

بررسی سرعت بحرانی همزن در سلول فلوتاسیون مکانیکی آزمایشگاهی

حسنا دارابی، سید محمد جواد کلینی*⁺

گروه فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

بهرام رضایی

دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

محمود عبداللهی

گروه فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده: یکی از مرحله‌های مهم فلوتاسیون جمع‌آوری ذره‌ها است که نیازمند برهم‌کنش موفق حباب-ذره است. پیش از ایجاد برهم‌کنش حباب-ذره، معلق‌نگه داشتن ذره‌ها به عنوان مرحله پیش‌آماده سازی برای شناورسازی و جمع‌آوری ذره‌ها ضروری است. به طور معمول سرعت بحرانی همزن (N_{js}) به عنوان معیاری برای معلق‌نگه داشتن ذره‌های جامد در سلول فلوتاسیون مورد استفاده قرار می‌گیرد که نشان‌دهنده کم‌ترین سرعت همزن مورد نیاز برای معلق‌نگه داشتن تمام ذره‌های جامد در کف سلول است. در این پژوهش دو مدل تجربی برای N_{js} براساس اختلاف چگالی جامد-مایع ($\rho_s - \rho_l$)، اندازه ذره‌ها (d_p)، غلظت جامد در پالپ (X)، گرانروی جنبشی مایع (ν_L) و سرعت ظاهری هوا (J_g) در محیط دو فاز و سه فاز توسعه داده شده است. آزمایش‌ها در یک سلول فلوتاسیون آزمایشگاهی، با استفاده از ذره‌های کوارتز، باریت و گالن در چهار طبقه سرنجی انجام شده است. نتیجه‌ها نشان داد که N_{js} به ترتیب مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار بر سرعت بحرانی همزن هستند. سرعت بحرانی همزن با افزایش J_g در سلول فلوتاسیون، به صورت خطی افزایش می‌یابد. بررسی نمودار غلظت جامد بر حسب عمق سلول فلوتاسیون در سرعت‌های گوناگون همزن نشان داد که در سرعت بحرانی همزن، ارتفاع سوسپانسیون حدود $0.8-0.85$ ارتفاع پالپ است و ذره‌ها در سرعت همزنی معادل 1.2 تا 1.5 برابر سرعت بحرانی همزن توزیع یکنواخت‌تری دارند. از این بازه می‌توان به منظور پیش‌بینی سرعت بهینه همزن که منجر به افزایش کارایی شناورسازی ذره‌ها شود، استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: فلوتاسیون مکانیکی آزمایشگاهی؛ سوسپانسیون جامدها؛ سرعت بحرانی همزن؛ سرعت بهینه همزن.

KEYWORDS: Laboratory mechanical flotation; Solids suspension; Critical impeller speed; Optimum impeller speed.

+E-mail: koleini@modares.ac.ir

*عهدہ دار مکاتبات

مقدمه

فلوتاسیون یکی از فرایندهای بسیار مهم در جدایش مواد معدنی با ارزش از گانگ است. یکی از مرحله‌های مهم فلوتاسیون جمع‌آوری ذره‌ها است که نیازمند برهم کنش موفق حباب - ذره است. پیش از ایجاد برهم‌کنش حباب - ذره، دینامیک ذره‌ها و حباب‌ها دارای اهمیت است. همزن‌ها با حرکت دورانی خود و تولید گردابه‌های تلاطم^(۱) موجب توزیع فضایی ذره‌های جامد و حباب‌های هوا در پالپ شده و امکان برخورد بین ذره و حباب و اتصال آن‌ها را فراهم می‌سازند.

معلق نگه‌داشتن جامدها (سوسپانسیون جامدها) به‌عنوان مرحله پیش آماده‌سازی برای شناورسازی و جمع‌آوری ذره‌ها ضروری است. به‌طور معمول سوسپانسیون ذره‌ها در اثر همپوشانی دو مرحله اتفاق می‌افتد: مرحله اول معلق شدن ذره‌ها در کف سلول و مرحله دوم توزیع یا پراکندگی ذره‌ها در سراسر سلول است. روش‌های مورد استفاده در بررسی سوسپانسیون جامدها شامل بررسی شرایط معلق شدن ذره‌ها در کف سلول (به‌عنوان نمونه، بررسی سرعت بحرانی همزن^(۲)) یا شرایط توزیع ذره‌ها (به‌عنوان نمونه، بررسی ارتفاع سوسپانسیون^(۳)) است [۱]. سوسپانسیون جامدها در سلول‌های فلوتاسیون مکانیکی با بررسی ارتفاع سوسپانسیون، نمودارهای غلظت، سرعت بحرانی همزن و توزیع زمان ماند ذره‌ها انجام شده است [۴ - ۱]. اگرچه توزیع زمان ماند ذره‌ها، معیار غیرمستقیمی از سوسپانسیون جامدها است. پژوهشگران ثابت کرده‌اند که سرعت بحرانی همزن معیار مستقیمی از معلق شدن ذره‌های جامد در کف سلول است و می‌تواند معیار مناسبی برای توصیف شرایط توزیع ذره‌های جامد نیز باشد [۳]. سرعت بحرانی همزن (N_{js})، کم‌ترین سرعت همزن مورد نیاز برای معلق نگه داشتن تمام ذره‌های جامد در ته سلول است (سرعتی که در آن ذره‌ها بیش‌تر از ۲-۱ ثانیه در کف سلول ساکن نباشند) و نشان دهنده شرایط فقط معلق شدن^(۴) است [۳]. در شرایط فقط معلق شدن (N_{js}) به‌ازای کم‌ترین انرژی ورودی، تمام ذره‌ها در حرکت و در تماس با فاز مایع هستند. این شرایط شرایط بهینه انتقال جرم بین ذره‌ها و فاز مایع است [۵]. در سرعت‌های کم‌تر از N_{js} ، تمام ذره‌ها معلق نشده و در معرض حباب‌ها قرار نمی‌گیرند. اما زمانی که ذره‌ها به‌طور کامل معلق شوند

احتمال برخورد و در نتیجه اتصال آن‌ها به حباب‌های هوا افزایش می‌یابد. بنابراین تعیین N_{js} به‌عنوان کم‌ترین سرعت لازم برای معلق نگه داشتن ذره‌ها در سلول‌های فلوتاسیون ضروری است. توزیع ذره‌ها در سلول فلوتاسیون از موازنه بین حرکت تصادفی سیال و تأثیر نیروی گرانش روی ذره‌ها نتیجه می‌شود. ته‌نشینی یک ذره به وسیله اندازه ذره (d_p)، اختلاف چگالی جامد-مایع ($\rho_s - \rho_l$) و ویسکوزیته جنبشی مایع (ν_L) تحت تأثیر قرار می‌گیرد. ذره‌های درشت‌تر برای معلق شدن به تلاطم بیشتر و در نتیجه سرعت همزن بیشتری نیاز دارند [۶]. غلظت جامدها (X) در ته نشینی ذره‌ها در یک سوسپانسیون اثرگذار است. عملکرد همزن به‌طور معمول به‌صورت سرعت همزن یا توان مصرفی آن در نظر گرفته می‌شود که در مقابل مکانیسم ته‌نشینی عمل کرده و سبب معلق نگه داشتن ذره‌ها در سلول فلوتاسیون مکانیکی می‌شود. متغیرهای d_p ، $\rho_s - \rho_l$ ، ν_L و X از مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار بر سرعت بحرانی همزن هستند [۷ - ۳].

