

تأثیر ابعاد ذرات در بارگیری حباب هوا در فلوتاسیون ستونی با استفاده از مدل‌های زیرفرآیندها

محسن علیزاده^۱؛ محمود عبدالمهی^{۲*}؛ محمدرضا خالصی^۳؛ امیر اسکانلو^۴

- ۱- کارشناس ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس، alizadeh.m1359@gmail.com
 ۲- استاد فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس، minmabd@modares.ac.ir
 ۳- استادیار فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس، mrkhalesi@modares.ac.ir
 ۴- دانشجوی دکترای فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس، amir.eskanlou@modares.ac.ir
 (دریافت ۲۸ اسفند ۱۳۹۵، پذیرش ۲۵ شهریور ۱۳۹۶)

چکیده

در این تحقیق آزمایش‌های بارگیری حباب با استفاده از کانی کوارتز انجام شد. همچنین با بهره‌گیری از مدل‌های محققین دیگر، کارایی زیرفرآیندهای سه‌گانه فلوتاسیون محاسبه و چگونگی تأثیر اندازه ذره بر کارایی برخورد (ثقلی، تقاطعی، اینرسیایی)، کارایی چسبیدن، کارایی پایداری و در نهایت بر کارایی جمع‌آوری به صورت مرحله به مرحله بررسی شد و با توجه به ثابت بودن شار سطحی حباب و غلظت ذرات، روند تغییرات کارایی جمع‌آوری به بارگیری حباب تعمیم داده شد. بر این اساس، علت افزایش بارگیری حباب با افزایش اندازه ذره از $۱۰۶+۶۳$ - به $۱۰۶+۱۵۰\mu\text{m}$ و نیز علت کاهش بارگیری حباب با افزایش بیشتر اندازه ذره از $۱۵۰+۱۰۶$ - به $۱۵۰+۳۰۰\mu\text{m}$ مشخص شد. در واقع با محاسبه کارایی زیرفرآیندها و بررسی تأثیر افزایشی یا کاهش اندازه ذره بر هر یک از آن‌ها به صورت کمی؛ معلوم شد که چگونه و پیرو کدام اتفاقات، ذرات $۱۰۶+۱۵۰\mu\text{m}$ ، بهترین اندازه ذرات کوارتز از نظر قابلیت شناور شدن هستند. با افزایش اندازه ذره تا حد مذکور به دلیل غالب شدن تأثیر ناشی از افزایش کارایی برخورد، کارایی جمع‌آوری (بارگیری حباب) افزایش یافت در حالی که با افزایش بیشتر اندازه ذره در نتیجه‌ی غلبه تأثیر ناشی از کاهش کارایی چسبیدن و کارایی پایداری، کارایی جمع‌آوری (بارگیری حباب) کاهش یافت.

کلمات کلیدی

اندازه ذره، کارایی، برخورد، گرانش، تقاطع، اینرسی، چسبیدن، پایداری، جمع‌آوری، بارگیری حباب، فلوتاسیون ستونی.

۱- مقدمه

فلوتاسیون به‌عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌های جداسازی کانی‌ها شامل سه زیرفرآیند برخورد، چسبیدن و انفصال (که در مقابل آن، مفهوم پایداری به کار می‌رود) است [۱]. زیرفرآیند برخورد به معنی حرکت ذره به سمت حباب و ایجاد تماس اولیه در میدان جریان است [۲] که ابتدا از نزدیک شدن ذره برخورد کننده به حباب شروع می‌شود و به‌وسیله جریان مایع و حرکت نسبی بین حباب و ذره کنترل می‌شود [۳]. شولز^۱ کارایی برخورد را به‌صورت نسبت تعداد ذرات برخورد کننده به یک حباب در واحد زمان، به تعداد ذرات نزدیک شونده به آن از فاصله ای زیاد در یک لوله جریان^۲ با سطح مقطعی برابر با مساحت تصویر^۳ حباب بیان کرده است [۴]. مطابق تحقیقات نوپن^۴ و شولز که بر مبنای معادله حرکت ذره انجام گرفته است مکانیزم‌های برخورد حباب-ذره شامل برخورد ثقلی^۵، برخورد تقاطعی^۶، برخورد اینرسیایی^۷ و برخورد متلاطم^۸ است. برخورد بین ذره و حباب به وسیله یک مکانیزم خاص اتفاق نمی‌افتد بلکه معمولاً دو مکانیزم یا بیشتر به‌طور همزمان عمل می‌کنند [۵].

زیرفرآیند بعدی یعنی چسبیدن، تحت تأثیر زمان سرخوردن ذره بر روی سطح حباب و زمان القاء^۹ است [۶]. کارایی چسبیدن بیان‌گر کسری از ذرات است که به حباب برخورد کرده و در زمان تماس به آن متصل می‌شوند. چسبیدن زمانی صورت می‌گیرد که مایع بین حباب و ذره، نازک و گسیخته شده و خطوط تماس سه فاز گاز-مایع-جامد شکل بگیرد [۷]. پس از ایجاد اتصال و تشکیل تجمع حباب-ذره، در صورتی که انرژی جنبشی معادل انرژی لازم برای انفصال (یا بیشتر از آن)، به تجمع حباب-ذره وارد شود ذره از این وضعیت خارج می‌شود^{۱۰} و انفصال اتفاق می‌افتد [۸]. وزن ذره و نیروهای اینرسی آشفته^{۱۱} مهم‌ترین نیروهای جداکننده ذره از حباب هستند [۶]. برای تعیین کارایی فرآیند فلوتاسیون، توصیف مناسب از این زیرفرآیندها ضروری است. اگرچه سه زیرفرآیند مذکور به‌طور کامل جدا از هم نیستند اما نیروهای حاکم بر هر یک از آن‌ها مستقل

