

بررسی تاثیر تیغه‌گذاری در ستون فلوتاسیون با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی دو فازی

نرجس خراسانی‌زاده^۱، اکبر فرزنانگان^{۲*}، قنبرعلی شیخ‌زاده^۳، حسین خراسانی‌زاده^۴

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، n_khorasany92@yahoo.com

۲- دانشیار دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، farzanegan@ut.ac.ir

۳- دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، sheikhz@kashanu.ac.ir

۴- دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، khorasan@kashanu.ac.ir

(دریافت ۱۴ دی ۱۳۹۲، پذیرش ۶ بهمن ۱۳۹۳)

چکیده

تحقیقات نشان داده است که اختلاط در ستون فلوتاسیون کاهش بازیابی ماده معدنی را در پی دارد. در این تحقیق با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی تاثیر تیغه‌گذاری بر اختلاط محوری در ستون فلوتاسیون به صورت دو فازی بررسی شده است. برای میدان محاسباتی از ستونی با مقطع دایره‌ای شکل به طول ۳/۲ متر و قطر ۱۰ سانتی‌متر استفاده شده است. به منظور کاهش حجم محاسبات و ساده‌سازی مساله ستون از ابتدا پر از آب فرض شده در شرایطی که هوا از سطح جانبی یک حباب‌ساز به طول ۱۵ و قطر ۱ سانتی‌متر وارد آن می‌شود. برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی، یک سری آزمایش تجربی با شرایط یاد شده در آزمایشگاه کانه‌آرایی دانشگاه کاشان انجام گرفته است. شبیه‌سازی‌ها به صورت سه بعدی با مدل دو فازی اولرین برای ستون بدون تیغه و نیز ستونی با تیغه‌ای عمود بر مقطع آن انجام گرفته است. مقادیر فشار روی دیواره در ارتفاع ۰/۲ و ۲/۶ متری ستون بدون تیغه با مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایش تجربی مقایسه و تطابق آن‌ها با تفاوت کم‌تر از ۰/۶٪ محرز شد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی مربوط به ستون با تیغه و بدون تیغه نشان می‌دهد که تیغه‌گذاری سرعت محوری آب را حداکثر تا ۱۷٪ کاهش می‌دهد و به دنبال آن اختلاط محوری کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی

فلوتاسیون ستونی، اختلاط محوری، تیغه‌گذاری، شبیه‌سازی، دینامیک سیالات محاسباتی، شبیه‌سازی چند فازی.

۱- مقدمه

است. گانگ و همکاران [۱۳] با توجه به اینکه کیفیت اختلاط در یک تانک همزن بر کارایی آن موثر است، به شبیه‌سازی عددی با کمک نرم‌افزار فلونت و بررسی تجربی تاثیر حضور تیغه‌ها در تانک پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد در حضور تیغه‌ها مقاومت سیال افزایش و سرعت کاهش یافته و زمان اختلاط طولانی‌تر می‌شود.

اسکاپرداس و همکاران [۱۴] هم برای بررسی مناسب‌ترین مکان برای تزریق هوا، در تانک فلوتاسیون، تاثیر حضور حباب‌هایی با اندازه‌های متفاوت، نقش تیغه‌های مایل و نرخ ورود پالپ به شبیه‌سازی دو فازی یک تانک فلوتاسیون پرداختند. از آنجایی که در مطالعه اسکاپرداس و همکاران [۱۴] آزمایشات تجربی به منظور اعتبارسنجی علمی نتایج نرم‌افزاری وجود نداشته است، در شبیه‌سازی از سه مدل چندفازی استفاده کرده‌اند؛ که البته در اکثر موارد نتایج هم‌خوانی داشته است. از جمله نتایج ایشان این بود که تیغه‌گذاری با زاویه، چندان که به‌نظر می‌رسد کارایی را بهبود نمی‌بخشد.

ژیا و همکاران [۱۵] با استناد به اینکه حضور تیغه‌ها در ستون فلوتاسیون باعث کاهش اختلاط محوری می‌شود، با استفاده از روش CFD این اثر را در ستون فلوتاسیون بدون تیغه‌گذاری، ستون تیغه‌گذاری شده (به صورت صفحاتی موازی افق و ستونی با تیغه‌های کناری زیگ‌زاگ مانند) به صورت دو فازی و با رویکرد اولر-لاگرانژ شبیه‌سازی کردند. نتایج پنگ و همکاران [۱۵] نشان داد که نیروی بالاروی حباب دلیل اصلی به وجود آمدن برگشت سیال در ستون می‌باشد و هر دو نوع تیغه‌گذاری با ایجاد افت فشار در امتداد محور، اثر برگشت سیال را کاهش می‌دهد.

هدف از این تحقیق بررسی تاثیر تیغه‌گذاری در کاهش اختلاط می‌باشد و بدین منظور سرعت محوری که عامل اصلی برگشت آب در ستون و ایجاد اختلاط محوری می‌باشد برای دو وضعیت با تیغه و بدون تیغه مقایسه شده است.

۲- شرح آزمایش‌ها

برای اعتبارسنجی نتایج مدلسازی‌ها از داده‌های تجربی حاصل از آزمایش با ستون فلوتاسیون آزمایشگاهی دانشگاه کاشان استفاده شده است؛ در ادامه توضیحاتی مربوط به این ستون و تجهیزات آن و نحوه انجام آزمایش‌ها ارائه می‌شود.

در ستون‌های فلوتاسیون با قطر بزرگ، اختلاط محوری جریان سیال رخ می‌دهد که باعث کاهش بازایی ماده معدنی شده و در نهایت کارایی واحد فرآوری را تقلیل می‌دهد. با بکارگیری تیغه‌ها می‌توان تا حدودی این مشکل را برطرف کرد [۱]. در واقع حضور تیغه‌ها در یک ستون فلوتاسیون، آن را به چند ستون موازی تقسیم کرده و باعث افزایش نسبت ارتفاع به قطر ناحیه جمع‌آوری می‌شود، در نتیجه جریان سیال به سمتی می‌رود که از مدل واکنشگر پیستونی کامل پیروی کند و همین امر باعث افزایش کارایی فلوتاسیون ستونی می‌شود [۵-۲].