یکی از اولین، گسترده‌ترین و مؤثرترین مطالعه‌های روی معلق نگه داشتن ذره‌های جامد در مخازن استوانه‌ای همزن‌دار (بدون استاتور) به وسیله زویترینگ^(۵) (۱۹۵۸ میلادی) انجام شده است. او از سرعت بحرانی همزن به‌عنوان معیاری برای شرایط معلق شدن ذره‌های جامد در کف یک مخزن استوانه‌ای استفاده کرد و معادله‌ی (۱) را برای تعیین سرعت بحرانی همزن در مخزن دارای ذره‌های جامد و مایع (محیط دو فاز) ارائه نمود [۷]:

$$N_{jsu} = S \cdot d_p^{2.0} \cdot B^{1.3} \cdot \nu_L^{1.0} \cdot g^{0.45} \left(\frac{\rho_s - \rho_L}{\rho_L} \right)^{0.45} \cdot D^{-0.85} \quad (1)$$

سپس این معادله توسط سایر پژوهشگران برای مخازن همزن‌دار در شرایط سه‌فازی جامد - مایع - گاز توسعه داده شد. آن‌ها بیان کردند که افزودن گاز سبب افزایش سرعت بحرانی همزن به‌صورت خطی می‌شود [۸، ۹]:

$$N_{jsg} = N_{jsu} + a \cdot Q_{GV} \quad (2)$$

که در آن $Q_{GV} = J_g / Z$ است. پس از مدل زویترینگ، مدل‌های بسیاری برای سرعت بحرانی همزن در مخازن همزن‌دار با کف مسطح یا انحنا دار و استوانه‌ای شکل بدون استاتور ارائه شده است [۸، ۴ - ۱۵]. با وجود این، تاکنون مطالعه‌های اندکی در زمینه

(۱) Turbulent eddies

(۲) The critical impeller speed

(۳) The suspension height

(۴) Just suspended condition

(۵) Zwietering

همزن‌های بزرگ ($D \geq T/2$) در مقایسه با همزن‌های کوچک ($D < T/3$) سبب پایداری بیش‌تر عملیات می‌شوند و به ویژه در شرایط سه فاز و با حضور حباب‌های هوا کارایی بیش‌تری در توزیع فضایی ذره‌های جامد و حباب‌های هوا دارند [۱۳، ۱۶]. در تمام آزمایش‌ها از یک همزن روشتون با قطر ۰/۰۹ متر و دارای ۸ تیغه همراه با یک استاتور با قطر ۰/۱۲ متر و دارای ۱۲ تیغه استفاده شد. هنگامی که فاصله همزن از کف سلول کمتر از ۱۵٪ قطر سلول و بیشتر از ۱۰٪ آن ($0.1T < C < 0.15T$) باشد، الگوی جریان محوری به شکل عدد ۸ لاتین (۸) دوتایی ایجاد می‌شود [۱۷]. این الگوی جریان با اعمال تنش برشی توسط همزن به سیال تولید می‌شود و توانایی بیشتری برای توزیع فضایی ذره‌ها و حباب‌های هوا دارد [۱۸]. بنابراین فاصله همزن از کف سلول برابر با ۰/۰۲ متر در نظر گرفته شد. برای تعیین نقش اندازه ذره‌ها و درصد جامد وزنی پالپ بر N_{js} از نمونه کوارتز خالص تهیه شده از شرکت تکنوسیلیس استفاده شده است. به منظور بررسی اثر چگالی ذره‌ها بر N_{js} ، از باریت خالص تهیه شده از معدن درین کاشان و گالن خالص تهیه شده از معدن تپه سرخ اصفهان استفاده شد تا به این طریق بازه‌ی وسیعی از چگالی ذره‌ها مورد بررسی قرار گیرد. برای آنالیز نمونه‌های مورد مطالعه از روش XRF استفاده شد. با توجه به محدودیت‌های این روش در اندازه‌گیری عنصرهای سبک، برای اندازه‌گیری سیلیسیم از روش ICP و گوگرد از دستگاه LECO استفاده شد. سرب با استفاده از روش تیتراسیون نیز اندازه‌گیری شد. نتیجه‌های آنالیز نمونه‌های کوارتز، باریت و گالن در جدول ۱ ارائه شده است. شایان ذکر است در جدول ۱ مقدار SiO_2 با استفاده از مقدار Si به دست آمده به روش ICP محاسبه شده است. نتیجه‌های آنالیز این نمونه‌ها نشان می‌دهد که نمونه‌ها از درجه خلوص بالایی برخوردار هستند.

پس از خردایش نمونه‌ها توسط آسیای گلوله‌ای آزمایشگاهی و آنالیز سرندي، چهار طبقه سرندي ۲۱۲+۳۰۰- میکرون (معرف ذره‌های درشت)، ۱۵۰+۲۱۲- میکرون و ۱۰۶+۱۵۰- میکرون (معرف ذره‌های متوسط و دانه بندی رایج در فلوتاسیون مواد معدنی گوناگون)، ۷۵+۱۰۶- میکرون (معرف ذره‌های ریز) برای انجام آزمایش‌ها انتخاب شد. در این پژوهش از MIBC (کف ساز در آزمایش‌های کوارتز) و روغن کاج (کف‌ساز در آزمایش‌های باریت و گالن) با درجه خلوص آزمایشگاهی (شرکت مرک)،

معلق شدن ذره‌های جامد و سرعت بحرانی همزن در سلول‌های مکانیکی فلوتاسیون دارای روتور - استاتور انجام شده است. وان دروستوزن^(۱) و دگلون^(۲) (۲۰۰۸ میلادی) برای اولین بار رابطه‌ای تجربی از نوع رابطه زیوترینگ برای پیش‌بینی سرعت بحرانی همزن در سلول فلوتاسیون نیمه صنعتی مدل بیتمن^(۳) ارائه کرده‌اند. آن‌ها بیان کردند که افزودن هوا سبب افزایش سرعت بحرانی همزن به صورت خطی خواهد شد [۹]:

$$N_{jsg} = 52 \cdot (d_p)^{0.33} \cdot X^{0.17} \cdot \left(\frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l} \right)^{0.7} \cdot \left(\frac{v_l}{v_w} \right)^{0.5} + 204 Q_{GV} \quad (3)$$

در این معادله تمام عبارت‌ها به جز d_p بی بعد هستند. در سلول فلوتاسیون مکانیکی، ذره‌ها توسط حرکت چرخشی گردابه‌ها و تنش برشی ایجاد شده توسط همزن در سلول توزیع می‌شوند. حضور استاتور در سلول‌های فلوتاسیون، سبب افزایش تلاطم محلی در اطراف همزن و کوچک شدن ناحیه چرخش گردابه‌ها و پایداری فصل مشترک کف- پالپ می‌شود. در نتیجه با توجه به اختلاف هندسه و کارکرد سلول فلوتاسیون، نمی‌توان از روابط ارائه شده برای مخازن همزن دار برای بررسی شرایط معلق شدن ذره‌ها در سلول‌های فلوتاسیون مکانیکی استفاده کرد و این موضوع نیاز به مطالعه‌های بیش‌تری دارد. در این مقاله به بررسی سرعت بحرانی همزن در یک سلول فلوتاسیون آزمایشگاهی مدل دنور با سلول مربعی پرداخته می‌شود. نخست اثر متغیرهای d_p ، $\rho_s - \rho_l$ ، v_l و X بر سرعت بحرانی همزن بررسی می‌شود سپس دو مدل تجربی برای پیش‌بینی سرعت بحرانی همزن در سلول فلوتاسیون مکانیکی در مقیاس آزمایشگاهی در محیط دوفازی و سه‌فازی ارائه داده می‌شود. در ادامه به منظور تعیین سرعت لازم برای توزیع کامل ذره‌های جامد و تعیین ارتفاع سوسپانسیون، نمودار غلظت جامد بر حسب عمق سلول فلوتاسیون در سرعت‌های گوناگون همزن (به صورت درصدی از N_{js})، بررسی می‌شود.

بخش تجربی

برای انجام آزمایش‌ها از یک سلول فلوتاسیون آزمایشگاهی مدل دنور از جنس پلکسی گلاس شفاف ۱۰/۵ لیتری دارای سطح مقطع مربعی با طول ۰/۲۰ متر استفاده شد. با توجه به این‌که

(۱) Van der Westhuizen

(۴) Bateman

(۲) Deglon

جدول ۱- آنالیز نمونه‌های مورد مطالعه.