از بقیه است و به‌منظور بیان دقیق‌تر، آن‌ها نسبت به یکدیگر مرحله‌بندی می‌شوند و بنابراین می‌توانند به‌طور جداگانه رفتارسنجی شوند [۳]. بارگیری حباب کمیتهی است که تمام این زیرفرآیندها را در قالب یک اندازه‌گیری نشان می‌دهد [۹]. بنابراین به‌منظور تحلیل تأثیر یک پارامتر عملیاتی مانند اندازه ذره بر بارگیری حباب، می‌توان از مطالعه تأثیر آن روی تک تک زیرفرآیندها استفاده کرد. در زمینه تأثیر اندازه ذره بر زیرفرآیندهای فلوتاسیون مطالعاتی توسط محققین مختلف انجام شده و مدل‌هایی نیز برای محاسبه کارایی برخورد، چسبیدن، پایداری و کارایی جمع‌آوری ارائه شده است [۵، ۷، ۱۰-۱۲]، اما چگونگی این تأثیر موضوعی مهم است که تحقیق حاضر روی آن متمرکز شد. براساس نتایج آزمایش‌های بارگیری حباب کانی کوارتز که پیش از این انجام شده، بیشترین بارگیری حباب این کانی مربوط به ذرات $150 + 106 \mu\text{m}$ - بوده است [۹] نتیجه‌ای که در این تحقیق نیز، هم به وسیله آزمایش‌های بارگیری حباب (در درصد‌های جامد مختلف) و هم با محاسبه کارایی جمع‌آوری تأیید شد. اما دلیل این پدیده چیست؟ در واقع پرسش این است چگونه و پیرو کدام اتفاقات، افزایش اندازه ذره از $106 + 63 \mu\text{m}$ - به $150 + 106 \mu\text{m}$ - موجب افزایش بارگیری حباب سپس از $150 + 106 \mu\text{m}$ - به $150 + 300 \mu\text{m}$ - موجب کاهش بارگیری حباب می‌شود؟ تحلیل چرایی چنین روندی، در این تحقیق مورد توجه قرار گرفت. نوآوری تحقیق حاضر این است که با محاسبه کارایی زیرفرآیندهای فلوتاسیون (به عنوان ابزار تحلیل)، به چرایی نحوه تأثیر اندازه ذره بر کمیتهی میکروسکوپی بارگیری حباب پاسخ داده است. تحلیل مرحله به مرحله و جز به جز زیر فرآیندها برای تبیین چگونگی تأثیر اندازه ذره بر بارگیری حباب، کار جدیدی است که در این تحقیق انجام شد. محاسبات مربوط به کارایی زیر فرآیندها در شرایط مختلف بر اساس روابط ریاضی حاکم، در نرم افزار متلب انجام و با توجه به حجم زیاد داده‌های به دست آمده، اغلب نتایج به‌صورت رسم نموداری ارائه شد.

انحراف مسیر ذره از خط جریان عبورکننده از اطراف حباب که در اثر ته‌نشینی ذره اتفاق می‌افتد ممکن است موجب تماس ذره با سطح حباب شود. این مکانیزم به وسیله پارامتر بی‌بعدی به نام نسبت سرعت ته‌نشینی ذره به حباب توصیف می‌شود [۵]. برای محاسبه کارایی برخورد ثقیلی از روابط جدول ۱ و ۲ استفاده شد.

۲-۲-۱-ب- روش محاسبه کارایی برخورد تقاطعی

در برخورد تقاطعی فرض می‌شود که مرکز ذره، خط جریان آب در حال عبور از اطراف حباب را دنبال می‌کند. به علت فشردن شدن خط جریان آب در حال عبور از اطراف حباب، مرکز ذره به فاصله شعاع ذره از سطح حباب می‌رسد و با حباب تماس پیدا می‌کند. این مکانیزم به وسیله عدد تقاطع^{۱۴} توصیف می‌شود [۵]. برای محاسبه کارایی برخورد تقاطعی از روابط جدول (۳) استفاده شد.

۲-۲-۱-ج- روش محاسبه کارایی برخورد اینرسیایی

ذرات درشت به علت اینرسی، حرکت منحنی‌وار مایع را دنبال نمی‌کنند و تمایل به ادامه دادن مسیر مستقیم دارند که این شرایط موجب برخورد ذره به حباب می‌شود. برای توصیف این مکانیزم برخورد از عدد استوکس ذره (st) استفاده می‌شود [۵]. به‌منظور محاسبه کارایی برخورد اینرسیایی از روابط جدول ۴ استفاده شد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مواد، روش‌ها و تجهیزات

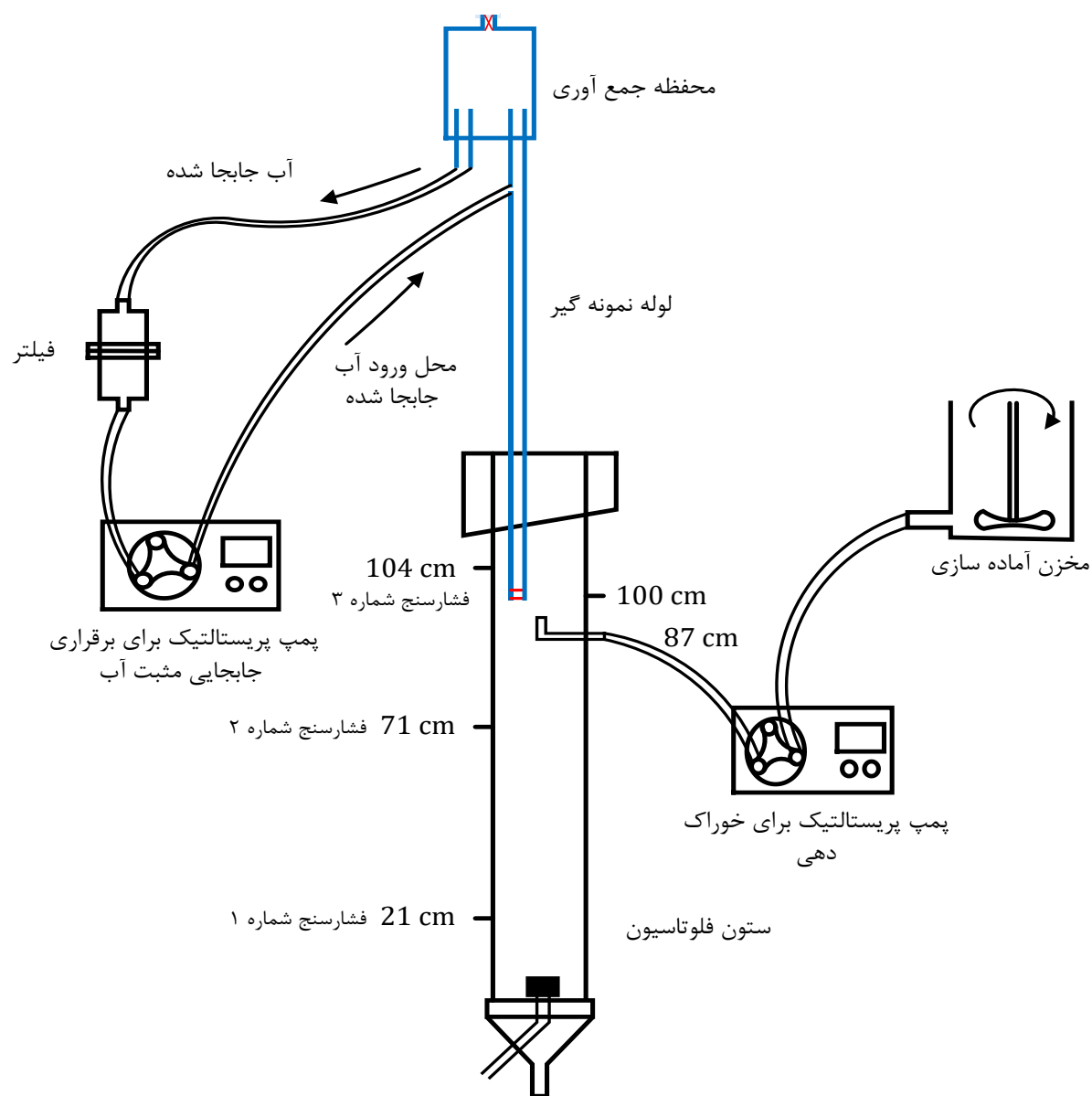
برای انجام تحقیق ابتدا با انجام آزمایش‌های بارگیری حباب، تأثیر اندازه ذره بر بارگیری حباب در ستون فلوتاسیون بررسی شد. سپس داده‌های مربوط به هریک از آزمایش‌ها در مدل‌های جمع‌آوری شده از منابع مختلف قرار داده شد و با اعمال شرایط و فرضیات مورد نظر، کارایی زیرفرآیندهای مختلف و در نهایت کارایی جمع‌آوری محاسبه شد و به این ترتیب چگونگی تأثیر اندازه ذره بر تک تک زیرفرآیندها، بر کارایی جمع‌آوری و در نتیجه بر بارگیری حباب مشخص شد. برای انجام آزمایش‌های بارگیری حباب از روش و تجهیزات ارائه شده توسط همتی چگنی و همکاران استفاده شده است. تجهیزات مورد استفاده شامل سلول فلوتاسیون ستونی، حباب‌ساز سوزنی با قابلیت تولید حباب‌های یکنواخت و نمونه‌گیر حباب بوده است. از مهم‌ترین ویژگی‌های ستون مورد استفاده، آشفته‌گی ناچیز و نیز کارکرد پیوسته و پایا می‌باشد. طرحی شماتیک از ستون فلوتاسیون مذکور در شکل ۱ قابل مشاهده است [۹]. برای انجام آزمایش‌ها از کانی کوارتز (با خلوص ۹۹/۶۴٪)، کلکتور دودسیل آمین^{۱۲} (با غلظت ۰/۵ گرم بر لیتر در محلول کلریدی با $\text{pH} = 3$) و کفساز پلی پروپیلن گلیکول^{۱۳} استفاده شد. آزمایش‌ها در سه سطح اندازه ذره $106+63$ ، $150+106$ ، $300+150$ μm و سه سطح درصد جامد ۵، ۱۰، ۱۵ طراحی و انجام شدند. سطح کلکتور مصرفی در همه آزمایش‌ها برابر 100 g/t بود. پالپ آماده‌سازی شده با نرخ $847 \text{ cm}^3/\text{min}$ به ستون فلوتاسیون خوراک‌دهی شد. دبی هوادهی به ستون برابر $300 \text{ cm}^3/\text{min}$ تنظیم شد و قطر حباب‌های تولید شده توسط حباب‌ساز سوزنی برابر $1/8 \text{ mm}$ بود. در تمام آزمایش‌ها، نمونه‌گیری از پالپ در ارتفاع ۱۰ سانتی‌متری ستون فلوتاسیون انجام گرفت.