اعمال هرگونه تغییری در صنعت نیاز به یک پشتوانه علمی دارد که می‌توان آن را با انجام آزمایشات تجربی و یا شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای بدست آورد. اما از آنجایی که انجام آزمایشات تجربی همواره با مشکلاتی از قبیل کمبود امکانات، سنگین بودن هزینه‌ها و یا حتی عدم امکان اعمال برخی تغییرات به صورت آزمایشی همراه است، انجام شبیه‌سازی و استفاده از روش‌های عددی اهمیت دوچندان می‌یابد. دینامیک سیالات محاسباتی (Computational Fluid Dynamics) شامل تحلیل سیستم‌های مربوط به جریان سیال و انتقال حرارت براساس شبیه‌سازی رایانه‌ای می‌شود. درواقع ساختار برنامه‌های مربوطه برپایه روش عددی است؛ به طوری که بعد از تولید هندسه موردنظر، میدان محاسباتی به سلول‌های کوچکی تقسیم شده و بعد از انتخاب مجموعه پدیده‌های فیزیکی و شیمیایی که باید مدل شوند و تعریف خواص سیال و شرایط مرزی، حل عددی برای یافتن سرعت، فشار، دما و متغیرهای دیگر در گره‌های داخلی هر سلول انجام می‌شود [۸-۶].

در صنعت فرآوری بخش‌های زیادی وجود دارند که شناخت دقیق وضعیت سیال به واسطه حضور آب به‌همراه ذرات جامد، به بهبود عملکرد واحدها کمک می‌کند. آسیاهای تر، هیدروسیکلون، فلوتاسیون، لیچینگ و استخراج حلال، تیکر و ته‌نشینی و فیلتراسیون از جمله این بخش‌ها هستند. به عنوان مثال بیشترین مطالعات در بخش هیدروسیکلون‌ها برای بررسی فرایند جدایش، هندسه خاص هیدروسیکلون و تعیین سرعت‌های مماسی و محوری بهینه، تخمین ستون هوای مرکزی و... انجام شده است [۹-۱۲].

در زمینه تیغه‌گذاری در تجهیزات فلوتاسیون نیز تحقیقاتی با رویکرد شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی انجام شده

۱-۲- ستون فلوتاسیون

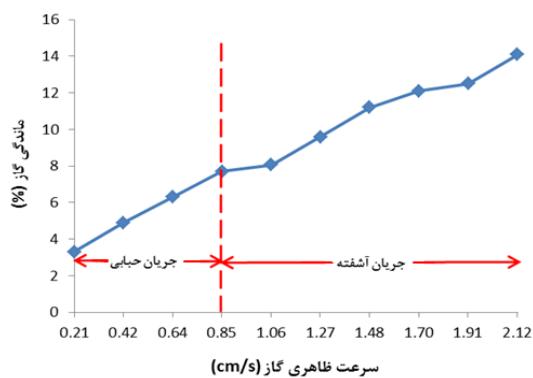
آزمایش‌های فلوتاسیون با استفاده از یک ستون فلوتاسیون آزمایشگاهی با قطر ۱۰ و ارتفاع ۴۰۰ سانتی‌متر انجام شده است. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده، این سیستم فلوتاسیون ستونی شامل تانک ۱۰۰ لیتری خوراک، دو پمپ پریستالتیک برای اندازه‌گیری و کنترل دقیق دبی خوراک و باطله و دو جریان‌سنج برای تنظیم دبی هوادهی و آب شستشو است. خوراک پس از آماده‌سازی در مخزن خوراک به‌وسیله پمپ با دبی مشخص از ارتفاع ۸۰ سانتی‌متری لبه بالایی ستون وارد می‌شود. این ستون مجهز به سیستم کنترل اتوماتیک و مانیتورینگ است و برای ثابت نگه‌داشتن ارتفاع کف، پمپ باطله به طور اتوماتیک کنترل می‌شود. سه حسگر فشار به ترتیب در ارتفاع ۳۰، ۱۲۰ و ۳۸۰ سانتی‌متری از لبه بالایی ستون قرار گرفته‌اند. داده‌های خام به دست آمده از حسگرها پس از پردازش، برای محاسبه پارامترهای هیدرودینامیکی (ماندگی گاز، دانسیته ناحیه جمع آوری، دانسیته ناحیه کف) با استفاده از روابط موجود استفاده می‌شوند [۱۷ و ۱۶].

جدول ۱: مقادیر اندازه‌گیری شده فشار و ماندگی گاز در آزمایش‌ها

Q_g (L/min)	p_1 (kPa)	p_2 (kPa)	ε_g (%)
۱	۲۹,۳۰	۳,۹۲	۰,۵۰
۲	۲۸,۸۳	۳,۹۱	۲,۳۰
۳	۲۸,۴۰	۳,۷۹	۳,۲۰
۴	۲۸,۰۳	۳,۷۸	۴,۹۰
۵	۲۷,۸۵	۳,۷۶	۵,۶۰
۶	۲۷,۴۸	۳,۷۱	۶,۸۰
۷	۲۶,۹۵	۳,۶۲	۸,۵۰
۸	۲۶,۷۰	۳,۵۹	۹,۴۰
۹	۲۶,۵۶	۳,۵۳	۹,۷۰
۱۰	۲۶,۵۸	۳,۵۲	۱۱,۴۰

۲-۳- تعیین محدوده جریان حبابی

از آنجا که عملکرد مطلوب ستون در رژیم جریان حبابی است [۴]، تغییرات ماندگی نسبت به تغییرات سرعت ظاهری گاز بررسی می‌شود. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، زمانی که سرعت ظاهری گاز، g از 0.85 سانتی‌متر بر ثانیه (معادل دبی ورودی ۴ لیتر بر دقیقه) بیشتر می‌شود، ماندگی گاز ناپایدار شده و جریان آشفته می‌شود.