کوارتز	گالن	باریت	روش آنالیز	واحد	ترکیب
۴۵/۴۲۰	۰/۰۵۱	۳/۴۳۷	ICP	%	Si
۹۷/۱۷۳	۰/۱۱۰	۷/۳۵۴	محاسباتی	%	SiO ₂
۰/۷۸۲	۰/۱۵۴	۰/۵۲۴	XRF	%	Al ₂ O ₃
۰/۲۷۳	۰/۱۳۵	۰/۶۴۸	XRF	%	Fe ₂ O ₃
۰/۵۱۷	۰/۰۹۳	۰/۴۳۷	XRF	%	CaO
۰/۴۹۷	-	۰/۴۲۴	XRF	%	Na ₂ O
۰/۲۹۲	-	-	XRF	%	K ₂ O
۰/۱۳۳	۰/۱۰۱	۰/۰۹۶	XRF	%	MgO
۰/۰۳۱	-	-	XRF	%	P ₂ O ₅
۰/۰۱۲	۲۶/۰۱۲	۳۳/۰۲۱	LECO	%	SO ₂
۰/۲۹	۰/۱۴۴	۰/۹۸۷	XRF	%	L.O.I
-	۰/۱۴۹	۵۴/۹۲۸	XRF	%	Ba
-	۰/۱۷۹	۰/۳۰۲	XRF	%	Zn
-	۰/۱۹۱	۱/۰۰۹	XRF	%	Sr
-	۷۲/۵۸۳	۰/۲۶۹	تیتراسیون	%	Pb
-	۰/۱۲۱	-	XRF	%	Zr

تغییر داده شد و کف سلول با استفاده از یک دوربین متصل به کامپیوتر به طور همزمان دیده شد. سرعت همزنی که در آن ذره‌ها بیش‌تر از ۲-۱ ثانیه در کف سلول ساکن نمانند به عنوان سرعت بحرانی همزن ثبت شد. شایان ذکر است که هر آزمایش سه بار تکرار شد و میانگین سرعت به دست آمده برای هر آزمایش ثبت شد.

همان‌گونه که بیان شد مهم‌ترین متغیرهای تاثیرگذار بر سرعت بحرانی همزن d_p ، $\rho_s - \rho_l$ ، v_L و X هستند. بنابراین در این پژوهش معادله تجربی زیر برای محاسبه سرعت بحرانی همزن براساس این متغیرها ارائه شد و تمام عبارتهای این مدل بی بعد شدند:

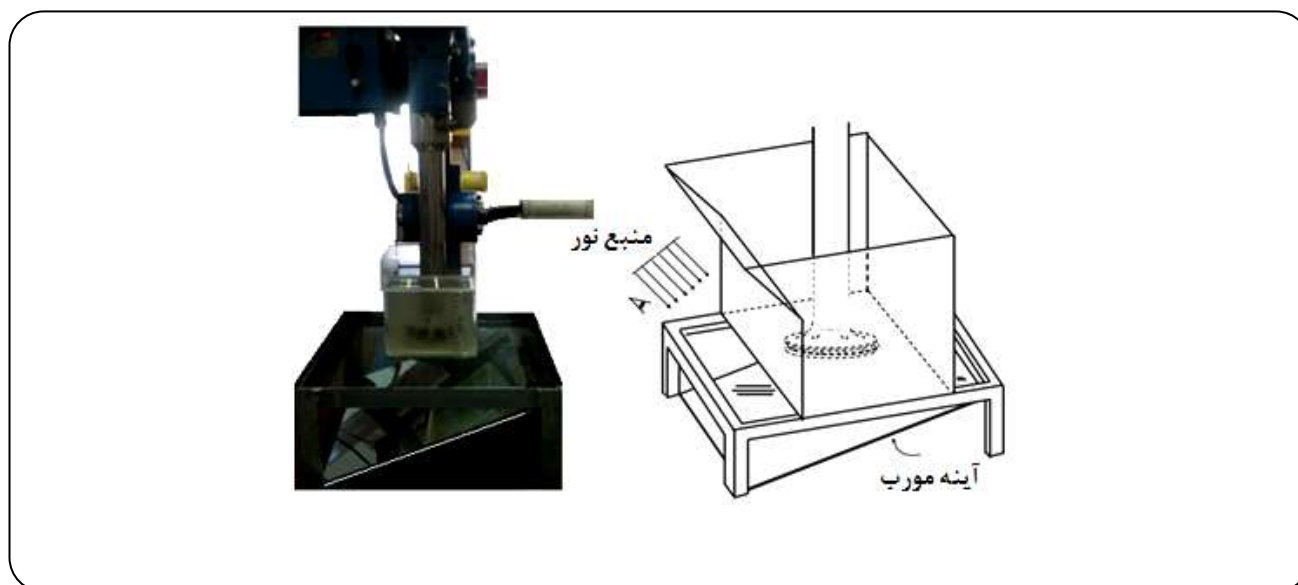
$$N_{jsg} = K \cdot \left(\frac{d_p}{D}\right)^a \cdot X^b \cdot \left(\frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l}\right)^c \cdot \left(\frac{v_L}{v_w}\right)^d + a Q_{GV} \quad (4)$$

(۱) Brookfield

به میزان ۳۰ ppm استفاده شده است. به منظور تغییر گرانروی جنبشی آب مصرفی در آزمایش‌ها و بررسی اثر این متغیر بر N_{js} ، از ساکارز (شرکت قطران شیمی) با درصدهای جرمی ۳۳٪ و ۴۰٪ استفاده شده است. گرانروی جنبشی آب توسط دستگاه ویسکوزمتر بروکفیلد^(۱) مدل NDJ-4 آزمایشگاه پلیمر دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه تربیت مدرس اندازه‌گیری شد. برای طراحی آزمایش‌ها، روش فاکتوریل کامل با تعداد سطوح گوناگون به کار گرفته شد. متغیرها و سطوح آنها برای هر یک از سه ماده معدنی در جدول ۲ ارائه شده است. تعداد ۲۰۸ آزمایش (مجموع آزمایش‌های انجام شده برای هر سه ماده معدنی) انجام شد. در این آزمایش‌ها، در شرایط معین هر آزمایش، N_{js} با دیدن انتهای سلول با استفاده از یک دوربین فیلمبرداری با قابلیت زوم بالا و با به کار بردن یک آینه مورب و یک لامپ روشنائی تعیین شد (شکل ۱). به این منظور سرعت همزن به تدریج از ۳۰۰ تا ۲۰۰۰ دور بر دقیقه

جدول ۲- متغیرها و سطوح آنها برای هر یک از نمونه‌ها در آزمایش‌های تعیین سرعت بحرانی همزن.

سرعت ظاهری هوا [cm/s]	شدت جریان هوا [L/min]	گرانروی جنبشی $\nu_f [m^2/s] (\times 10^{-6})$	محتوای جامد وزنی [%]	اندازه ذرات [میکرون]	چگالی [kg/m ³]	ماده معدنی
۰	۰	۱	۵	-۳۰۰+۲۱۲	۲۶۵۰	کوارتز
۰٫۰۵	۰٫۵	۳٫۰۶	۱۰	-۲۱۲+۱۵۰		
۰٫۱	۱	۵٫۱۶	۱۵	-۱۵۰+۱۰۶		
۰٫۲	۲			-۱۰۶+۷۴		
۰	۰	۱	۵	-۳۰۰+۲۱۲	۴۳۷۰	باریت
۰٫۰۵	۰٫۵		۱۵	-۲۱۲+۱۵۰		
۰٫۱	۱			-۱۵۰+۱۰۶		
۰٫۲	۲			-۱۰۶+۷۴		
۰	۰	۱	۵	-۳۰۰+۲۱۲	۷۵۱۰	گالن
۰٫۰۵	۰٫۵		۱۵	-۲۱۲+۱۵۰		
۰٫۱	۱			-۱۵۰+۱۰۶		
۰٫۲	۲			-۱۰۶+۷۴		



شکل ۱- تجهیزهای اندازه‌گیری سرعت بحرانی همزن.

