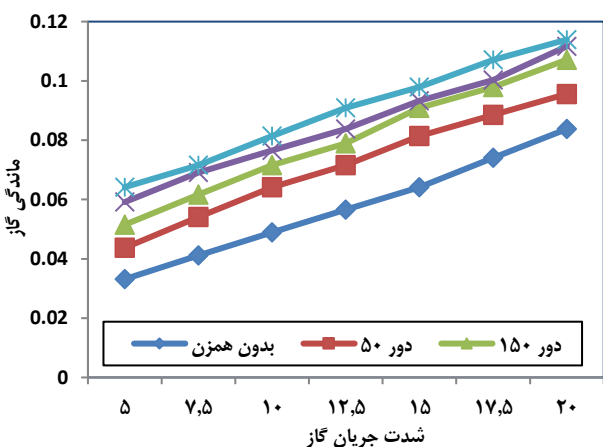
برای بررسی ماندگی فاز گاز در راکتور ستون حبابی بدون همزن دارای مواد مورد آزمایش، در ۷ شدت جریان گوناگون و در دما و فشار ثابت مقدار ماندگی به صورت تجربی به دست آمد. پس از محاسبه مقدار تجربی ماندگی نمودار تغییرهای ماندگی بر حسب تغییرهای شدت جریان گاز مطابق شکل ۵ ارائه شده است.

همان گونه که در شکل ۵ دیده می‌شود، ماندگی گاز در شدت جریان‌های گوناگون برای سه ماده آب، گازوئیل و روغن موتور بهران متفاوت می‌باشد. ماندگی گاز در گازوئیل بیش‌تر از آب و در آب بیش‌تر از روغن می‌باشد. این اختلاف در ماندگی گاز به عامل‌های گوناگونی مانند کشش سطحی، گرانشی و دانسیته مایع و گاز وابسته است. ولی از آنجاکه ویژگی‌های گاز در این آزمایش‌ها ثابت می‌باشد می‌توان نتیجه گرفت تغییرهای ماندگی گاز وابسته به ویژگی‌های مایع می‌باشد. با دانستن مقدار ویژگی‌های مواد مانند کشش سطحی، گرانشی و دانسیته می‌توان به تأثیر آن‌ها بر ماندگی گاز پی‌برد. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که با افزایش گرانشی مواد، ماندگی گاز کم می‌شود، دلیل اصلی این موضوع افزایش میزان چسبندگی بین حباب‌ها و ایجاد حباب‌های بزرگ‌تر است. در اثر افزایش قطر حباب، سرعت بالارفتن حباب افزایش یافته و در نتیجه ماندگی گاز در ستون کم می‌شود. با کاهش کشش سطحی در مایعات اندازه حباب کوچک‌تر و در نتیجه سرعت صعود حباب در ستون کم و این عامل سبب افزایش ماندگی گاز در راکتور ستون حبابی می‌شود.

همچنین دلیل اصلی بیش‌تر شدن ماندگی گاز در گازوئیل نسبت به آب (با توجه به اینکه گرانشی گازوئیل از آب بیش‌تر می‌باشد) مقدار کشش سطحی کم‌تر گازوئیل نسبت به آب است. چون انتظار می‌رفت با توجه به بیش‌تر بودن گرانشی گازوئیل نسبت به آب ماندگی گاز در گازوئیل نسبت به آب کم‌تر شود ولی نتیجه به دست آمده عکس این موضوع را ثابت کرد که یکی از دلیل‌های اصلی این موضوع، تفاوت در کشش سطحی این دو ماده می‌باشد، ولی در روغن موتور بهران با این که مقدار کشش سطحی روغن نزدیک به کشش سطحی گازوئیل است، به دلیل گرانشی بالای این ماده و به دلیل‌های ذکر شده در بالا، میزان ماندگی گاز به طور محسوس کم‌تر از گازوئیل می‌باشد.



شکل ۷. تغییر ماندگی گاز بر حسب شدت جریان در سامانه گازوئیل - هوا



شکل ۸. تغییر ماندگی گاز بر حسب تغییر شدت جریان در سامانه روغن موتور - هوا

دلیل دیگری که سبب افزایش ماندگی گاز در دوره‌های بالا می‌شود نوع طراحی همزن موجود در ستون می‌باشد، با توجه به این که همزن به صورت دیسکی و متخلخل می‌باشد خود همزن نقش یک توزیع کننده را ایفا می‌کند که این موضوع سبب می‌شود با افزایش دور همزن حباب‌های موجود در ستون ریزتر شده و در نتیجه ماندگی گاز افزایش یابد. همچنین باید به این موضوع اشاره کرد که در مایع‌های گرانبه هرچه اندازه حباب کوچک‌تر باشد، سرعت صعود حباب کم‌تر می‌شود.