شکل ۲: تغییرات ماندگی گاز نسبت به افزایش سرعت ظاهری گاز

در فلوتاسیون ستونی و برای محدوده جریان حبابی، براساس تئوری جابجایی شار سرعت نسبی بالا آمدن حباب (U_{sg}) توسط رابطه (۱) بیان می‌شود:



شکل ۱: نمایی از ستون فلوتاسیون آزمایشگاهی مورد استفاده

۲-۲- شرایط آزمایش و نتایج

پس از اطمینان از پایداری جریان در داخل ستون، مقادیر فشار و ماندگی ثبت می‌شود. نتایج آزمایشات برای دبی‌های مختلف هوا (از ۱ تا ۱۰ لیتر بر دقیقه) در فشار اتمسفر و دمای هوای اتاق (۲۳ درجه سانتی‌گراد) در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

U_b سرعت حدی روبه بالای یک حباب است. اگر در رابطه (۱) ماندگی گاز صفر فرض شود، آنگاه:

$$U_b = \frac{g d_b^2 (\rho_l - \rho_b)}{18 \mu_l (1 + 0.15 \text{Re}_{bs}^{0.687})} \quad (6)$$

اگر ε_g و J_g معلوم باشند می توان d_b را تخمین زد. روش به این صورت است که مقادیر تخمینی d_b در رابطه (۲) گذاشته می شوند تا زمانی که U_{sg} به دست آمده از این رابطه، با مقدار محاسبه شده از رابطه (۱) برابر شود [۲۰]. استفاده از روابط (۲) تا (۶) برای زمانی که ماندگی گاز کمتر از ۳۰٪ است، مناسب است [۲۱].

نتایج مربوط به محاسبه ابعاد حباب در محدوده جریان حبابی و رینولدز بر اساس روابط (۱) تا (۶) در جدول ۲ ارائه شده است.

لازم به ذکر است که شبیه سازی ها هم در محدوده ی جریان حبابی و برای چهار J_g (۰,۲۱، ۰,۴۲، ۰,۶۴، ۰,۸۵) انجام شده است.

۳- شبیه سازی

در این پژوهش ساخت هندسه و شبکه بندی میدان محاسباتی در نرم افزار گمبیت ۲,۳,۱۶ و شبیه سازی ها در نرم افزار انسیس فلونت ۱۴,۰ انجام شده است.

۳-۱- معادلات حاکم

به منظور مدل کردن جریان سیال در هر سیستمی، به دست آوردن معادلات حاکم بر آن سیستم مورد نیاز است.

موازنه جرم و موازنه مومنتوم قسمت های اصلی این مدل سازی هستند. با فرض سیال تراکم ناپذیر، معادلات حاکم متوسط گیری شده و به شکل روابط (۷) و (۸) و (۹) در می آیند.

$$U_{sg} = \frac{J_g}{\varepsilon_g} - \frac{J_l}{1 - \varepsilon_g} \quad (1)$$

که J_g سرعت ظاهری گاز، J_l سرعت ظاهری مایع و ε_g ماندگی گاز است. رابطه (۱) همراه با معادله عمومی ته نشینی با مانع برای جریان غیراستوکسی به صورت زیر است [۱۸]:

$$U_{gs} = \frac{g d_b^2 (\rho_l - \rho_b) (1 - \varepsilon_g)^{m-1}}{18 \mu_l (1 + 0.15 \text{Re}_{bs}^{0.687})} \quad (2)$$

رابطه (۲) می تواند برای تخمین میانگین اندازه حباب در ناحیه جمع آوری استفاده شود [۱۹]، که در آن g شتاب گرانش، d_b قطر حباب، ε_g ماندگی گاز، ρ_b چگالی حباب، ρ_l چگالی مایع و μ_l ویسکوزیته مایع است. یک روش تکرار در قطع دادن با رابطه (۲) که برای عدد رینولدز حباب (Re_{bs}) ارائه شده است، به کار می رود:

$$\text{Re}_{bs} = \frac{d_b U_{gs} \rho_l (1 - \varepsilon_g)}{\mu_l} \quad (3)$$

و m عبارت است از [۱۸]:

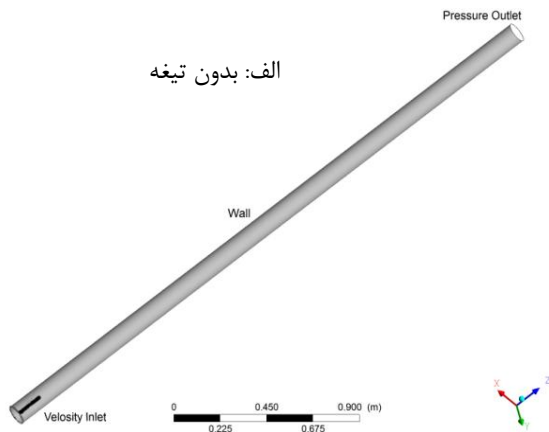
$$\begin{aligned} 200 < \text{Re}_b < 500, \quad m &= 4.45 \text{Re}_b^{-0.1} \\ \text{Re}_b < 200, \quad m &= (4.45 + 18 \left(\frac{d_b}{d_c} \right)) \text{Re}_b^{-0.1} \\ \text{Re}_b > 500, \quad m &= 2.39 \end{aligned} \quad (4)$$

Re_{bs} اشاره به عدد رینولدز برای تک حباب در حال بالا آمدن در یک مایع دارد که با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می شود:

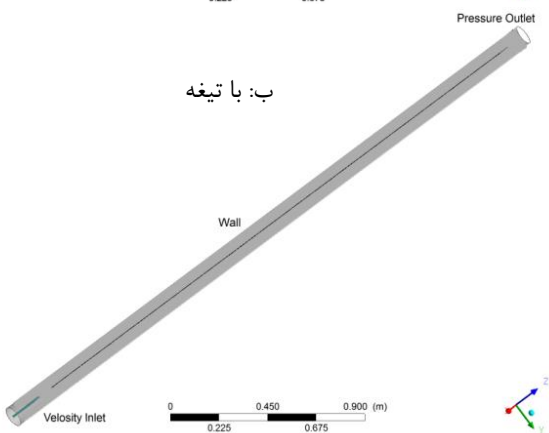
$$\text{Re}_b = \frac{d_b \cdot U_b \cdot \rho_l}{\mu_l} \quad (5)$$