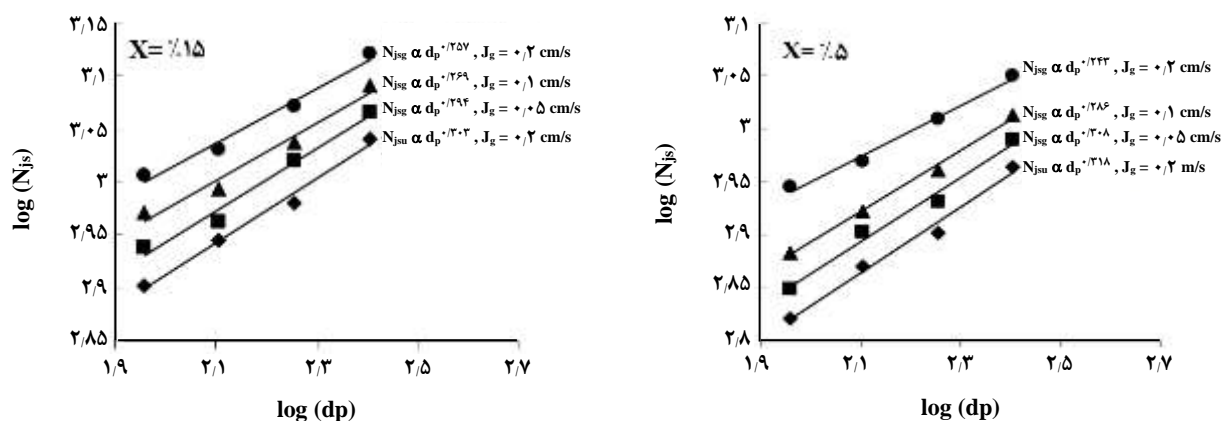
$$N_{jsg} = K \cdot \left(\frac{d_p}{D}\right)^a \cdot X^b \cdot \left(\frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l}\right)^c \cdot \left(\frac{v_l}{v_w}\right)^d \cdot (1 + K_G J_g) \quad (5)$$

که در این معادله K_G تابعی از هندسه سلول و همزن است. در این پژوهش توان‌های مدل‌های بالا به روش عددی و گرافیکی محاسبه شده است. برای بررسی اثر هر یک از این متغیرها

K ثابت معادله و تابعی از تمام متغیرهای هندسی سلول است (نوع همزن، $K=f(D/T, C/T)$) [۳].

نی‌نو^(۱) (۱۹۹۷) بیان کرد که مقدار ثابت a در معادله (۲) با N_{jsu} متناسب است و بیان N_{jsg} بر حسب J_g مناسب تر از بیان N_{jsg} بر حسب Q_{GV} است [۴]. بنابراین می‌توان معادله (۴) را به صورت زیر بازنویسی کرد:

(۱) Nienow



شکل ۲- اثر اندازه ذره‌ها بر سرعت بحرانی همزن در نرخ های هوادهی گوناگون (cm/s) برای ذره‌های کوارتز.

ذره‌ها در مقایسه با یافته‌های زیوتیرینگ برای مخازن همزن دار استوانه ای شکل، تاثیر بیشتری بر سرعت بحرانی همزن در سلول فلوتاسیون مکانیکی دارد. علت این امر، اختلاف در هندسه سلول فلوتاسیون مکانیکی مانند حضور استاتور در اطراف همزن در سلول فلوتاسیون می‌تواند باشد. زیرا استاتور سبب افزایش تلاطم محلی در اطراف همزن و کاهش اندازه ناحیه تلاطم می‌شود. از سویی وجود گوشه‌های سلول فلوتاسیون مربعی سبب ایجاد ناحیه مرده شده و در نتیجه برای سوسپانسیون ذره‌های درشت با سرعت ته نشینی زیاد نیاز به سرعت همزن بیشتری است. نتیجه مهمی که از این نمودارها می‌توان گرفت این است که با افزایش سرعت ظاهری هوا، اثر اندازه ذره‌ها بر سرعت بحرانی همزن کاهش می‌یابد. نقش جریان سیال در معلق نگه داشتن ذره‌های بزرگ‌تر با سرعت ته نشینی بیش‌تر مهم‌تر است.

اثر درصد جامد وزنی

غلظت سیال به دلیل اینکه بر سرعت ته نشینی ذره‌ها، کاهش تلاطم و گرانیوی سیال اثر گذار است، معلق شدن جامدها را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در واقع هنگامی که ذره‌های بیش‌تری در کف ظرف حضور دارد، انرژی بیشتری برای معلق کردن آنها مورد نیاز است. بنابراین با افزایش درصد جامد وزنی پالپ، سرعت بحرانی همزن افزایش می‌یابد (شکل ۳).

اثر چگالی نسبی ذره‌ها

نیروی محرکه اصلی در ته نشینی ذره‌ها، اختلاف چگالی است [۴]. بنابراین، می‌توان پیش بینی کرد که اختلاف چگالی جامد- مایع

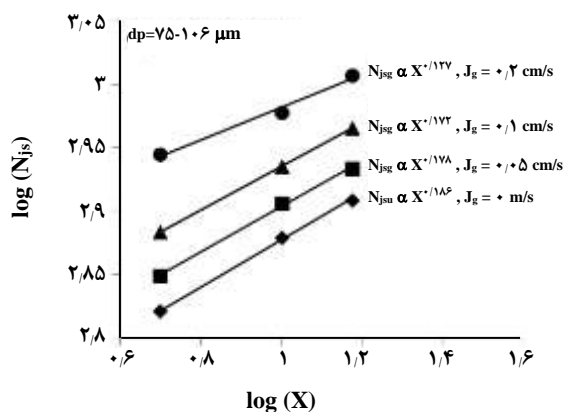
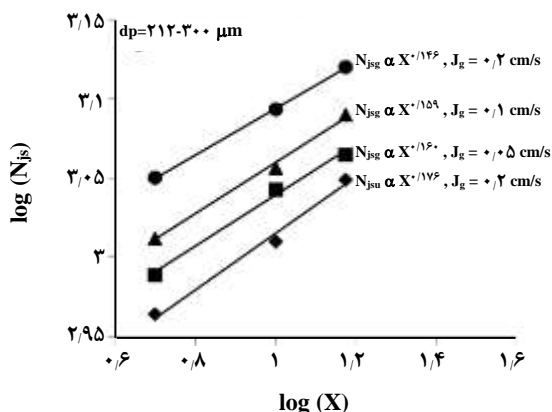
بر سرعت بحرانی همزن، ابتدا نمودار $\log(N_{js})$ بر حسب $\log(x)$ (x متغیر مورد بررسی است) رسم شده و توان هریک از این متغیرها که برابر با شیب خط برازش شده بر نمودار است، محاسبه شده است. در ادامه ثابت‌های مدل‌ها با استفاده از روش برازش خطی چندگانه در نرم افزار متلب به دست آمده است.

به کار بردن سرعت‌های همزن بسیار بالا سبب افزایش احتمال انفصال ذره‌ها از حباب‌ها و ناآرامی فصل مشترک کف- پالپ و در نتیجه ورود غیرانتخابی ذره‌ها به کف می‌شود. بنابراین، تعیین سرعت لازم برای توزیع کامل ذره‌های جامد، در تعیین حد بالای سرعت همزن می‌تواند مفید باشد. به منظور تعیین سرعت لازم برای توزیع کامل ذره‌های جامد، نمودار غلظت جامد بر حسب عمق سلول مورد بررسی قرار گرفت. پس از تنظیم سرعت همزن در مقدارهای ۵۰٪، ۸۰٪، ۱۰۰٪، ۱۲۰٪ و ۱۵۰٪ سرعت بحرانی همزن، از عمق‌های گوناگون سلول نمونه‌هایی با حجم معین تهیه شده و سپس غلظت هر نمونه تعیین شد. شایان ذکر است که قبل از هر نمونه‌گیری، نمونه قبلی به داخل سلول بازگردانده شده است. نمونه‌گیری‌ها از امتداد عمودی معینی در میان دیواره سلول و استاتور انجام شد.