مدل‌سازی ریاضی

بر اساس داده‌های تجربی به دست آمده، عددهای بی بعد مربوط به داده‌های تجربی که پیش‌تر ذکر شد محاسبه شدند. مدل ارائه شده در معادله شماره (۲) برای سه سامانه به کار رفته در این پژوهش با داده‌های تجربی به دست آمده برازش شدند و ثابت‌های مدل

زمانی که دور همزن ۲۵۰ و ۴۰۰ دور بر دقیقه می‌باشد، ماندگی گاز از حالت بدون همزن بیش‌تر و یا برابر آن است، ولی به دلیل ایجاد گردابه در این حالت، هوای موجود در ستون دور محور همزن چرخیده و با کانالیزه شدن مسیر هوای موجود در ستون سرعت صعود هوا در ستون افزایش می‌یابد و در نتیجه ماندگی گاز نسبت به دوره‌های ۵۰ و ۱۵۰ دور بر دقیقه کاهش می‌یابد. همان گونه که دیده می‌شود با افزایش دور همزن ماندگی گاز کاهش می‌یابد. در نتیجه می‌توان گفت در دوره‌های پایین همزن تأثیر مثبتی بر ماندگی فاز گاز دارد و در دوره‌های بالای ۲۵۰ دور بر دقیقه تأثیر همزن بر ماندگی گاز منفی می‌باشد.

سامانه گازوئیل - هوا

نمودار تغییر ماندگی گاز بر حسب تغییر شدت جریان برای سامانه گازوئیل و هوا در شکل ۷ قابل دیدن می‌باشد هر یک از این خط‌های تغییر شدت جریان بر حسب ماندگی گاز در دوره‌های گوناگون همزن را نمایش می‌دهد. همان گونه که در شکل ۷ دیده شده ماندگی گاز در دوره‌های ۵۰ و ۱۵۰ دور بر دقیقه افزایش می‌یابد و از حالت بدون همزن بیش‌تر می‌باشد، ولی ماندگی گاز در دوره‌های بالاتر همزن کم‌تر از ماندگی در حالت بدون همزن می‌باشد. دلیل اصلی کاهش ماندگی گاز در دوره‌های بالای همزن، ایجاد گردابه در سیال می‌باشد که این گردابه همانند سامانه آب - هوا سبب ایجاد کانال هوا دور محور همزن می‌شود و سرعت صعود حباب در سامانه زیاد می‌شود که خود موجب کاهش ماندگی گاز در سامانه می‌شود. در نتیجه در سامانه گازوئیل - هوا بهترین حالت برای افزایش ماندگی گاز با همزن، استفاده همزن در دوره‌های پایین می‌باشد.

سامانه روغن موتور بهران - هوا

تغییر ماندگی گاز بر حسب تغییر شدت جریان برای سامانه روغن و هوا در شکل ۸ قابل نشان داده شده است. هر یک از این خط‌ها تغییر شدت جریان بر حسب ماندگی گاز در دوره‌های گوناگون همزن را نمایش می‌دهد. همان گونه که در شکل ۸ می‌بینید، در سامانه روغن و هوا بر خلاف دو ماده پیشین یعنی گازوئیل و آب با افزایش دور همزن میزان ماندگی گاز افزایش می‌یابد. با توجه به این که گرانبه‌ی روغن نسبت به دو ماده دیگر بیش‌تر است و با توجه به نوع مخلوط‌کن موجود در راکتور، گردابه کم‌تری نسبت به دو حالت پیشین در این حالت به وجود می‌آید که یکی از دلیل‌های افزایش ماندگی گاز در دوره‌های بالا می‌باشد.

جدول ۶. ثابت‌های مدل‌های ماندگی فاز گاز برای سامانه‌های استفاده شده

سامانه	k	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇	R ²
آب - هوا	۰/۰۱۷۹	۰/۱۲۳۲	۰/۰۹۸۳	۰/۰۸۹۹	۰/۳۰۴۱	۰/۱۰۰۹	۰/۱۲۷۷	۰/۰۰۱۹	۰/۸۴۵
گازوئیل - هوا	۰/۰۱۳۳	۱/۱۴۴۶	۰/۰۹۵۷	۰/۰۱۱۸	۰/۷۱۵۶	۰/۰۶۷۵	۰/۰۵۶۸	۰/۰۰۰۳	۰/۸۷۹
روغن - هوا	۰/۰۱۳۴	۱/۰۴۹۳	۰/۰۸۲۵	۰/۰۱۵۴	۰/۴۷۵۴	۰/۰۶۹۰	۰/۰۵۸۸	۰/۰۰۳۵	۰/۹۵۲