جدول ۲: نتایج محاسبه ابعاد حباب و رینولدز جریان در محدوده رژیم جریان حبابی

Q_g (L/min)	J_g (cm/s)	d_b (mm)	U_{sg} (m/s)	Re_{bs}	U_b (m/s)	Re_b
۱	۰,۲۱	۰,۷	۰,۰۶	۳۶,۰۷	۰,۰۷	۳۸,۷۹
۲	۰,۴۲	۱	۰,۰۸	۶۰,۰۶	۰,۰۹	۶۶,۶۹
۳	۰,۶۴	۱,۴	۰,۱۰	۸۹,۳۰	۰,۱۱	۱۰۰,۹۸
۴	۰,۸۵	۱,۹	۰,۱۱	۱۰۵,۸۰	۰,۱۲	۱۲۲,۶۵

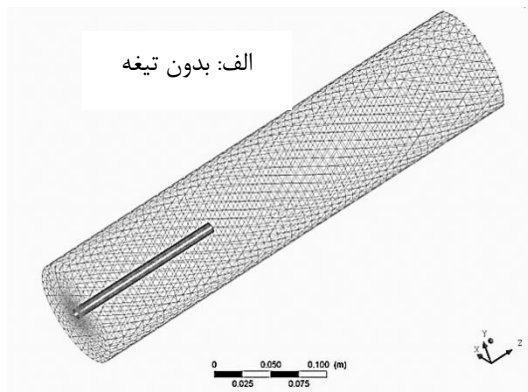


الف: بدون تیغه



ب: با تیغه

شکل ۳: هندسه ستون در وضعیت بدون تیغه و با تیغه



الف: بدون تیغه

$$u = \langle u \rangle + u' \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij}^{Re}) + \rho g_i$$

در روابط بالا u معرف سرعت متوسط (u_i و u_j به ترتیب نشان دهنده ی سرعت در راستای محور x و y هستند)، u' مولفه نوسانی سرعت، ρ دانسیته سیال، t زمان، P فشار، ویسکوزیته سیال و τ_{ij}^{Re} معرف تنش های رینولدز است که به کمک معادلات آشفتگی تعیین می شود [۶].

۳-۲- هندسه

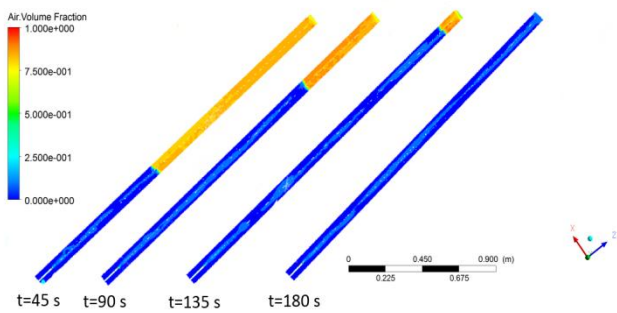
هندسه حل منطبق بر ستون فلوتاسیون آزمایشگاهی است که از نتایج آن برای اعتبارسنجی استفاده شده است؛ در هندسه ستون با تیغه نیز فرض شده است که صفحه ای به طول $2/8$ متر، عرض 10 سانتی متر و ضخامت 4 میلی متر با فاصله ی 10 سانتی متر از حباب ساز و انتهای ستون در آن قرار دارد. در شکل ۳ هندسه ستون نشان داده شده است.

۳-۳- شبکه بندی

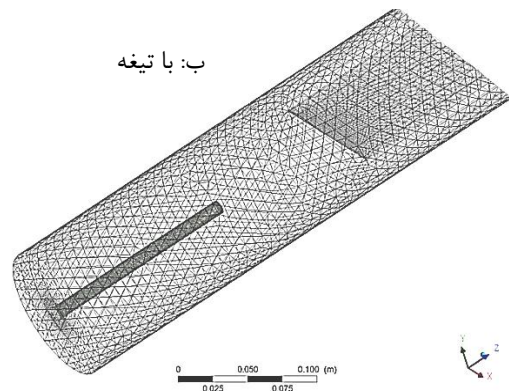
برای شبکه بندی ستون از سلول های چهاروجهی به دلیل پرکنندگی خوبی که برای گوشه ها دارد استفاده شده است. نمایی از شبکه بندی ستون در شکل ۴ مشاهده می شود.

۳-۴- شرط همگرایی

باید مدت زمانی که لازم است شبیه سازی انجام شود تا از همگرایی نتایج اطمینان حاصل شده و پس از آن نتایج بررسی شود، تعیین شود. به همین منظور دو مقطع افقی نزدیک ورودی (ارتفاع $0/5$ و 1 متری) و دو مقطع افقی نزدیک خروجی (ارتفاع $2/5$ و 3 متری) تعریف شده و در طول حل مقدار تغییرات لحظه ای دبی هوای عبوری از این مقاطع بررسی شده است. وقتی تغییرات نرخ هوای عبوری از این مقاطع نسبت به زمان به صفر میل نماید، همگرایی مورد نظر محقق شده است.