۲-۲- روش محاسبه کارایی زیرفرآیندها

مدل‌هایی که از منابع دیگر جمع‌آوری و در این تحقیق برای محاسبه کارایی زیرفرآیندها استفاده شده‌اند و نیز نحوه استفاده از آن‌ها در این بخش ارائه شده است.

۲-۲-۱- روش محاسبه کارایی برخورد

۲-۲-۱-الف- روش محاسبه کارایی برخورد ثقیلی



شکل ۱: شماتیک تجهیز آزمایشگاهی [۹].

جدول ۱: روابط مورد استفاده جهت محاسبه کارایی برخورد ثقلی

شماره مدل	مدل	بازه مجاز و ثوابت	مرجع
(۱)	$E_g = \frac{v_s}{1 + v_s}$	-	[۵]
(۲)	$v_s = \frac{V_s}{U}$	-	[۵]
(۳)	$V_s = V_{stokes} \left(1 + \frac{Ar}{96} (1 + 0.079Ar^{0.749})^{-0.755}\right)^{-1}$	$Ar < 10^6$	[۵]
(۴)	$V_{stokes} = \frac{2R_p^2(\rho - \delta)g}{9\mu}$	-	[۵]
(۵)	$Ar = 8R_p^3 \frac{(\rho - \delta)\delta g}{\mu^2}$	-	[۵]
(۶)	$Ar^* = 8R_b^3 \frac{\delta^2 g}{\mu^2}$	-	[۵]
(۷)	$U = U_{stokes} \left\{ 1 + \frac{Ar^*/96}{(1 + 0.079Ar^{*0.749})^{0.755}} \right\}$	$Ar^* < 12332$	[۵]
(۸)	$U = 18U_{stokes} \left\{ \frac{4a^2 Ar^{*2b-1} Mo^{0.46b}}{3k} \right\}^{\frac{1}{2-2b}}$	$Ar^* \geq 12332$ $Re > 130$ $k = 0.95$	[۵]
(۹)	$Mo = \frac{g\mu^4}{\delta\sigma^3}$	-	[۵]
(۱۰)	$U_{stokes} = \frac{2R_b^2\delta g}{9\mu}$	-	[۵]

+ مقادیر a و b از جدول ۲ به دست می آیند.

جدول ۲: مقادیر پارامترهای a و b.

Ar^*	a	b
$12332 \leq Ar^* \leq 3.158Mo^{-0.46}$	1	0
$3.158Mo^{-0.46} \leq Ar^* \leq 29.654Mo^{-0.46}$	1.14	-0.176
$29.654Mo^{-0.46} \leq Ar^* \leq 506.719Mo^{-0.46}$	1.36	-0.280
$506.719Mo^{-0.46} \leq Ar^*$	0.62	0

۲-۲-۲-۲- روش محاسبه کارایی چسبیدن (E_a)

به منظور محاسبه کارایی چسبیدن از روابط جدول ۵ استفاده شد.

۲-۲-۱-۵- روش محاسبه کارایی برخورد متلاطم

با توجه به آشفتگی ناچیز ستون فلوتاسیون مورد استفاده، کارایی برخورد متلاطم ($E_{tur=0}$) در نظر گرفته شد.

۲-۲-۱-۵- روش محاسبه کارایی کلی برخورد^{۱۵}

برای محاسبه کارایی کلی برخورد از معادله (۳۱) استفاده شد [۵].

$$E_c = 1 - (1 - E_g)(1 - E_i)(1 - E_{in})(1 - E_{tur}) \quad (31)$$

جدول ۳: روابط مورد استفاده جهت محاسبه کارایی برخورد تقاطعی.