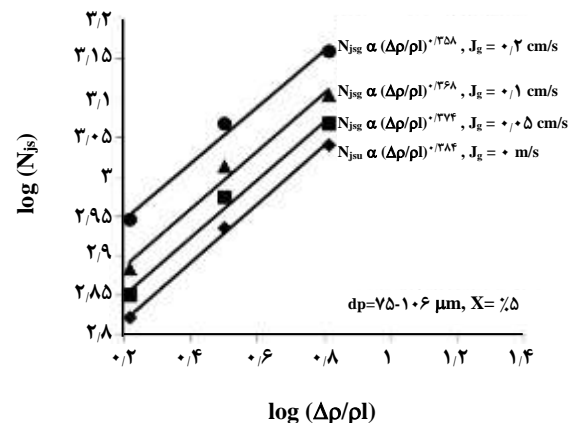
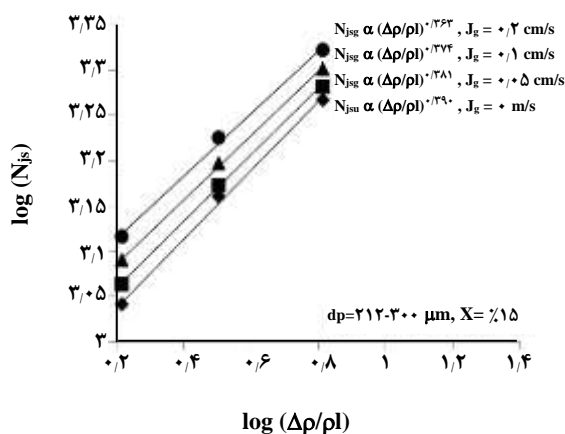
نتیجه‌ها و بحث

اثر اندازه ذره‌ها

در شکل ۲ نمودار $\log(N_{js})$ بر حسب $\log(dp)$ در نرخ‌های هوادهی گوناگون و برای درصد جامدهای وزنی ۵ درصد و ۱۵ درصد ارایه شده است. بررسی این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش اندازه ذره‌ها، سرعت بحرانی همزن افزایش می‌یابد. اندازه



شکل ۳- اثر درصد جامد وزنی بر سرعت بحرانی همزن در نرخ‌های هوادهی گوناگون (cm/s) برای ذره‌های کوارتز.



شکل ۴- اثر چگالی نسبی بر سرعت بحرانی همزن در نرخ‌های هوادهی گوناگون (cm/s).

در شکل ۵ نشان داده شده است. نتیجه‌های به دست آمده نشان می‌دهد که گرانروی مایع اثر بسیار کمی بر سرعت بحرانی همزن دارد که با نتیجه‌های به دست آمده توسط زویترینگ و سایر پژوهشگران مطابقت دارد [۵، ۷، ۹، ۱۴].

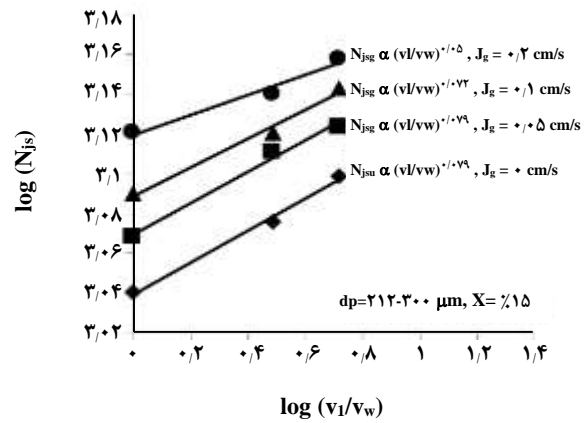
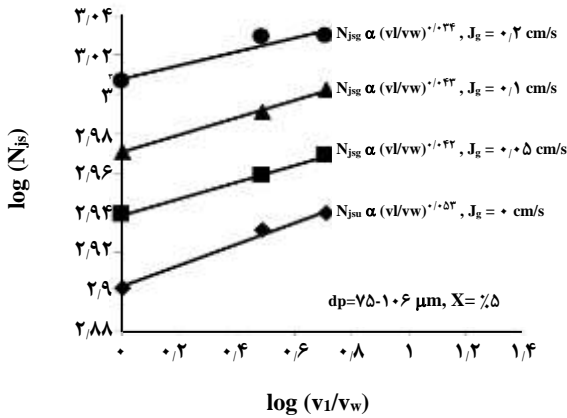
اثر سرعت ظاهری هوا

بررسی اثر سرعت ظاهری هوا بر مکانیسم‌های سوسپانسیون و ته نشینی ذره‌ها بسیار پیچیده و دشوار است. افزودن هوا تأثیر منفی بر معلق شدن جامدها دارد. در حقیقت ذره‌ها به وسیله چرخش سیال و تنش برشی ایجاد شده توسط همزن در سلول معلق می‌شوند. حضور هوا سبب کاهش دانسیته پالپ و تشکیل حفره‌های هوا در پشت تیغه‌های همزن می‌شود. در نتیجه سبب کاهش تنش برشی اعمال شده توسط همزن و چرخش سیال می‌شود.

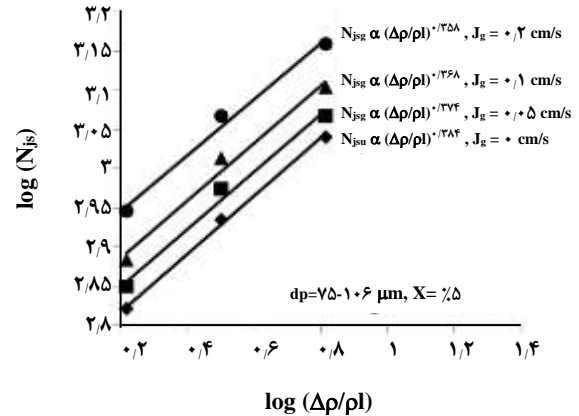
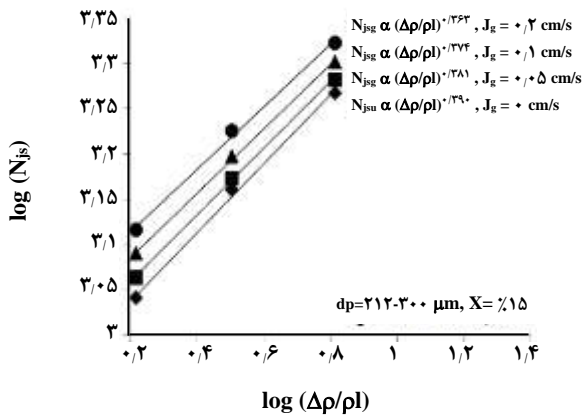
دارای تأثیر به نسبت زیادی بر سوسپانسیون جامدها باشد. نمودار اثر چگالی نسبی بر سرعت بحرانی همزن در شکل ۴ ارائه شده است. نتیجه‌های به دست آمده نشان می‌دهد که اختلاف چگالی جامد-مایع تأثیر زیادی بر سرعت بحرانی همزن دارد. با مقایسه دو نمودار می‌توان بیان کرد که چگالی نسبی ذره‌ها در معلق کردن ذره‌های چگال‌تر و بزرگ‌تر با سرعت ته نشینی بیشتر، دارای اهمیت بیش‌تری است.

اثر گرانروی جنبشی فاز مایع

گرانروی مایع به دلیل تأثیر آن بر ثابت درگ توسط عدد رینولدز ذره، نقش غیر مستقیمی در ته نشینی ذره‌ها دارد. از طریق کاهش تلاطم نیز می‌تواند بر مکانیسم سوسپانسیون تأثیر گذار باشد [۸، ۹]. اثر گرانروی مایع بر سرعت بحرانی همزن



شکل ۵ - اثر ویسکوزیته جنبشی سیال بر سرعت بحرانی همزن در نرخ‌های هوادهی گوناگون (cm/s).



شکل ۶ - بررسی اثر سرعت ظاهری هوا بر سرعت بحرانی همزن.

منحنی تغییرهای $\Delta N_{js}/N_{jsu}$ بر حسب J_g در شکل عرب رسم شده است. نتیجه‌های به دست آمده نشان می‌دهد که سرعت بحرانی همزن با افزایش سرعت ظاهری هوا در سلول فلوتاسیون نیز همانند مخزن‌های همزن دار، به صورت خطی افزایش می‌یابد. در اینجا $K_G=1.162\text{s/cm}$ به دست آمد.

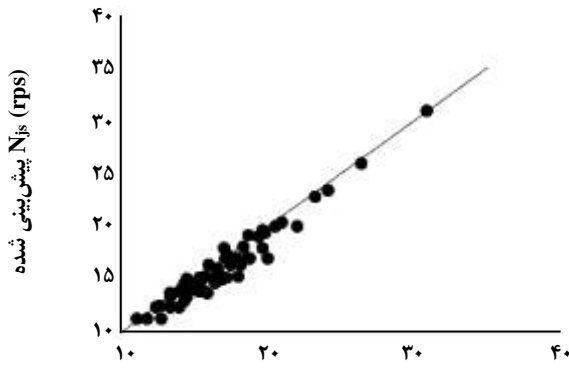
به نظر می‌رسد که سرعت ظاهری هوا افزون بر اثر مستقیم بر سرعت بحرانی همزن، به طور غیر مستقیم به وسیله تأثیر بر اثر سایر متغیرها، بر سرعت بحرانی همزن تأثیرگذار است. کاهش اثر سایر متغیرها بر سرعت بحرانی همزن در سرعت‌های ظاهری زیاد هوا، این موضوع را تأیید می‌کند (شکل‌های ۲ تا ۵).