شکل ۶: کانتورهای کسر حجمی هوا در صفحه میانی ستون در زمان‌های مختلف، وضعیت با تیغه



شکل ۴: شبکه‌بندی ستون در وضعیت بدون تیغه و با تیغه

۴- نتایج و بحث

۴-۱ شرایط حل

در این بخش به تشریح مهم‌ترین شرایط در نظر گرفته شده پرداخته می‌شود:

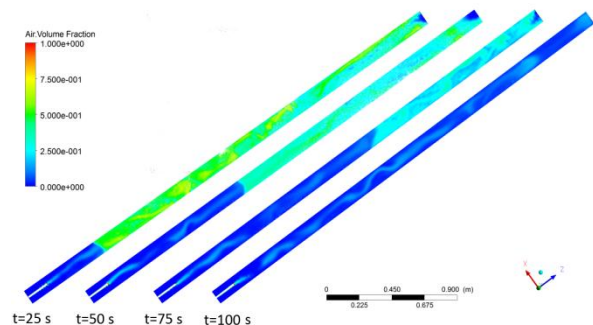
- **جریان گذرا:** با توجه به اینکه پس از ورود هوا به ستون مدت زمانی طول می‌کشد تا خواص و شاخص‌های جریان (مانند سرعت و فشار) در یک نقطه خاص نسبت به زمان ثابت شوند، بنابراین کلیه شبیه‌سازی‌ها به صورت گذرا انجام می‌شود. با توجه به اینکه مسائل غیر دائم شروع حالت گذرای خیلی سریعی دارند که به سرعت از بین می‌رود [۲۲]؛ و با توجه به لزوم وجود پایداری و دقت در حل مساله، برای هر شبیه‌سازی کل زمان حل به سه قسمت تقسیم شده است: ۱۰ ثانیه‌ی ابتدایی با گام زمانی ۰/۰۰۵ ثانیه، ۴۰ ثانیه بعدی با گام زمانی ۰/۰۱ ثانیه و مابقی با گام زمانی ۰/۰۵ ثانیه حل شده‌اند.

- **جریان آشفته:** با توجه به مقادیر محاسبه شده برای رینولدز (۳۸/۷۹ - ۱۲۲/۶۵ در محدوده جریان حبایی)، و اینکه جریان‌های دو فاز با رینولدزهای کم‌تر از ۱۰۰ در حال گذر از آرام به آشفته هستند [۲۳]، در کلیه شبیه‌سازی‌ها باید از یک مدل آشفتگی استفاده شود. از آنجا که تحقیقات نشان داده است مدل $k-\epsilon$ Realizable توانایی خوبی در مدلسازی آشفتگی در محدوده گذر از جریان آرام به آشفته را دارد [۲۴]، همین مدل در شبیه‌سازی‌ها اعمال شده است.

- **جریان دو فاز:** کلیه شبیه‌سازی‌ها با در نظر گرفتن دو فاز آب و هوا و اعمال مدل دو فاز انجام شده‌اند. از آنجایی که هدف از این پژوهش تعیین فصل مشترک بین دو فاز و

در وضعیت بدون تیغه ملاحظه می‌شود که پس از ۱۰۰ ثانیه، در کلیه شبیه‌سازی‌ها همگرایی محقق شده است و می‌توان به بررسی نتایج پرداخت. لازم به ذکر است که شبیه‌سازی ۱۰۰ ثانیه از جریان در ستون فلوتاسیون با شرایط گفته شده، با یک رایانه‌ی هفت هسته‌ای، حدود ۱۳ روز طول کشید. در شکل ۵ تغییرات لحظه‌ای کسر حجمی هوا در صفحه میانی ستون نشان داده شده است.

در وضعیت با تیغه نیز پس از شبیه‌سازی ۱۸۰ ثانیه از جریان، در کلیه شبیه‌سازی‌ها همگرایی محقق شد. شبیه‌سازی ۲۰۰ ثانیه از جریان در ستون فلوتاسیون با شرایط گفته شده، با یک رایانه‌ی هفت هسته‌ای، حدود ۱۵ روز طول کشید. در شکل ۶ تغییرات لحظه‌ای کسر حجمی هوا در صفحه میانی ستون نشان داده شده است.



شکل ۵: کانتورهای کسر حجمی هوا در صفحه میانی ستون در زمان‌های مختلف، وضعیت بدون تیغه

سرعت ورودی از تقسیم دبی هوای ورودی بر سطح جانبی حباب‌ساز به دست می‌آید:

$$V_{inlet} = \frac{Q_g}{A_{inlet}} \quad (12)$$

نتایج محاسبات سرعت ورودی هوا به ازای دبی‌های مختلف در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

جدول ۴: سرعت هوای ورودی به ازای دبی‌های مختلف

Q_g (L/min)	V_{inlet} (m/s)
۱	۰,۰۰۷
۲	۰,۰۱۴
۳	۰,۰۲۱
۴	۰,۰۲۸

• سایر شرایط و فرضیات:

- در کلیه موارد، شبیه‌سازی در شرایطی انجام شده است که شیر ورودی خوراک و خروجی باطله بسته بوده و فقط هوا وارد یک ستون پر از آب شده است؛ تا از طولانی و پیچیده شدن محاسبات جلوگیری شود.
- میدان محاسباتی فقط شامل ناحیه جمع‌آوری است و زون کف شبیه‌سازی نشده است.
- حباب‌ها کروی شکل فرض شده‌اند.
- در کلیه شبیه‌سازی‌ها شتاب گرانش به اندازه‌ی ۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه منظور شده است.

۴-۲- شبکه بهینه

برای حصول اطمینان از اینکه نتایج بدست آمده مستقل از اندازه شبکه است، نیاز به بررسی تاثیر اندازه شبکه است. به منظور تعیین شبکه بهینه در وضعیت بدون تیغه از شبکه‌های مختلف استفاده شده است و مطالعه تغییرات فشار و ماندگی گاز در ارتفاع ۰/۲ متری مبنا قرار گرفته است و نتایج در جدول ۵ ارائه شده‌اند. از آنجایی که با افزایش تعداد شبکه به بیش از ۳۸۱،۴۸۱ مقدار فشار فقط ۰/۲۱٪ تغییر می‌کند و مقدار

کسر حجمی هر یک از فازها است، رویکرد اولر انتخاب می‌شود.

از آنجایی که تفاوت مدل اولرین و مخلوط تنها در حجم محاسبات بوده و مدل اولرین از دقت بالاتری برخوردار است [۲۷-۲۵]، در ابتدا مدل اولرین (Eulerian) و VOF (Volume Of Fluid) هر دو مدل‌های مناسبی به نظر رسیدند. به همین دلیل شبیه‌سازی با هر دو مدل انجام شد و در نهایت با مقایسه نتایج مدل مناسب انتخاب شد. این موضوع در بخش ۴-۳ بحث شده است.