شماره مدل	مدل	بازه مجاز	مرجع
(۱۱)	$E_i = \frac{2f(R)}{27(1+v_s)Y^2} \{ \sqrt{X^2 + 3Y^2} - X \} \{ \sqrt{X^2 + 3Y^2} + 2X \}^2$	-	[۵]
(۱۲)	$f(R) = R - R^2 + O(R^3)$	برای حباب‌های با	[۵]
(۱۳)	$f(R) = R - R^2$	سطح لغزنده ^{۱۶}	[۲]
(۱۴)	$R = \frac{R_p}{R_b}$	-	[۵]
(۱۵)	$X = X_0 + X_\varepsilon$	$0.5 \leq eR \leq 5$ $0.4 < \varepsilon \leq 0.5$	[۵]
(۱۶)	$Y = Y_0 + Y_\varepsilon$		[۵]
(۱۷)	$X_0 = 1 + \frac{0.0637Re}{1 + 0.0438Re^{0.976}}$		[۵]
(۱۸)	$Y_0 = \frac{0.0537Re}{1 + 0.0318Re^{1.309}}$		[۵]
(۱۹)	$Re = \frac{2UR_b\delta}{\mu}$		-
(۲۰)	$X_\varepsilon = (5.274 - 0.588Re^{0.230})\varepsilon^{0.711}$	$0.5 \leq eR \leq 5$ $0.4 < \varepsilon \leq 0.5$	[۵]
(۲۱)	$Y_\varepsilon = -0.0513Re^{1.015}\varepsilon^{0.0559} / (1 + 0.0371Re^{1.308})$		[۵]
(۲۲)	$\varepsilon = \frac{\varepsilon_g}{1 - \varepsilon_s}$		[۵]
(۲۳)	$\varepsilon_g = 1 - \frac{\delta}{\rho_{sl}} \left(1 - \frac{\Delta h}{\Delta L} \right)$	-	[۷]
(۲۴)	$\varepsilon_s = \frac{\frac{\Delta P}{\Delta L} - g\delta \left(1 - \varepsilon_g \right)}{g(\rho - \delta)}$	-	[۱۱]
(۲۵)	$\Delta P = \rho_{sl} \cdot g \cdot \Delta L$	-	[۷]

جدول ۴: روابط مورد استفاده جهت محاسبه کارایی برخورد اینرسیایی.

شماره مدل	مدل	مرجع
(۲۶)	$E_{in} = \frac{st^{a^*} - b^*}{st^{a^*} + c^*}$	[۵]
(۲۷)	$st = \frac{1}{9} \left(\frac{\rho}{\delta} \right) \left(\frac{R_p}{R_b} \right)^2 Re$	[۵]
(۲۸)	$a^* = 0.788 + \frac{2.724Re}{1 + 10.430Re^{0.985}}$	[۵]
(۲۹)	$b^* = 0.069 + 0.870 \exp(-0.041Re)$	[۵]
(۳۰)	$c^* = 1 + (0.407Re + 1.504) \exp(-0.00138Re^{1.882})$	[۵]

جدول ۵: روابط مورد استفاده جهت محاسبه کارایی چسبیدن.

شماره مدل	مدل	بازه مجاز و ثوابت	مرجع
(۳۲)	$E_a = \frac{(X + C) \sin^2 \phi_a - \frac{C_1 X^2 (\cos^3 \phi_a - 3 \cos \phi_a + 2)}{3}}{(X + C) \sin^2 \phi_c - \frac{C_1 X^2 (\cos^3 \phi_c - 3 \cos \phi_c + 2)}{3}}$	-	[۵]
(۳۳)	$C = \frac{v_s}{f(R)}$	-	[۵]
(۳۴)	$C_1 = \left(\frac{st}{2}\right) \left(1 - \frac{\delta}{\rho}\right) \left(\frac{f_1(R)}{f(R)}\right)$	مقدار $f_1(R)$ برای حباب‌های دارای سطح لغزنده برابر ۱ است.	[۵]
(۳۵)	$\cos \phi_c = \frac{\sqrt{(X + C)^2 + C_1^2 X^4 - (X + C)}}{C_1 X^2}$	-	[۵]
(۳۶)	$\phi_a = 2 \tan^{-1} \left\{ \frac{\tan(\phi_c/2)}{\exp\left(\frac{t_i UA}{R_p + R_h}\right)} \right\}$	-	[۵]
(۳۷)	$A = \frac{V_s}{U} + \left\{1 + \frac{R_p}{R_h}\right\} \frac{X}{2} + \left\{\frac{R_p}{R_h}\right\}^2 \frac{M}{2}$	-	[۵]
(۳۸)	$M = M_0 + M_\varepsilon$	$0 \leq \varepsilon \leq eR$	[۵]
(۳۹)	$M_0 = -1 - 0.267 Re^{0.781}$	$0 \leq \varepsilon < 0.4$	[۵]
(۴۰)	$M_\varepsilon = -(30.431 + 0.951 Re^{0.777}) \varepsilon^{1.426}$		[۵]
(۴۱)	$t_i = \frac{75}{\theta_1} d_p^{0.6}$	-	[۱۲]

نتیجه‌ی چسبیدن، در حالت اتصال باقی می‌ماند [۷]. از رابطه رالستون^{۱۹} و همکاران که کارایی جمع آوری را به صورت رابطه (۴۴) بیان کردند استفاده شد [۸].

$$E_{col} = E_c E_a E_s \quad (44)$$

۲-۲-۵- اندازه‌گیری‌ها و فرضیات

الف- زاویه تماس: از هر یک از طبقات ابعادی کوارتز پس از آماده‌سازی با کلکتور و در هنگام خوراک‌دهی به ستون فلوتاسیون، نمونه‌گیری انجام شد. زاویه تماس آنها با استفاده از روش واش‌برن^{۲۰} اندازه‌گیری شد که برای ذرات $106 \mu m + 63 \mu m -$ ، $150 \mu m + 106 \mu m -$ و $300 \mu m + 150 \mu m -$ به ترتیب $80/5^\circ$ ، $80/65^\circ$ و $81/6^\circ$ به‌دست آمد.

ب- فاصله محل نصب فشارسنج‌ها روی ستون فلوتاسیون: براساس اندازه‌گیری، فشارسنج‌های ۲ و ۳ (شکل ۱) به ترتیب در ارتفاع‌های ۷۱ و ۱۰۴ سانتی متر قرار گرفتند و فاصله آنها برابر ۳۳cm بود.

۲-۲-۳- روش محاسبه کارایی پایداری (E_s)

وودبرن^{۱۷} و همکاران محاسبه کردند که بیشترین تنش ایجاد شده در سطح حباب با $d_p^{1.5}$ متناسب است و احتمال جدا شدن طبق رابطه (۴۲) به‌دست می‌آید [۷].

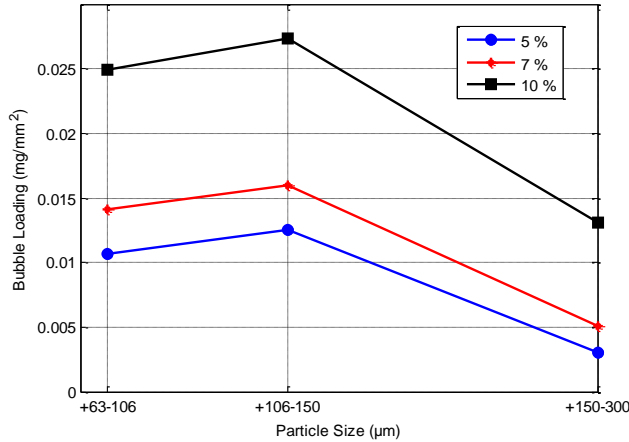
$$E_d = \left(\frac{d_p}{d_{p_{max}}}\right)^{1.5} \quad (42)$$

آزمایش‌های آنها نشان داد که $d_{p_{max}}$ (بزرگترین اندازه ذره شناور شونده) برای بسیاری از کانی‌ها ۴۰۰-۱۰۰۰ میکرون است (۷). با توجه به رابطه مذکور، برای محاسبه کارایی پایداری از رابطه (۴۳) استفاده شد.

$$E_s = 1 - \left(\frac{d_p}{d_{p_{max}}}\right)^{1.5} \quad (43)$$

۲-۲-۴- روش محاسبه کارایی جمع آوری^{۱۸} (E_{col})

کارایی جمع آوری، بیان‌گر کسری از ذرات است که در مسیر حرکت حباب قرار گرفته، به آن برخورد می‌کنند و در



شکل ۲: نتایج آزمایش‌های بارگیری حباب برحسب اندازه ذره در درصد جامدهای مختلف.