برازش مدل

به منظور تعیین پارامترهای مدل‌های تجربی توسعه داده شده (رابطه‌های (۵) و (۶)) برای سرعت بحرانی همزن بر حسب اندازه ذره‌ها،

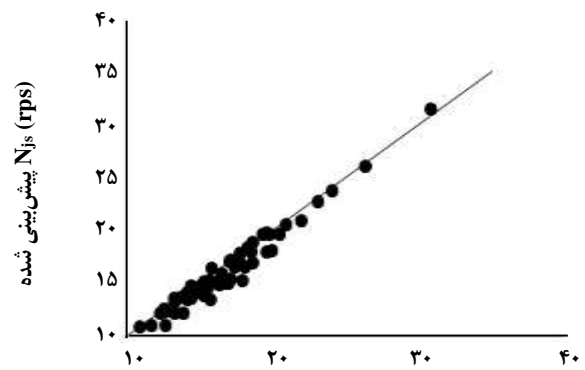
در نتیجه برای معلق کردن ذره‌ها در شرایط هوادهی باید توان ورودی با افزایش سرعت همزن افزایش یابد. هنگامی که سرعت ظاهری هوا و سرعت همزن هر دو کم هستند، کم‌ترین پراکنده سازی ذره‌ها و هوا دیده شد. در شرایطی که سرعت همزن کم و سرعت ظاهری هوا زیاد بود، هوا فقط در اطراف محور همزن پراکنده می‌شود و ذره‌ها در کف ظرف باقی ماندند. با افزایش سرعت همزن، پراکنده‌گی هوا افزایش یافته اما بسیاری از ذره‌ها تا زمانی که سرعت همزن به سرعت بحرانی آن نزدیک شد، همچنان در کف ظرف باقی ماندند. معادله (۲) رابطه عمومی برای بررسی اثر سرعت ظاهری هوا بر سرعت بحرانی همزن است. برای بررسی اثر سرعت ظاهری هوا بر سرعت بحرانی همزن، منحنی تغییرهای ΔN_{js} بر حسب Q_{GV} در شکل ۶ الف رسم شده است که در اینجا $a=188/56$ است. با استفاده از معادله (۵) می‌توان نوشت:

$$\frac{N_{jsg} - N_{jsu}}{N_{jsu}} = \frac{\Delta N_{js}}{N_{jsu}} = K_G \cdot J_g \quad (6)$$



شکل ۸- نمودار مقادیرهای پیش بینی شده توسط مدل (۸) بر حسب مقادیرهای اندازه گیری شده

شکل ۸ - نمودار مقادیرهای پیش بینی شده توسط مدل (۸) بر حسب مقادیرهای اندازه گیری شده.



شکل ۷- نمودار مقادیرهای پیش بینی شده توسط مدل (۷) بر حسب مقادیرهای اندازه گیری شده.

شکل ۷- نمودار مقادیرهای پیش بینی شده توسط مدل (۷) بر حسب مقادیرهای اندازه گیری شده.

در شکل های ۷ و ۸ نمودار مقادیرهای پیش بینی شده توسط مدل های (۷) و (۸) در مقابل مقادیرهای اندازه گیری شده سرعت بحرانی همزن رسم شده است که نشان دهنده مطابقت کامل این مدل ها بر مقادیرهای آزمایشگاهی است.

درصد جامد وزنی، چگالی نسبی، گرانروی جنبشی مایع و سرعت ظاهری هوا، این مدل ها بر داده های آزمایشگاهی برازش شد. شایان ذکر است توان های این مدل ها در سطح اعتماد ۹۵٪ محاسبه شده است:

با مقایسه این مدل ها با مدل های به دست آمده توسط زویترینگ و وان دروستوزن (۲۰۰۸) [۷، ۹] می توان بیان کرد که توان های به دست آمده برای درصد جامد وزنی و گرانروی جنبشی مایع برای هر سه مدل به هم نزدیک است و تأثیر چگالی نسبی بر سرعت بحرانی همزن در سلول فلوتاسیون مکانیکی آزمایشگاهی (۰/۳۹) و مخازن همزن دار (۰/۴۵) به هم نزدیک تر است اما با سلول فلوتاسیون نیمه صنعتی (۰/۷) اختلاف زیادی دارد. تأثیر اندازه ذره ها بر سرعت بحرانی همزن در سلول فلوتاسیون آزمایشگاهی ($N_{js} \propto dp^{0.29}$) همانند سلول فلوتاسیون نیمه صنعتی ($N_{js} \propto dp^{0.3}$) است اما با مخزن همزن دار تفاوت دارد. به نظر می رسد علت این تفاوت ها، اختلاف در هندسه سلول های فلوتاسیون و مخازن همزن دار و وجود استاتور در سلول فلوتاسیون مکانیکی است.

$$N_{jsg} = K \cdot \left(\frac{d_p}{D} \right)^{0.29 \pm 0.03} \cdot X^{0.18 \pm 0.03} \cdot \left(\frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l} \right)^{0.39 \pm 0.03} \cdot \left(\frac{v_l}{v_w} \right)^{0.4 \pm 0.03} + a Q_{GV} \quad (7)$$

[X] = %; [dp] = μm; [ρ] = kg/m3; [v] = m2/s; [Njsg] = rps; K = 56.71rps و a = 188.56

$$N_{jsg} = K \cdot \left(\frac{d_p}{D} \right)^{0.29 \pm 0.03} \cdot X^{0.18 \pm 0.03} \cdot \left(\frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l} \right)^{0.39 \pm 0.03} \cdot \left(\frac{v_l}{v_w} \right)^{0.4 \pm 0.03} \cdot (1 + K_G J_g) \quad (8)$$

[X] = %; [dp] = μm; [ρ] = kg/m3; [v] = m2/s; [Njsg] = rps; K=56.71rps; [Jg] = cm/s و KG=1.162s/cm

در مدل های فوق، با صفر قرار دادن سرعت ظاهری هوا ($J_g=0$)، معادله ی سرعت بحرانی همزن در محیط دوفازی به دست می آید.

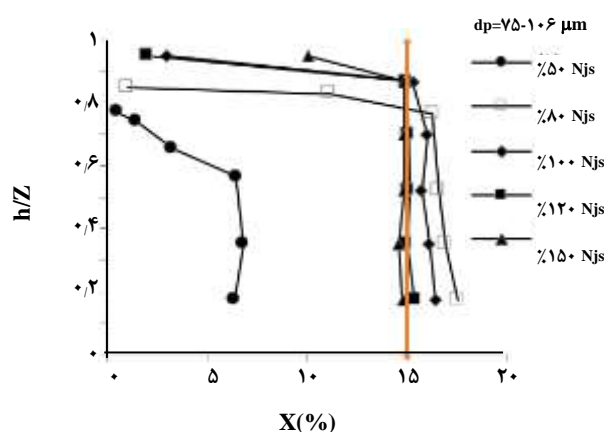
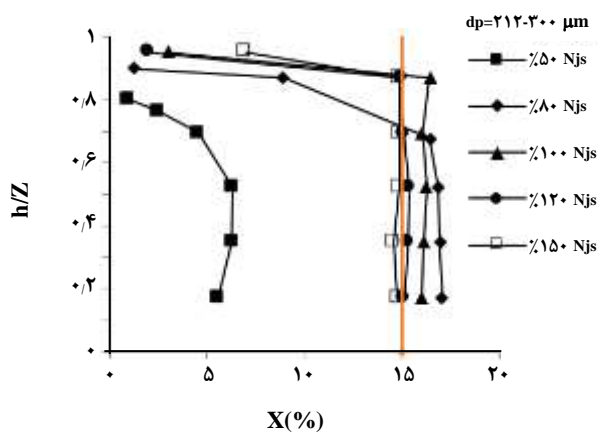
$$N_{jsu} = K \cdot \left(\frac{d_p}{D} \right)^{0.29 \pm 0.03} \cdot X^{0.18 \pm 0.03} \cdot \left(\frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l} \right)^{0.39 \pm 0.03} \cdot \left(\frac{v_l}{v_w} \right)^{0.4 \pm 0.03} \quad (9)$$

اعتبارسنجی مدل

به منظور اعتبارسنجی مدل ارایه شده، سه آزمایش در بازه ی متغیرها با استفاده از ذره های کوارتز انجام شد. نتیجه های به دست آمده از این آزمایش ها نشان دهنده درستی مدل های داده شده است (جدول ۳).