مشخصات آب و هوا به عنوان سیالات استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها در جدول ۳ ملاحظه می‌شود.

لازم به ذکر است که از آب به عنوان فاز اولیه (پیوسته) و از هوا به عنوان فاز ثانویه (گسسته) استفاده شده است.

جدول ۳: مشخصات سیالات استفاده شده در شبیه‌سازی

	μ (kg/m.s)	ρ (kg/m ³)
Water	۰,۰۰۱۰۰۳	۱۰۰۰
Air	۱,۷۸۹۴e-۵	۱,۲۲۵

• شرایط مرزی: سطح جانبی حباب‌ساز به عنوان ورودی

سرعت (Velocity Inlet) و محل ورود هوا به ستون تعریف شده و مقطع بالایی ستون به عنوان خروجی فشار (Pressure Outlet) تعریف شده‌اند.

مقادیر قرار داده شده برای سرعت با توجه به مساحت سطح جانبی حباب‌ساز و درصد تخلخل آن که ۵۰٪ می‌باشد محاسبه شده است. در ادامه روابطی که به این منظور استفاده شده است، ارائه می‌شود.

سطح جانبی حباب‌ساز از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود؛ که در آن D قطر و l طول حباب‌ساز است.

$$A_{sparger} = \pi D l + \frac{\pi D^2}{4} \quad (10)$$

که برای در نظر گرفتن درصد تخلخل، در ۵۰٪ ضرب می‌شود.

$$A_{inlet} = 50\% A_{sparger} \quad (11)$$

مشاهدات تجربی نزدیک‌تر است، از مدل اولرین برای انجام همه شبیه‌سازی‌های این تحقیق استفاده شده است.

۴-۵ بررسی صحت نتایج

در جدول ۸ مقادیر فشار عددی و تجربی در ارتفاع ۰/۲ و ۲/۸ متر با هم مقایسه شده‌اند. همانطور که ملاحظه می‌شود مقدار خطا کمتر از ۱/۴٪ است؛ و به همین دلیل از اعتبار نتایج شبیه‌سازی‌ها اطمینان حاصل می‌شود.

۴-۶ بررسی اثر تیغه‌گذاری در کاهش اختلاط محوری

از آنجایی که جریان هوا در مقطع ستون متقارن نیست، برای بررسی تغییرات سرعت محوری آب، یک صفحه افقی نزدیک خروجی (در ارتفاع ۳ متری) از ستون انتخاب شده است. در شکل ۷ کانتورهای سرعت محوری آب در این صفحه، در حالت با تیغه و بدون تیغه برای سرعت‌های ظاهری مختلف هوا مشاهده می‌شود. همانطور که ملاحظه می‌شود با تیغه‌گذاری در ستون، مقدار سرعت محوری آب کاهش پیدا کرده است.

هم‌چنین برای بررسی بهتر اثر تیغه‌گذاری بر اختلاط، مقادیر بیشینه و کمینه سرعت محوری آب برای سرعت‌های ظاهری مختلف هوا، در حالت بدون تیغه و با تیغه محاسبه و در جدول ۹ ارائه شده است.

ماندگی گاز تنها ۰/۱۲٪ تغییر دارد. برای این شبکه می‌توان حل را مستقل از تعداد شبکه در نظر گرفت.

نتایج مربوط به بهینه‌سازی شبکه برای وضعیت با تیغه در جدول ۶ ارائه شده‌اند. ملاحظه می‌شود که در وضعیت با تیغه با افزایش ابعاد شبکه به بیش از ۳۸۵،۵۷۷ مقدار فشار فقط ۰/۲۱٪ تغییر می‌کند، بنابراین با استفاده از شبکه با ۳۸۵،۵۷۷ گره می‌توان حل بدست آمده را مستقل از ابعاد شبکه در نظر گرفت.

۴-۳- انتخاب مدل دوفازی مناسب

برای انتخاب مدل مناسب دو فازی مناسب دو مورد شبیه‌سازی با $J_g=0.42$ (cm/s) یکی با مدل دو فازی اولرین و دیگری VOF برای وضعیت بدون تیغه انجام شده و نتایج مربوط به فشار P_1 و P_2 در کنار نتایج تجربی در جدول ۷ ارائه شده‌اند.

با مقایسه نتایج در جدول ۷ و با توجه به اینکه مدل دو فازی اولرین خطای کم‌تری در پیش‌بینی مقادیر فشار داشته، و هم‌چنین نمایش توزیع هوا در ستون مربوط به این مدل به

جدول ۵: مقدار P_1 و ϵ_g برای شبکه‌های مختلف در وضعیت بدون تیغه

تعداد مش‌ها	P_1 (kPa)	درصد اختلاف	ϵ_g (%)	درصد اختلاف
۲۰۳،۴۴۱	۲۹،۱۵	-۰،۶۹	۰،۹۵	۰،۱۷
۳۸۱،۴۸۱	۲۸،۹۵	-۰،۲۱	۱،۶۳	۰،۱۲
۶۶۷،۵۲۲	۲۸،۸۹		۱،۸۳	

جدول ۶: مقدار P_1 و ϵ_g برای شبکه‌های مختلف در وضعیت با تیغه

تعداد مش‌ها	P_1 (kPa)	درصد اختلاف	ϵ_g (%)	درصد اختلاف
۲۸۹،۶۹۸	۲۹،۱۶	-۰،۳۱	۰،۹۲	۰،۳۳
۳۸۵،۵۷۷	۲۹،۰۷		۱،۲۲	
۷۸۸،۵۴۴	۲۸،۰۱	۰،۲۱	۱،۴۳	۰،۱۷

جدول ۷: مقایسه توانایی مدل‌های دو فازی VOF و Eul در پیش بینی مقادیر فشار P_1 و P_2 در وضعیت بدون تیغه