۳-۲- کارایی زیرفرآیندها (مطابق محاسبات مدل) کارایی زیرفرآیندهای مختلف با وارد کردن اطلاعات اولیه و پس از اعمال فرضیات و ملاحظات مورد نظر، با استفاده از روابط (۱) تا (۴۴) محاسبه شد. تعدادی از نتایج در جدول ۷ و نتایج کامل در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است.

۳-۳- تحلیل نتایج

در هریک از سطوح درصد جامد، افزایش ابعاد ذره تا حدی، موجب افزایش بارگیری حباب سپس موجب کاهش نسبتاً شدید بارگیری حباب شده است (شکل ۲). تحلیل این نتیجه براساس نتایج مدل‌ها به صورت زیر قابل بیان است.

پ- اختلاف ارتفاع مایع در دو فشارسنج آبی: طبق اندازه گیری، اختلاف ارتفاع مایع در فشارسنج‌های آبی ۲ و ۳ (شکل ۱) در شرایط آزمایش (سه فازی) برابر ۲/۵ میلی‌متر بود.

ت- فاصله محل نصب فشار سنج‌ها از بالای ستون: با توجه به اندازه گیری انجام شده، این فاصله برای فشارسنج‌های ۳ و ۲ به ترتیب ۴۴ و ۱۱ سانتی‌متر بود.

ث- وزن مخصوص مایع (δ) برابر 1 g/cm^3 ، وزن مخصوص جامد (ρ) برابر $2/65 \text{ g/cm}^3$ ، گرانیوی مایع (μ) برابر $0/01 \text{ g/cm.s}$ ، کشش سطحی مایع (σ) برابر 65 g/s^2 و شتاب گرانش (g) برابر $9/81 \text{ m/s}^2$ فرض شدند.

ج- وزن مخصوص پالپ (ρ_{sl}): از آنجایی که ناحیه مورد مطالعه یعنی محل نصب فشارسنج‌های ۲ و ۳ و نیز محل نمونه‌گیری، در یک سوم بالایی ستون در نزدیکی محل خوراک‌دهی به ستون واقع شده‌اند بنابراین با تقریب مناسب، وزن مخصوص پالپ این ناحیه از ستون برابر وزن مخصوص پالپ ورودی به ستون در نظر گرفته شد. با توجه به این‌که در این بخش، بررسی کارایی هر یک از زیرفرآیندها به صورت مقایسه‌ای بین آزمایش‌های مختلف مورد نظر است از این تقریب می‌توان استفاده کرد. مقدار ρ_{sl} در درصد جامدهای ۵، ۷ و ۱۰ به ترتیب $1/032 \text{ g/cm}^3$ ، $1/045$ و $1/065$ بود. ج- با توجه به ناچیز بودن آشفستگی در ستون فلوتاسیون مورد استفاده و همچنین وزن مخصوص کم کانی مورد نظر، مقدار $d_{p_{max}}$ برابر ۱۰۰۰ میکرون در نظر گرفته شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اندازه‌گیری‌های بارگیری حباب

نتایج اندازه‌گیری‌های بارگیری حباب در جدول ۶ و نیز در شکل ۲ ارائه شده است.

جدول ۶: نتایج آزمایش‌های بارگیری حباب

بارگیری حباب (mg/mm^2)	درصد جامد (%)	محدوده اندازه ذره (μm)
۰/۰۱۰۷	۵	-۶۳+۱۰۶
۰/۰۱۲۵	۵	-۱۰۶+۱۵۰
۰/۰۰۳۰	۵	-۱۵۰+۳۰۰
۰/۰۱۴۱	۷	-۶۳+۱۰۶
۰/۰۱۶۰	۷	-۱۰۶+۱۵۰
۰/۰۰۵۱	۷	-۱۵۰+۳۰۰
۰/۰۲۴۹	۱۰	-۶۳+۱۰۶
۰/۰۲۷۳	۱۰	-۱۰۶+۱۵۰
۰/۰۱۳۱	۱۰	-۱۵۰+۳۰۰