جدول ۳- نتیجه‌های آزمایش‌های اعتبارسنجی مدل ارائه شده.

شماره آزمایش‌ها			متغیرها	
۳	۲	۱		
۰٫۰۰۱۸	۰٫۰۰۲۵	۰٫۰۰۱۳	d_p/D	
۱۲	۸	۸	X	
۱٫۶۵	۱٫۶۵	۱٫۶۵	$\Delta p/\rho_1$	
۲٫۱۱	۴٫۱۶	۲٫۱۱	V_l/V_w	
۰٫۰۸	۰٫۰۸	۰٫۰۸	$J_g(\text{cm/s})$	
۱۹٫۳۳	۱۹٫۹۵	۱۶٫۵	آزمایش	$N_{js}(\text{rps})$
۱۹٫۱۲	۲۰٫۱۳	۱۶٫۳۴	مدل (۷)	
۱۹٫۴۶	۲۰٫۵۷	۱۶٫۴۳	مدل (۸)	



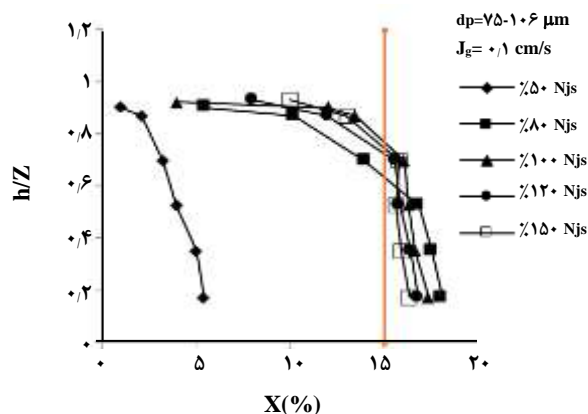
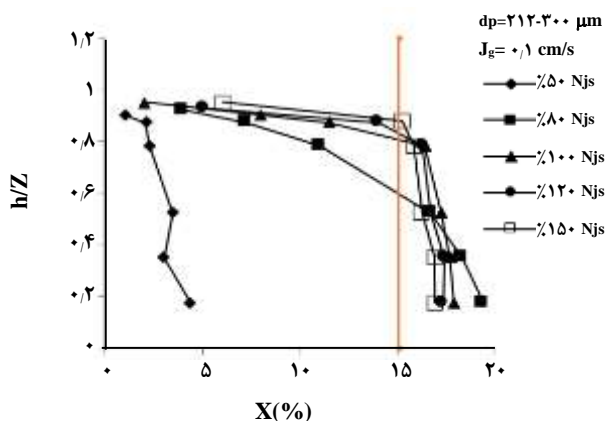
شکل ۹- منحنی تغییرهای درصد جامد وزنی در ارتفاع‌های نسبی سلول در محیط دوفازی (کوارتز - آب).

حدود $0.65Z$ است در حالی که برای ذره‌های $75+106$ میکرون، حدود $0.78Z$ است. مقایسه دو منحنی نشان می‌دهد که در تمام سرعت‌های همزن، غلظت ذره‌های درشت در ارتفاع‌های پایین سلول بیشتر از ذره‌های ریز است.

منحنی تغییرهای غلظت جامد در ارتفاع‌های نسبی (h/Z) در شرایط سه فازی (شکل ۱۰) نشان می‌دهد که در محیط سه فازی افت غلظت ذره‌ها در ارتفاع‌های بالای سلول به آرامی اتفاق می‌افتد. درحالی که در نمودارهای دو فازی افت غلظت ناگهانی است. غلظت ذره‌های جامد در ارتفاع‌های پایین سلول بیش‌تر از شرایط دو فازی است. این موضوع نشان می‌دهد که با ورود هوا به سلول، ذره‌های بیش‌تری در پایین ظرف باقی می‌مانند.

بررسی نمودار غلظت

در شکل ۹ منحنی تغییرهای درصد جامد وزنی (غلظت جامد) در ارتفاع‌های نسبی (h/Z) سلول فلوتاسیون در شرایط دو فازی برای دو بازه اندازه ذره‌های رسم شده است. در این منحنی‌ها خطوط عمودی رسم شده معرف درصد جامد وزنی پالپ تهیه شده هستند. همان‌گونه که دیده می‌شود در سرعت همزن معادل $120-150 N_{js}$ ، غلظت پالپ در ارتفاع‌های گوناگون به ۱۵ درصد نزدیک‌تر است و توزیع ذره‌ها یکنواخت‌تر است. از این منحنی‌ها برای محاسبه ارتفاع سوسپانسیون نیز می‌توان استفاده کرد. در سرعت بحرانی همزن، ارتفاع سوسپانسیون حدود $0.85Z$ است. ارتفاع سوسپانسیون برای ذره‌های درشت‌تر در $80 N_{js}$ درصد،



شکل ۱۰- منحنی تغییرهای درصد جامد وزنی در ارتفاع‌های نسبی سلول در محیط سه فازی (کوارتز - آب - هوا).

اندازه ذره‌ها، چگالی نسبی جامد و درصد جامد وزنی و سرعت ظاهری هوا بر معلق نگه داشتن ذره‌ها در سلول‌های فلوتاسیون کمک می‌کنند. نتیجه‌ها نشان داد که چگالی نسبی جامد، اندازه ذره‌ها، غلظت جامد در پالپ و گرانروی پالپ به ترتیب مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار بر سرعت بحرانی همزن هستند. سرعت ظاهری هوا یکی از مهمترین متغیرهای تأثیرگذار بر معلق نگه داشتن ذره‌ها است. حضور هوا سبب کاهش دانسیته پالپ و تشکیل حفره‌های هوا در پشت تیغه‌های همزن می‌شود. در نتیجه سبب کاهش تنش برشی اعمال شده توسط همزن و چرخش سیال می‌شود. بنابراین سرعت بحرانی همزن با افزایش سرعت ظاهری هوا در سلول فلوتاسیون نیز همانند مخزن‌های همزن‌دار، به صورت خطی افزایش می‌یابد. از طرفی حباب‌های در حال بالا رفتن سبب انتقال ذره‌ها به‌ویژه ذره‌های ریز به ارتفاع‌های بالای سلول (بیش‌تر از $0.8 h/z$) می‌شوند که این پدیده یکی از دلایل دیناله‌روی ذره‌های ریز است. به منظور تعیین سرعت لازم برای توزیع کامل ذره‌های جامد و بررسی چگونگی توزیع ذره‌ها در سرعت‌های گوناگون همزن، نمودار غلظت جامد بر حسب عمق سلول فلوتاسیون بررسی شده است. نتیجه‌ها نشان داد که در سرعت بحرانی همزن، ارتفاع سوسپانسیون حدود $0.85Z-0.8Z$ است.

نتیجه‌های به دست آمده نشان داد که سرعت بحرانی همزن با وجود این‌که معیار مستقیمی از کم‌ترین سرعت لازم برای معلق شدن ذره‌های جامد در سلول فلوتاسیون است، معیار مناسبی برای توصیف چگونگی توزیع ذره‌های جامد نیز می‌تواند باشد. ذره‌ها در سرعت همزنی معادل $1.5-1.2$ برابر N_{js} توزیع فضایی یکنواخت‌تری دارند که نشان دهنده شرایط بهینه توزیع ذره‌ها برای فرایند

با حضور حباب‌های هوا توزیع ذره‌های جامد در ارتفاع‌های نسبی بیش‌تر از $0.85 h/z$ نسبت به شرایط دو فازی بیش‌تر است. علت این پدیده پراکنده سازی ذره‌ها توسط حباب‌های در حال بالا رفتن است. به دلیل توانایی بیش‌تر حباب‌ها در پراکنده‌سازی ذره‌های ریز، غلظت این ذره‌ها در ارتفاع‌های بیش‌تر از $0.8 h/z$ ، بیش‌تر از ذره‌های درشت است و این پدیده یکی از دلایل‌های دیناله روی ذره‌های ریز است.