$$\varepsilon_g = k \left(\frac{H_l}{D_c} \right)^{a_1} \left(\frac{\rho_g V_g D_c}{\mu_g} \right)^{a_2} \left(\frac{\rho_g V_g^2 D_c}{\sigma_l} \right)^{a_3} \left(\frac{\rho_g V_g D_c}{\mu_l} \right)^{a_4} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{a_5} \left(\frac{D_d}{D_c} \right)^{a_6} \left(\frac{D_c N}{V_g} \right)^{a_7}$$

جدول ۷. مقدار ضریب تعیین و درصد خطا

نوع ماده	ضریب تعیین (R ²) بر حسب درصد	درصد خطا
آب	۸۴/۵۱	۱۵/۴۹
گازوئیل	۸۷/۸۶	۱۲/۱۴
روغن موتور بهران	۹۵/۱۵	۴/۸۵

بهرتر بوده و می‌توان با دقت بالا اندازه‌های حساب‌ها را مشخص کرد و سرانجام ماندگی فاز گاز با دقت بالا محاسبه می‌شود. علت دیگر خطا مربوط به هم اندازه بودن حساب‌ها می‌باشد. در سامانه آب - هوا حساب‌ها با اندازه‌های گوناگون تولید می‌شود و در نتیجه برای محاسبه ماندگی از توزیع اندازه‌های حساب‌ها استفاده می‌شود. در حالی که در سامانه‌هایی که گرانروی بیش‌تر می‌باشد اندازه‌های حساب‌ها به هم نزدیک بوده و باعث می‌شود ماندگی با دقت بالا محاسبه شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش ماندگی فاز گاز در ستون حیابی برای سامانه‌های گوناگون به صورت تجربی بررسی شد. ماندگی گاز در دو حالت بدون همزن و با همزن مورد مطالعه قرار گرفت. برای انجام آزمایش‌ها از سه سامانه آب - هوا، آب - گازوئیل و روغن - هوا برای بررسی میزان ماندگی فاز گاز استفاده شد. همچنین با بررسی اثر همزن بر ماندگی فاز گاز نتیجه‌ها نشان داد که همزن باعث افزایش ماندگی فاز گاز در هر سه سامانه شده است. با استفاده از نظریه پای باگینگهام یک مدل کلی براساس پارامترهای عملیاتی برای ماندگی گاز ارائه شد. در مدل ارائه شده برای هر سه سامانه، اثر پارامترهای عملیاتی شامل دور همزن، مشخصات شیمیایی سیال، اثر هندسه و شدت جریان فازها بر ماندگی فاز گاز در نظر گرفته شده است. نتیجه‌های مدل ارائه شده نشان داد که مدل ارائه شده تطابق خوبی با داده‌های تجربی دارد.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱۵ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۲۳

هر سه سامانه محاسبه شدند. برای ارزیابی نتیجه‌های برازش از ضریب همبستگی استفاده شده است. در این پژوهش برای به‌دست آوردن ثابت‌های مدل از روش برازش غیرخطی ندلر مید استفاده شده است. این الگوریتم به طور گسترده در بهینه‌سازی به‌ویژه در شیمی و مهندسی شیمی استفاده می‌شود [۳۴].

با برازش داده‌های تجربی برای سه سامانه مورد استفاده نتیجه‌های برازش در جدول ۶ ارائه شده است. نتیجه‌های ضریب همبستگی نشان می‌دهد که مدل ارائه شده برای سامانه روغن - آب نسبت به دو سامانه دیگر تطابق خوبی با داده‌های تجربی دارد.

ماده سومی که تغییرماندگی گاز در آن مورد بررسی قرار گرفت روغن موتور بهران می‌باشد. دلیل اصلی انتخاب این ماده گرانروی بالای این ماده می‌باشد، همچنین مقدار کشش سطحی آن به تقریب نزدیک به کشش سطحی گازوئیل می‌باشد. با بررسی تغییر ماندگی در این ماده می‌توان به تأثیر گرانروی بالا بر ماندگی گاز پی برد و همچنین می‌توان به نقش همزن در تغییرات مقدار ماندگی گاز در مایع‌های گرانروی پی برد که در بخش پیشین به طور کامل در مورد این موضوع بحث و بررسی صورت گرفت. پس از به دست آوردن معادله‌ها و ضریب‌های آن‌ها با برازش داده‌های آزمایشگاهی مقدار ضریب تعیین برای هر ماده و میزان خطای هر معادله از حالت ایده‌آل به دست آمد. نتیجه‌های درصد خطا و ضریب تعیین در جدول ۷ ارائه شده است.