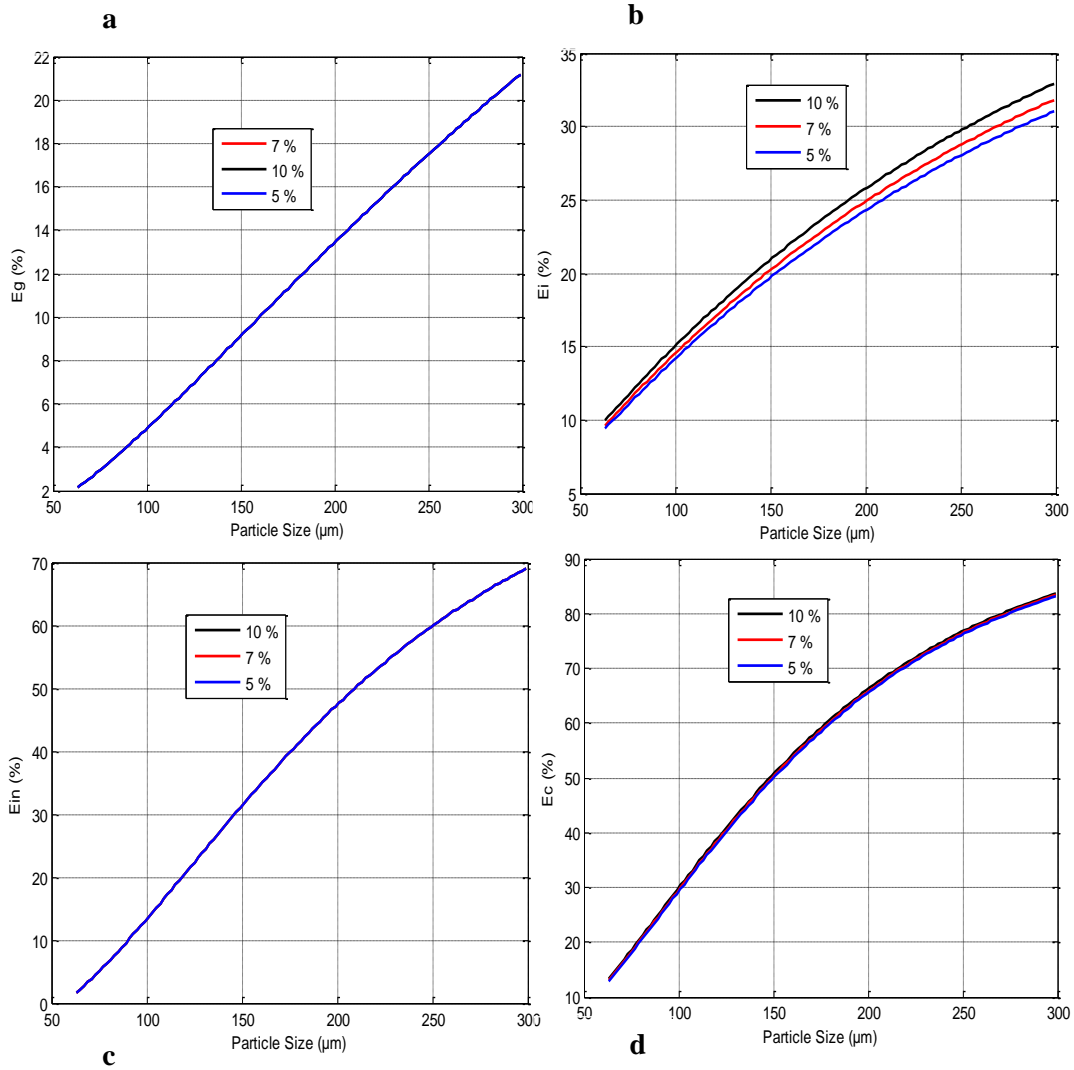
۳-۳-۱- کارایی برخورد

افزایش اندازه ذره موجب افزایش محسوس عدد ارشمیدس ذره (مطابق رابطه ۵) و افزایش V_{stokes} (مطابق رابطه ۴)

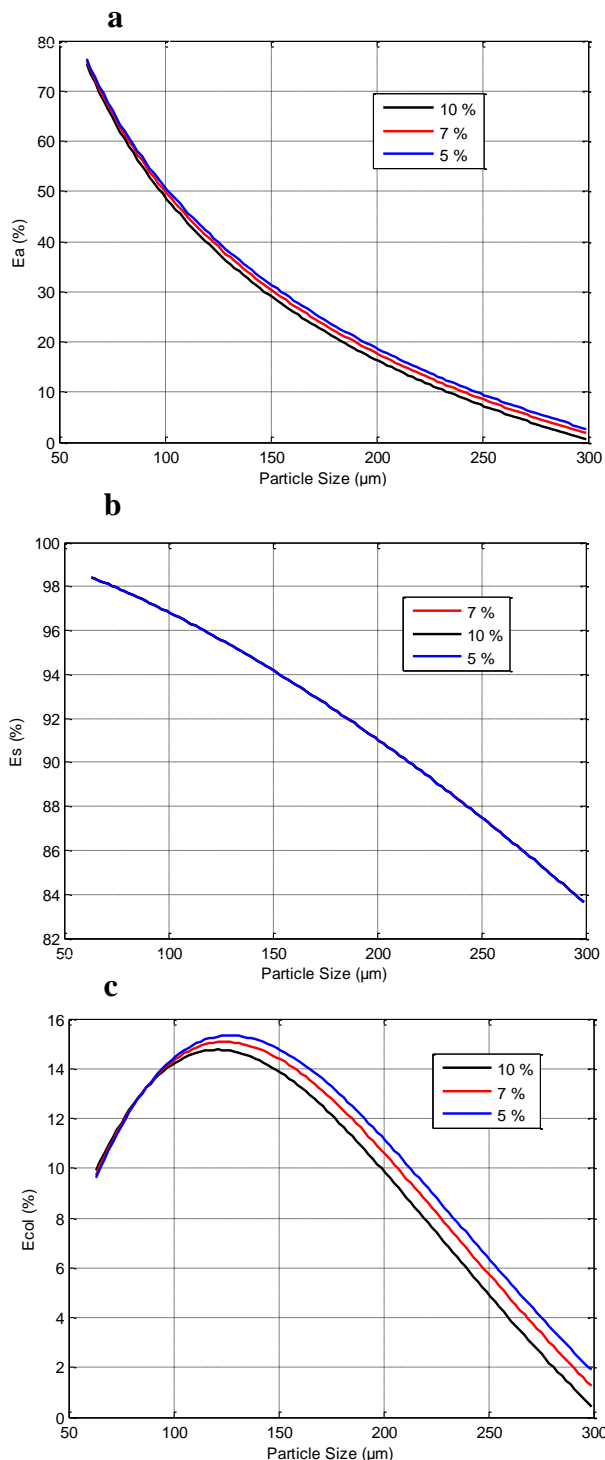
می‌شود. افزایش این دو فاکتور موجب افزایش سرعت ته-نشینی ذره (مطابق رابطه ۳) و در نتیجه موجب افزایش v_s می‌شود (مطابق رابطه ۲) که این افزایش براساس رابطه (۱) موجب افزایش کارایی برخورد ثقلی می‌شود. همچنین، افزایش اندازه ذره مطابق روابط ۱۳، ۱۴ و ۱۱ موجب افزایش R و $f(R)$ و در نتیجه موجب افزایش کارایی برخورد تقاطعی می‌شود (با توجه به ثابت بودن سایر فاکتورها). علاوه بر این، افزایش اندازه ذره مطابق رابطه (۲۷) موجب افزایش عدد استوکس ذره و در نتیجه براساس رابطه (۲۶) موجب افزایش قابل توجه کارایی برخورد اینرسیایی می‌شود. افزایش کارایی برخورد ثقلی، تقاطعی و اینرسیایی موجب افزایش کارایی کلی برخورد ذره به حباب می‌شود (مطابق رابطه ۳۱). تأثیر افزایشی اندازه ذره بر کارایی برخورد ثقلی، تقاطعی، اینرسیایی و نیز بر کارایی کلی برخورد به ترتیب در شکل‌های ۳-ا، ۳-ب، ۳-ج و ۳-د قابل مشاهده است.

جدول ۷: کارایی زیرفرآیندهای محاسبه شده به وسیله روابط مدل (%).

E_{col}	E_s	E_a	E_c	E_{in}	E_i	E_g	درصد جامد (%)	میانگین اندازه ذره (μm)	محدوده اندازه ذره (μm)
۱۲/۸	۹۷/۵	۵۹/۷	۲۲/۳	۸/۱	۱۲/۳	۳/۶	۵	۸۴/۵	-۶۳+۱۰۶
۱۵/۳	۹۵/۴	۳۸/۸	۴۱/۳	۲۳/۴	۱۷/۴	۷/۲	۵	۱۲۸	-۱۰۶+۱۵۰
۸/۸	۸۹/۳	۱۳/۸	۷۱/۴	۵۴/۱	۲۶/۳	۱۵/۵	۵	۲۲۵	-۱۵۰+۳۰۰
۱۲/۹	۹۷/۵	۵۹/۰	۲۲/۵	۸/۱	۱۲/۶	۳/۶	۷	۸۴/۵	-۶۳+۱۰۶
۱۵/۱	۹۵/۴	۳۷/۹	۴۱/۷	۲۳/۴	۱۷/۹	۷/۲	۷	۱۲۸	-۱۰۶+۱۵۰
۸/۲	۸۹/۳	۱۲/۸	۷۱/۷	۵۴/۱	۲۶/۹	۱۵/۵	۷	۲۲۵	-۱۵۰+۳۰۰
۱۳/۰	۹۷/۵	۵۸/۰	۲۲/۹	۸/۱	۱۳/۰	۳/۶	۱۰	۸۴/۵	-۶۳+۱۰۶
۱۴/۷	۹۵/۴	۳۶/۶	۴۲/۱	۲۳/۴	۱۸/۵	۷/۲	۱۰	۱۲۸	-۱۰۶+۱۵۰
۷/۴	۸۹/۳	۱۱/۵	۷۲/۰	۵۴/۱	۲۷/۹	۱۵/۵	۱۰	۲۲۵	-۱۵۰+۳۰۰



شکل ۳: کارایی محاسبه شده انواع مکانیزم‌های برخورد برحسب اندازه ذره در درصد جامدهای مختلف (a: برخورد ثقلی، b: برخورد تقاطعی، c: برخورد اینرسیایی، d: کلی).