همان‌گونه که دیده می‌شود در سرعت بحرانی همزن، ارتفاع سوسپانسیون حدود $0.8Z$ است که کاهش این مقدار در مقایسه با محیط دوفازی مؤید اثر منفی حضور حباب‌های هوا در توزیع ذره‌ها است. اما باز هم به نظر می‌رسد در $120-150 N_{js}$ ، توزیع ذره‌ها نسبت به سایر سرعت‌ها یکنواخت‌تر است.

نتیجه گیری

نخست با استفاده از مطالعه‌های انجام شده، متغیرهای تأثیرگذار بر سرعت بحرانی همزن شناسایی شدند. سپس براساس متغیرهای تأثیر گذار دو مدل تجربی برای N_{js} در یک سلول فلوتاسیون آزمایشگاهی مدل دنور در محیط دو فازی (جامد - مایع) و سه فازی (جامد- مایع-گاز) ارائه شد. نتیجه‌های اعتبارسنجی مدل‌های ارائه شده حاکی از انطباق مقادیرهای پیش‌بینی شده با نتیجه‌های آزمایشگاهی است. با توجه به این‌که این مدل‌ها از نوع تجربی هستند از آن‌ها می‌توان برای پیش بینی کم‌ترین سرعت همزن لازم برای معلق نگه داشتن ذره‌ها در سلول‌های فلوتاسیون مکانیکی آزمایشگاهی در بازه‌ی شرایط ارائه مدل، استفاده کرد. این مدل‌ها به بررسی چگونگی تأثیر متغیرهایی مانند

X	درصد جامد وزنی، %	فلوتاسیون است. سرعت‌های بیش‌تر از این بازه افزون بر این‌که
ρ_s	چگالی جامد، kg/m^3	سبب افزایش مصرف انرژی می‌شود، ممکن است سبب افزایش
ρ_l	چگالی مایع، kg/m^3	احتمال انفصال ذره‌ها، به ویژه ذره‌های درشت از حباب‌ها
D	قطر همزن، m	و در نتیجه کاهش کارایی شناورسازی ذره‌ها شود. بنابراین از این بازه
Z	ارتفاع پالپ، m	می‌توان به منظور پیش بینی سرعت بهینه همزن که منجر
T	قطر مخزن یا سلول فلوتاسیون، m	به افزایش کارایی شناورسازی ذره‌ها شود، استفاده کرد. در سرعت‌های
J_g	سرعت ظاهری گاز، cm/s	کم‌تر از سرعت بحرانی همزن، به دلیل این‌که تمام ذره‌ها
g	شتاب گرانش، m/s^2	در برابر حباب‌ها قرار نمی‌گیرند، احتمال برخورد، اتصال و در نتیجه
C	فاصله همزن از کف سلول، m	شناورشدن آنها کاهش می‌یابد. بنابراین پیشنهاد می‌شود،
$\Delta\rho$	اختلاف چگالی جامد و مایع، kg/m^3	در آزمایش‌های فلوتاسیون سرعت بحرانی همزن به عنوان کم‌ترین
S	ثابت معادله‌ی (۱)، تابعی از تمام متغیرهای هندسی سلول (نوع همزن، $S=f(D/T, C/T)$)	سرعت مورد نیاز برای معلق نگه داشتن ذره‌هایی که سبب کمینه کردن
B	نسبت جرمی جامد به مایع	مصرف انرژی می‌شود، در نظر گرفته شود.
a	ثابت هوادهی	

فهرست نمادها

v_L	گرانروی جنبشی مایع، m^2/s
v_w	گرانروی جنبشی آب، m^2/s
N_{jsu}	سرعت بحرانی همزن در شرایط دو فاز (جامد - مایع)
N_{jsg}	سرعت بحرانی همزن در شرایط سه فاز (جامد - مایع - گاز)
d_p	قطر ذره‌ها، μm

قدردانی

نویسندگان از دانشگاه تربیت مدرس تقدیر و تشکر می‌کنند.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۸/۱۸ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۰/۲۰

مراجع

- [1] Arbiter N., Harris C.C., Yap R.F., Hydrodynamics of Flotation Cells, *SME Transactions*, **244**: 134–148 (1969).
- [2] Yianatos J., Bergh L., Condori P., Aguilera J., Hydrodynamic and Metallurgical Characterization of Industrial Flotation Banks for Control Purposes, *Minerals Engineering* **14**: 1033–1046 (2001).
- [3] Van der Westhuizen A., Deglon D., Evaluation of Solids Suspension in a Pilot-Scale Mechanical Flotation Cell: The Critical Impeller Speed, *Minerals Engineering*, **20**(3): 233–240(2007).
- [4] Nienow A.W., The Suspension of Solid Particles, In: Harnby N., Edwards M.F., Nienow A.W. (Eds.), "Mixing in the Process Industries", 2nd Butterworth-Heinemann, Oxford: 364–393 (1992).
- [5] Ayranci I., Kresta S.M., Critical Analysis of Zwietering Correlation for Solids Suspension in Stirred Tanks, *Chemical Engineering Research and Design*, **92**(3):413–422 (2014).
- [6] Shahbazi B., Rezai B., The Effect of Micro Turbulence on Quartz Flotation Rate, *Iran .J. Chem. Chem. Eng. (IJCE)*, **34** (3): 77–87 (2015).

- [7] Zwietering T.N., [Suspending of Solid Particles in Liquid by Agitators](#), *Chemical Engineering Science*, **8**(3): 244-253(1958).
- [8] Dutta N., Pangarkar V., [Critical Impeller Speed for Solid Suspension in Multi-Impeller Three Phase Agitated Contactors](#), *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **73**(3): 273-283 (1995).
- [9] Van der Westhuizen A., Deglon D., [Solids Suspension in a Pilot-Scale Mechanical Flotation Cell: A Critical Impeller Speed Correlation](#), *Minerals Engineering*, **21**(8): 621-629 (2008).
- [10] Grenville R.K., Mak A.T.C., Brown D.A.R., [Suspension of Solid Particles in Vessels Agitated by Axial Flow Impellers](#), *Chemical Engineering Research and Design*, **100**(12):282-291 (2015).
- [11] Nienow A., [Suspension of Solid Particles in Turbine Agitated Baffled Vessels](#), *Chemical Engineering Science*, **23**(12):1453-1459(1968).
- [12] Baldi G., Conti R., and Alaria E., [Complete Suspension of Particles in Mechanically Agitated Vessels](#), *Chemical Engineering Science*, **33**(1): 21-25 (1978).
- [13] Myers K.J., Fasano J.B., and Corpstein R.R. ,[The Influence of Solid Properties on the Just-Suspended Agitation Requirements of Pitched-Blade and High-Efficiency Impellers](#), *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **72**(4):745-748 (1994).
- [14] Ayranci I., Ng T., Etchells III A.W., Kresta S.M., [Prediction of Just Suspended Speed for Mixed Slurries at High Solids Loadings](#), *Chemical Engineering Research and Design*, **91**(3):227-223 (2013).
- [15] Ayranci I., Machado M.B., Madej A.M., Derksen J.J., Nobes D.S., Kresta S.M., [Effect of Geometry on the Mechanisms for Off-Bottom Solids Suspension in a Stirred Tank](#), *Chemical Engineering Science*, **79**: 163-176(2012).
- [16] Montante G., Lee K., Brucato A., Yianneskis M., [Numerical Simulations of the Dependency of Flow Pattern on Impeller Clearance in Stirred Vessels](#), *Chemical Engineering Science*, **56**(12): 3751-3770(2001).
- [17] Montante G., Brucato A., Lee K., Yianneskis M., [An Experimental Study of Double-to-single-loop Transition in Stirred Vessels](#), *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **77**(4): 649-659 (1999).
- [18] Nienow A.W., Edwards M.F., Harnby N., "Mixing in the Process Industries", Butterworth-Heinemann (1997).