نتیجه‌های ستون دوم جدول شماره ۷ مربوط به ضریب همبستگی نشان می‌دهد که مدل ارائه شده برای سامانه آب - هوا خطای بیش‌تری نسبت به سامانه‌های گازوئیل - هوا و روغن - هوا دارد. علت این مسئله این است که در سامانه آب - هوا گرانروی آب پائین بوده و حرکت همزن باعث ایجاد گردابه در وسط محور ستون حیابی می‌شود و سرانجام باعث کانالیزه شدن ستون می‌شود. بنابراین اندازه‌گیری اندازه‌های حساب‌ها سخت شده و در نهایت باعث ایجاد خطا در محاسبه اندازه‌های حساب‌ها می‌شود. با افزایش گرانروی سامانه کنترل ستون حیابی

مراجع

- [1] Pashaei H., Ghaemi A., Nasiri M., [Modeling and Experimental Study on the Solubility and Mass Transfer of CO₂ into Aqueous DEA Solution Using a Stirrer Bubble Column](#), *RSC advances*, **109**: 108075-108092 (2016)
- [2] Chen H., Liu J., Pei Y., Zhao P., Hussain M., [Study on the Synergistic Effect of UV/Fenton Oxidation and Mass Transfer Enhancement with Addition of Activated Carbon in the Bubble Column Reactor](#), *Chem. Eng. J.*, **336**: 82-91 (2018).
- [3] Pashaei H., Ghaemi A., Nasiri M., [Experimental Study and Modeling of CO₂ Absorption into Diethanolamine Solutions Using Stirrer Bubble Column](#), *Chem. Eng. Res. Design*, **121**: 32-43 (2017).
- [4] Pino L.Z., Estévez L. A., Yépez M.M., Sáez A.E., Solari, R.B., [Effect of Operating Condition on Gas Holdup in Slurry Bubble Columns with a Foaming Liquid](#), *Chem. Eng. Commun.*, **117**: 367-382 (1992).
- [5] Hernandez-Alvarado F., Kleinbart S., Kalaga D.V., Banerjee, Kawaji M., [Comparison of Void Fraction Measurements Using Different Techniques in Two-Phase Flow Bubble Column Reactors](#), *Int. J. Multiphase Flow*, **102**: 119-129 (2018),
- [6] Krishna R., Swart J., Ellenberger J., Martina G.B., Maretto C., [Gas Holdup in Slurry Bubble Columns: Effect of Column Diameter and Slurry Concentrations](#), *AIChE J.*, **43**: 311-316 (1997).
- [7] Deckwer W.D., Schumpe A., [Improved Tools for Bubble Column Reactor Design and Scale Up](#), *Chem. Eng. Sci.*, **48**: 889-911 (1993).
- [8] Kantarcia N., Kutlu F.B., Ulgen O., [Bubble Column Reactors](#), *Process Biochem.*, **40**: 2263-2283 (2005).
- [9] Pashaei H, Ghaemi A, Nasiri M, [Experimental Investigation of CO₂ Removal Using Piperazine Solution in a Stirrer Bubble Column](#), *Int. J. Greenhouse Gas Control*, **63**: 226-240 (2017).
- [10] Pashaei H, Ghaemi A, Nasiri M, Heydarifard M., [Experimental Investigation of the Effect of Nano Heavy Metal Oxide Particles in Piperazine Solution on CO₂ Absorption Using a Stirrer Bubble Column](#), *Energy & Fuels* **32(2)**: 2037-2052 (2018).
- [11] Gemello L., Plais C., Augier F., Cloupet A., Marchisio D.L., [Hydrodynamics and Bubble Size in Bubble Columns: Effects of Contaminants and Spargers](#), *Chem. Eng. Sci.*, **184**: 93-102 (2018).
- [12] Heydarifard M, Pashaei H, Ghaemi A, Nasiri M., [Reactive Absorption of CO₂ into Piperazine Aqueous Solution in a Stirrer Bubble Column: Modeling and Experimental](#), *Int. J. Greenhouse Gas Control*, **79**: 91-116 (2018).
- [13] Nedeltchev S. Schubert M., [Determination of the Entropy Radial Minimum and the Various Transition Velocities in an Air-Water Bubble Column](#), *Chem. Eng. Sci.*, **170**: 234-240 (2017).