شکل ۴: نمودار کارایی چسبیدن، پایداری و جمع آوری برحسب اندازه ذره در درصد جامدهای مختلف (a: چسبیدن، b: پایداری، c: جمع آوری).

۳-۳-۲- کارایی چسبیدن و کارایی پایداری

با توجه به نتایج، افزایش اندازه ذره موجب افزایش v_s و $f(R)$ می‌شود که افزایش v_s بیشتر قابل توجه است. بنابراین طبق رابطه (۳۳)، فاکتور C نیز افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به افزایش عدد استوکس ذره، مطابق رابطه (۳۴) فاکتور C_1 افزایش می‌یابد. مطابق رابطه (۳۵) افزایش C و C_1 موجب کاهش بیشترین حد زاویه برخورد ذره به حباب (ϕ_c) می‌شود. از سوی دیگر با افزایش اندازه ذره براساس رابطه (۴۱) زمان القاء افزایش می‌یابد. افزایش زمان القاء مطابق رابطه (۳۶) موجب کاهش زاویه بحرانی چسبیدن (ϕ_a) می‌شود. در نهایت افزایش C و C_1 و نیز کاهش ϕ_c و ϕ_a ؛ بر اساس رابطه (۳۲) موجب کاهش کارایی چسبیدن می‌شود (شکل ۴-ا). همچنین افزایش اندازه ذره، مطابق رابطه (۴۳) موجب کاهش کارایی پایداری (E_s) می‌شود (شکل ۴-ب).

۳-۳-۳- کارایی جمع آوری

افزایش اندازه ذره تا یک حد مشخص موجب افزایش و پس از آن حد موجب کاهش کارایی جمع آوری می‌شود زیرا با افزایش اندازه ذره تا آن حد، در نتیجه تأثیر افزایشی ناشی از افزایش کارایی برخورد، کارایی جمع آوری افزایش می‌یابد، اما با افزایش بیشتر اندازه ذره، در نتیجه غلبه تأثیر ناشی از کاهش کارایی چسبیدن و کاهش کارایی پایداری، کارایی جمع آوری کاهش می‌یابد.

با توجه به این که قطر حباب و دبی هوادهی به ستون ثابت بوده، در نتیجه شارسطحی حباب نیز در شرایط مختلف ثابت بوده است و بنابراین تغییرات بارگیری حباب مستقل از عامل شارسطحی حباب است. از سوی دیگر چون مقایسه در هر یک از سطوح درصد جامد به طور جداگانه انجام شده است، نتایج بارگیری حباب مستقل از تأثیر غلظت پالپ در محیط نیز است. بنابراین انتظار می‌رود که تغییرات بارگیری حباب فقط تابع تغییرات کارایی جمع آوری باشد که نتایج این تحقیق نیز تأییدکننده این امر است. یعنی مدل مورد استفاده، پیش‌بینی بسیار مناسبی از روند تغییرات کارایی جمع آوری و در نهایت بارگیری حباب ارائه داده است، به طوری که نتایج مدل با نتایج آزمایش‌های بارگیری حباب در توافق هستند (شکل‌های ۲ و ۴-ج).

کارایی جمع‌آوری است که در شکل ۴-۴ و در جدول ۷ نشان داده شده است. با افزایش اندازه ذره تا یک حد معین (از ۶۳ تا $128 \mu\text{m}$) به دلیل غلبه تأثیر ناشی از افزایش کارایی برخورد بر تأثیر ناشی از کاهش کارایی چسبیدن و پایداری، کارایی جمع‌آوری افزایش یافته در حالی که با افزایش بیشتر اندازه ذره (از $128 \mu\text{m}$ تا $300 \mu\text{m}$) در نتیجه‌ی غلبه تأثیر کاهش کارایی چسبیدن و کارایی پایداری، کارایی جمع‌آوری کاهش یافته است. با توجه به ثابت بودن شار سطحی حباب‌ها و غلظت ذرات (در هر یک از سطوح درصد جامد)، انتظار می‌رفت که روند تغییرات بارگیری حباب تابع روند تغییرات کارایی جمع‌آوری باشد یعنی با افزایش اندازه ذره ابتدا بارگیری حباب افزایش سپس کاهش یابد که نتایج آزمایش‌ها نیز مطابق با این پیش‌بینی بود. براساس نتایج آزمایش‌ها در درصد جامدهای مختلف از پالپ، با افزایش اندازه ذره از $106+63 \mu\text{m}$ به $150+106 \mu\text{m}$ بارگیری حباب افزایش اما با افزایش بیشتر اندازه ذره یعنی از $150+106 \mu\text{m}$ به $300+150 \mu\text{m}$ بارگیری حباب به‌طور نسبتاً شدیدی کاهش یافته است (جدول ۶). یعنی ذرات کوارتز $106+150 \mu\text{m}$ (یا $128 \mu\text{m}$) بیشترین قابلیت شناورشدگی را دارد. در این تحقیق مشخص شد که تأثیر اندازه ذره بر بارگیری حباب و محدوده بهینه اندازه ذرات، کاملاً با روابط زیرفرآیندهای فلوتاسیون قابل تفسیر و پیش‌بینی است و بنابراین می‌توان محدوده بهینه دانه‌بندی که مکرراً توسط محققین مختلف به اهمیت آن تاکید شده را بر اساس شرایط فیزیکوشیمیایی از قبیل خصوصیات و رفتارهای ذره، حباب، مایع، سلول فلوتاسیون، مواد شیمیایی و نیز اثرات متقابل آن‌ها پیش‌بینی کرد.