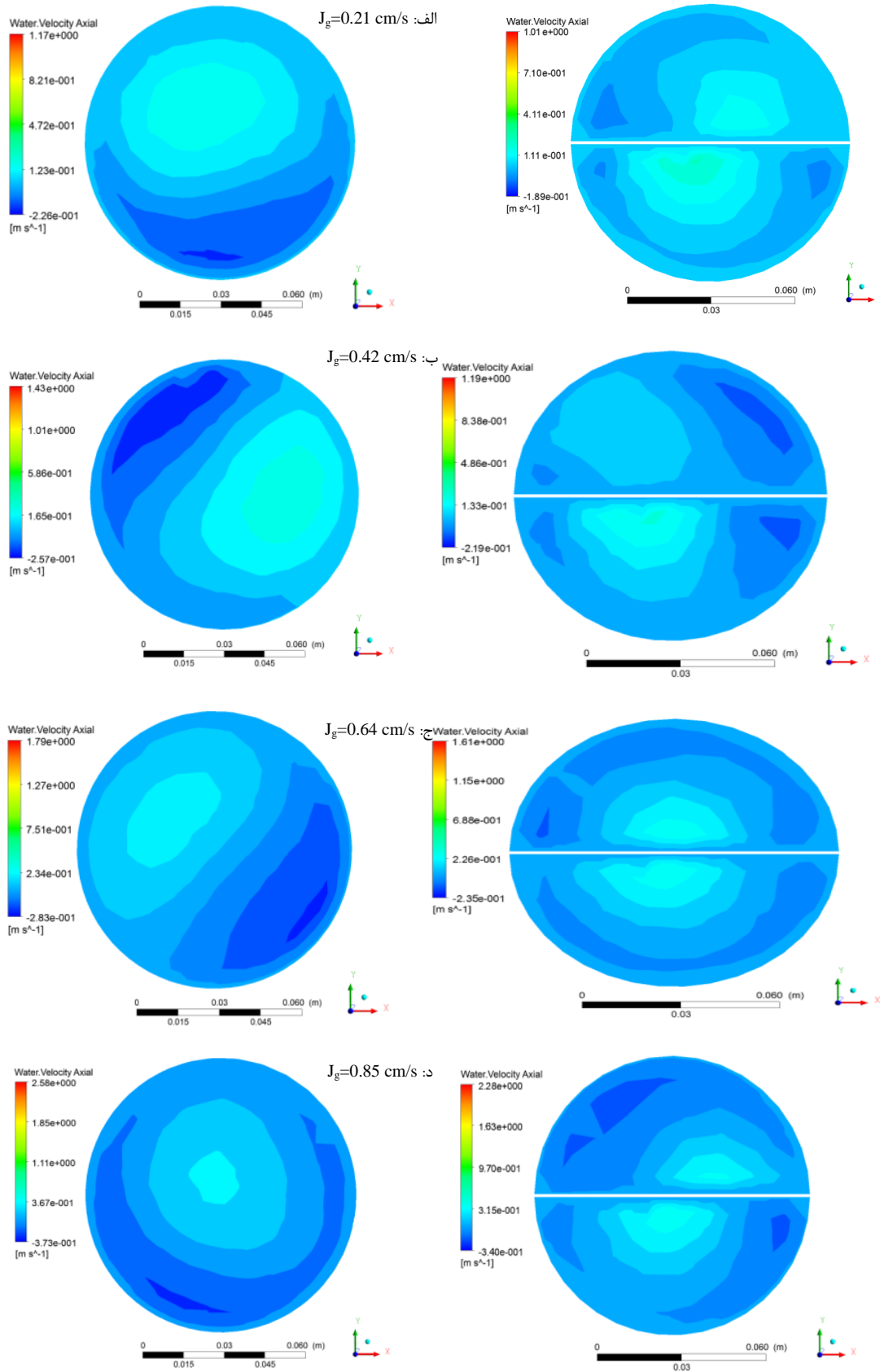
	VOF			Eul	
	تجربی	عددی	درصد اختلاف	عددی	درصد اختلاف
P_1 (kPa)	۲۸,۸۳	۲۸,۱۲	-۲,۴۶	۲۸,۹۵	۰,۴۳
P_2 (kPa)	۳,۹۱	۳,۷۹	-۳,۰۷	۳,۸۶	-۱,۲۸

جدول ۸: مقایسه مقادیر عددی و تجربی P_1 و P_2 در وضعیت بدون تیغه

J_g (cm/s)	P_1 (kPa)			P_2 (kPa)		
	عددی	تجربی	درصد اختلاف	عددی	تجربی	درصد اختلاف
۰,۲۱	۲۹,۱۵	۲۹,۳۰	-۰,۵۱	۳,۸۹	۳,۹۲	-۰,۷۷
۰,۴۲	۲۸,۹۵	۲۸,۳۸	۰,۴۳	۳,۸۶	۳,۹۱	-۱,۲۸
۰,۶۴	۲۸,۲۷	۲۸,۴۰	-۰,۴۴	۳,۷۵	۳,۷۹	-۱,۰۶
۰,۸۵	۲۷,۸۷	۲۸,۰۳	-۰,۵۸	۳,۷۱	۳,۷۶	-۱,۳۳

جدول ۹: مقایسه تغییرات سرعت محوری آب در اثر تیغه‌گذاری

J_g (cm/s)	(m/s) کمینه سرعت محوری آب			(m/s) بیشینه سرعت محوری آب		
	بدون تیغه	با تیغه	درصد اختلاف	بدون تیغه	با تیغه	درصد اختلاف
۰,۲۱	-۰,۲۳	-۰,۱۹	-۱۶,۳۷	۱,۱۷	۱,۰۱	-۱۳,۶۸
۰,۴۲	-۰,۲۶	-۰,۲۲	-۱۴,۷۹	۱,۴۳	۱,۱۹	-۱۶,۷۸
۰,۶۴	-۰,۲۸	-۰,۲۳	-۱۶,۹۶	۱,۷۹	۱,۶۱	-۱۰,۰۶
۰,۸۵	-۰,۳۷	-۰,۳۴	-۸,۸۵	۲,۵۸	۲,۲۸	-۱۱,۶۳



شکل ۷: کانتورهای سرعت محوری آب در ارتفاع ۳ متری ستون، در وضعیت بدون تیغه و با تیغه برای سرعت‌های ظاهری مختلف گاز

که با افزایش دبی هوای ورودی و سرعت ظاهری هوا، اختلاط محوری در ستون شدت پیدا می‌کند. در اثر تیغه‌گذاری، مقادیر بیشینه و کمینه سرعت تا ۱۷٪ کاهش پیدا می‌کند، که این امر نشان دهنده کاهش اختلاط محوری در اثر تیغه‌گذاری است. در واقع تیغه‌ها با ایجاد افت فشار در راستای محور ستون، باعث کاهش ماندگی گاز می‌شوند.