- [14] Pashaei H, Ghaemi A., [CO₂ Absorption Into Aqueous Diethanolamine Solution with Nano Heavy Metal Oxide Particles Using Stirrer Bubble Column: Hydrodynamics and Mass Transfer](#), *J. Environ. Chem. Eng.*, **8(5)**: 104110 (2020)
- [15] Thorat B.N., Joshi J.B., [Regime Transition in Bubble Columns: Experimental and Predictions](#), *Exp. Thermal Fluid Sci.*, **28**: 423-430 (2004).
- [16] Schumpe A., Grund G., [The Gas Disengagement Technique for Studying Gas Holdup Structure in Bubble Columns](#), *Canadian J. Chem. Eng.*, **64**: 891-896 (1986).
- [17] Matsuura A., Fan L.S., [Distribution of Bubble Properties in a Gas- Liquid/Solid Fluidized Bed](#), *AIChE J.*, **30**: 894-903 (1984).
- [18] Hills J.H., [The Operation of a Bubble Column at High Throughputs I. Gas Holdup Measurements](#), *Chem. Eng. J.*, **12**: 89-99 (1976).
- [19] Miller D.N., [Gas Holdup and Pressure Drop in Bubble Column Reactors](#), *Ind. Eng. Chem. Process Design Develop.*, **19**: 371-377 (1980).
- [20] Krishna R., Wilkinson P.M., Van L.L. [A Model for Gas Holdup in Bubble Columns Incorporating the Influence of Gas Density on Flow Regime Transitions](#), *Chem. Eng. Sci.*, **46**: 2491-2496 (1991).
- [21] Krishna R., Swart W.A., Hennephof D.E., Ellenberger J., Hoefsloot H.C.J., [Influence of Increased Gas Density on Hydrodynamics of Bubble Column Reactors](#), *AIChE J.*, **40**: 112-119 (1994).
- [22] Li H., Prakash A., [Influence of Slurry Concentrations on Bubble Population and Their Rise Velocities in a Three-Phase Slurry Bubble Column](#), *Powder Technol.*, **113**: 158-167 (2000).
- [23] Schafer R., Merten C., Eigenberger G., [Bubble Size Distributions in a Bubble Column Reactor Under Industrial Conditions](#), *Exp. Thermal Fluid Sci.*, **26**: 595-604 (2002).
- [24] Moo-Young M., Blanch H.W., [Design of Biochemical Reactors Mass Transfer Criteria for Simple and Complex Systems](#), *Design Biochem Reactors*, **19**: 1-69 (1981).
- [25] Bukur D.B., Daly G., [Gas hold-up in Bubble Columns for Fischer-Tropsch Synthesis](#), *Chem. Eng. Sci.*, **42**: 2967-2969 (1987).
- [26] Miler D.N., [Scale-Up of Agitated Vessels Gas-Liquid Mass Transfer](#), *AIChE J.*, **20**: 445-453 (1974).
- [27] Leibson I., Holcolm E.G., Cacosso A. G., Jacmic J.J., [Rate of Flow and Mechanics of Bubble Formation from Single Submeruae d Orifices](#), *AIChE J.*, **2**: 296-300 (1956).
- [28] Kumar R., Kuloor N.K., [The Formation of Bubbles and Drops](#), *Adv. Chem. Eng.*, **8**: 255-368 (1970).
- [29] Bhavaraju S.M., Mashelkar R. A., Blanch H.W., [Bubble Motion and Mass Transfer in Non-Newtonian Fluids](#), *AIChE J.*, **24**: 1063-1070 (1978).
- [30] Li H., Prakash A., [Heat Transfer and Hydrodynamics in a Three-Phase Slurry Bubble Column](#), *Ind. Eng. Chem. Res.*, **36**: 4688-4694 (1997).

- [31] Luo X., Lee D.J., Lau R., Yang G., Fan L.S., [Maximum Stable Bubble Size and Gas Holdup in High-Pressure Slurry Bubble Columns](#). *AIChE J.*, **45**: 665-680 (1999).
- [32] Akita K., Yoshida F., [Bubble Size, Interfacial Area, and Liquid-Phase Mass Transfer Coefficient in Bubble Columns](#), *Ind. Eng. Chem. Process Design Dev.*, **13**: 84-91 (1974).
- [33] Veera U. P., Kataria K.L., Joshi J.B., [Effect of Superficial Gas Velocity on Gas hold-Up Profiles in Foaming Liquids in Bubble Column Reactors](#), *Chem. Eng. J.*, **99**: 53-58 (2004).
- [34] Lagarias J.C., Reeds J.A., Wright M.H., Wright P.E., [Convergence Properties of the Nelder–Mead Simplex Method in Low Dimensions](#), *SIAM J. Optim.*, **9**: 112-147 (1998).