اما با توجه به نتایج ارائه شده ممکن است این پرسش ایجاد شود چرا روند تأثیر درصد جامد بر بارگیری حباب از روند تأثیر درصد جامد بر کارایی جمع‌آوری چندان تبعیت نمی‌کند؟ در پاسخ باید گفت که طبق نتایج مدل، تغییرات درصد جامد موجب تغییرات اندکی در کارایی جمع‌آوری شده است یعنی تأثیر تغییر چند واحدی درصد جامد بر کارایی جمع‌آوری چندان محسوس نیست و از سوی دیگر شار سطحی حباب‌ها نیز ثابت است بنابراین عامل اصلی تأثیرگذار در میزان بارگیری حباب، نه کارایی جمع‌آوری و نه شار سطحی حباب‌ها بلکه عامل مهم، تعداد ذرات موجود در حجم جارو شده است. چون با افزایش درصد جامد، تعداد ذرات در حجم جارو شده افزایش یافته بنابراین بارگیری حباب نیز افزایش یافته است.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق با استفاده از روابط زیرفرآیندها، تلاش شد اثر اندازه ذره بر کارایی جمع‌آوری با استفاده از داده‌های واقعی یک مجموعه آزمایشی محاسبه و کمی‌سازی شده و از طریق آن، نتایج اندازه‌گیری بارگیری حباب تحلیل شود. مطابق نمودارهای شکل ۳ و اعداد مندرج در جدول ۷؛ در درصد جامدهای مختلف، افزایش اندازه ذره موجب افزایش تأثیر انواع مکانیزم‌های برخورد و در نهایت افزایش کارایی کلی برخورد می‌شود. همچنین مطابق شکل ۴-a، شکل ۴-b و نیز اعداد مندرج در جدول ۷؛ افزایش اندازه ذره موجب کاهش کارایی چسبیدن و کاهش کارایی پایداری می‌شود. برآیند این اثرات غیرهم‌جهت، تعیین‌کننده روند تغییرات

منابع:

- [4] Schulze, H. J. (1989). Hydrodynamics of bubble-mineral particle collisions. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 5(1-4), 43-76.
- [5] Nguyen, A., & Schulze, H. J. (2003). *Colloidal science of flotation*. CRC Press.
- [6] Phan, C. M., Nguyen, A. V., Miller, J. D., Evans, G. M., & Jameson, G. J. (2003). Investigations of bubble-particle interactions. *International Journal of Mineral Processing*, 72(1), 239-254.
- [7] Finch, J., & Dobby, G. S. (1991). *Column flotation*. Pergamon Press plc (UK).
- [8] Ralston, J., Fornasiero, D., & Hayes, R. (1999). Bubble-particle attachment and detachment in flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 56(1), 133-164.
- [9] Chegeni, M. H., Abdollahy, M., & Khalesi, M. R. (2016). Bubble loading measurement in a
- [1] Nguyen, A. V., & Evans, G. M. (2004). Attachment interaction between air bubbles and particles in froth flotation. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 28(5), 381-385.
- [2] Firouzi, M., Nguyen, A. V., & Hashemabadi, S. H. (2011). The effect of micro hydrodynamics on bubble-particle collision interaction. *Minerals Engineering*, 24(9), 973-986.
- [3] Brabcová, Z., Karapantsios, T., Kostoglou, M., Basařová, P., & Matis, K. (2015). Bubble-particle collision interaction in flotation systems. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 473, 95-103.

- [11] Banisi, S. (1994). On-line Phase Holdup Measurement and Analysis in Flotation Columns. PhD thesis.
- [12] Koh, P. T. L., & Schwarz, M. P. (2006). CFD modelling of bubble-particle attachments in flotation cells. *Minerals Engineering*, 19(6), 619-626.

- continuous flotation column. *Minerals Engineering*, 85, 49-54.
- [10] King, R. P. (2012). Modeling and simulation of mineral processing systems. Elsevier.

فهرست علائم

علائم	نام علامت	واحد	علامت	نام علامت	واحد	علامت	نام علامت	واحد
E_g	کارایی برخورد ثقیلی	%	R_p	شعاع ذره	m	E_a	کارایی چسبیدن	%
E_i	کارایی برخورد تقاطعی	%	R_b	شعاع حباب	m	E_d	کارایی انفصال	%
E_{in}	کارایی برخورد اینرسیایی	%	Ar^*	عدد ارشمیدس حباب	-	E_s	کارایی پایداری	%
E_{tur}	کارایی برخورد متلاطم	%	Mo	عدد مورتون (توصیف کننده شکل یک حباب در حال حرکت در سیال)	-	E_{col}	کارایی جمع آوری	%
E_c	کارایی کلی برخورد	%	U_{stokes}	سرعت حد صعود حباب طبق قانون استوکس	m/s	ρ_{sl}	وزن مخصوص پالپ	g/cm ³
v_s	نسبت سرعت ته نشینی ذره به سرعت صعود حباب	-	Re	عدد رینولدز حباب	-	Δh	اختلاف ارتفاع مایع در دو فشارسنج آبی	cm
V_s	سرعت ته نشینی ذره	m/s	R	عدد تقاطع	-	L_2	فاصله محل نصب فشارسنج ۲ از بالای ستون	cm
U	سرعت حد صعود حباب	m/s	ϵ_g	ماندگی گاز	%	L_3	فاصله محل نصب فشارسنج ۳ از بالای ستون	cm
V_{stokes}	سرعت ته نشینی ذره طبق قانون استوکس	m/s	ϵ_s	ماندگی جامد	%	ΔL	فاصله محل اتصال فشارسنج‌های ۲ و ۳ روی ستون فلوتاسیون	cm
Ar	عدد ارشمیدس ذره	-	ϵ	شاخص ماندگی	-	ΔP	اختلاف فشار استاتیکی بین نقاط ۲ و ۳	g/cm.s ²
ρ	وزن مخصوص ذره	Kg/m ³	st	عدد استوکس ذره	-	θ_1	زاویه تماس	°
δ	وزن مخصوص مایع	Kg/m ³	ϕ_a	زاویه بحرانی چسبیدن که آن $t_s = t_i$ در	rad	d_p	قطر ذره	m
σ	کشش سطحی مایع	Kg/s ²	t_s	زمان سرخوردن	s	$d_{p_{max}}$	بزرگترین اندازه ذره ای که شناور می‌شود	m
μ	گرانروی مایع	Kg/m/s	t_i	زمان القاء	s	X, Y, M	پارامترهای مدل برای توده حباب‌ها	-
g^*	شتاب گرانش	m/s ²	ϕ_c	زاویه برخورد	rad	X_0, Y_0, M_0	پارامترهای توصیف کننده شرایط جریان آب نزدیک حباب منفرد	-
C	عدد بیان کننده اثر گرانش	-	a^*, b^*, c^*	پارامترهای مدل	-	$X_\epsilon, Y_\epsilon, M_\epsilon$	پارامترهای توصیف کننده تأثیر ماندگی گاز هر حباب در توده حباب‌ها	-
C_1	عدد بیان کننده اثر اینرسی	-	a, b	پارامترهای مدل	-			-

+ شتاب گرانش در رابطه (۲۵) بر حسب cm/s² است.

پی نوشت

- 1 Schulze
- 2 Flow tube
- 3 Projection area
- 4 Nguyen
- 5 Gravitational collision
- 6 Interceptional collision
- 7 Inertial impaction
- 8 Turbolant collision
- 9 Induction time
- 10 Dislodge
- 11 Turbulent inertial forces
- 12 Dodecylamine
- 13 Polypropylenglycol
- 14 Interception umber
- 15 Overall encounter efficiency
- 16 Mobile surface
- 17 Woodburn
- 18 Collection efficiency
- 19 Ralston
- 20 Washburn