۶- تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از آقای مهندس فرجی مسئول محترم آزمایشگاه کانه‌ارایی دانشگاه کاشان و آقای مهندس کریمی دانشجوی دکترای فرآوری به خاطر همکاری صمیمانه در انجام آزمایشات و شبیه‌سازی‌ها تشکر و قدردانی می‌نمایند.

فهرست علائم

علائم	دبی گاز
Q_g (L/min)	دبی گاز
p_1 (kPa)	فشار در ارتفاع ۲۰ سانتی‌متری ستون
p_2 (kPa)	فشار در ارتفاع ۲۸۰ سانتی‌متری ستون
ε_g (%)	ماندگی گاز در ستون فلوتاسیون
J_g (cm/s)	سرعت ظاهری گاز
d_b (mm)	قطر حباب
Re_{bs}	عدد رینولدز حباب
Re_b	عدد رینولدز برای تک حباب
U_b (m/s)	سرعت حدی روبه بالای یک حباب
U_{sg} (m/s)	سرعت نسبی روبه بالای یک حباب
u (m/s)	سرعت متوسط
u' (m/s)	مولفه نوسانی سرعت
ρ (kg/m ³)	دانسیته سیال
μ (kg/m.s)	لزجت سیال
τ_{ij}^{Re}	تنش‌های رینولدز
P (pa)	فشار
$A_{sparger}$ (m ²)	سطح جانبی حباب‌ساز
A_{inlet} (m ²)	سطح ورودی هوا در حباب‌ساز
V_{inlet} (m/s)	سرعت ورودی هوا

مشاهده می‌شود که مقادیر بیشینه و کمینه سرعت محوری آب در وضعیت با تیغه همیشه کمتر از شرایطی است که تیغه وجود نداشته باشد. همچنین در جدول ۱۰ مقادیر مختلف ماندگی گاز در وضعیت بدون تیغه و با تیغه برای سرعت‌های ظاهری مختلف گاز ملاحظه می‌شود. چنانچه دیده می‌شود میزان ماندگی در شرایط وجود تیغه کمتر است. وجود تیغه باعث افزایش افت فشار در راستای محور ستون می‌شود و به تبع آن ماندگی گاز نیز کاهش پیدا می‌کند.

جدول ۱۰: مقایسه مقادیر ماندگی گاز در ستون بدون تیغه و با تیغه

J_g (cm/s)	ε_g (%)		درصد اختلاف
	بدون تیغه	با تیغه	
۰,۲۱	۰,۸۸	۰,۳۷	۵۷,۹۵
۰,۴۲	۱,۶۲	۱,۲۲	۲۴,۶۹
۰,۶۴	۳,۹۳	۲,۴۸	۳۹,۶۰
۰,۸۵	۵,۳۱	۴,۴۵	۱۶,۲۰

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر تیغه‌گذاری بر اختلاط محوری در ستون فلوتاسیون مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور ابتدا با مقایسه نتایج شبیه‌سازی بدست آمده با استفاده از مدل‌های دو فازی اولرین و VOF، مدل دو فازی اولرین برگزیده شد. سپس شبیه‌سازی‌ها با هندسه سه بعدی و اعمال مدل دو فازی اولرین و مدل آشفتگی k-ε Realizable، برای سرعت‌های ظاهری مختلف هوا در محدوده جریان حبابی انجام گرفت. پس از مقایسه نتایج بدست آمده با مقادیر تجربی حاصل از آزمایشات انجام شده در آزمایشگاه کانه‌ارایی دانشگاه کاشان و احراز صحت نتایج شبیه‌سازی‌ها برای وضعیت بدون تیغه، با بررسی مقدار سرعت محوری آب در وضعیت‌های ستون بدون تیغه و با تیغه، اختلاط محوری در دو حالت مقایسه شد. نتایج نشان داد

مراجع

pulp-mixing process with addition accessory", Communications and networks (CCENet), International Conference, pp. 1260-1263.

[14] Emmanouil, V., Skaperdas, E.P., Karapantsios, T.D. and Matis K.A., 2007, "Two-phase simulations of an off-nominally operating dissolved-air flotation tank", Int. J. Environment and Pollution, Vol. 30, pp. 213-226.

[15] Xia, Y., Peng, F.F. and Wolfe, E., 2006, "CFD simulation of alleviation of fluid back mixing by baffles in bubble column", Minerals Engineering, Vol. 19, pp. 925-937.

[16] Saffari, A., 2011. "Design and Construction of a Column Flotation Cell", Technical Report, University of Kashan.

[17] Darabi, H., 2012. "A study on possibility of replacing mechanical flotation cell with column cell for sulphidic zinc cleaning stage at Bama plant". M. Sc. Thesis, University of Kashan.

[18] Yianatos, J.B., 1988a, "Bubble Size Estimation in a Bubble Swarm", Journal of Colloidal and Interface Science, Vol. 126, pp. 37-44.

[19] Richardson, J.F. and Zaki, W.N., 1954, "Sedimentation and Fluidization, Part I", Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Vol. 32, pp. 35-52.

[20] Yianatos, J.B., Laplante, A.R. and Finch, J.A., 1985, "Estimation of Local Holdup in the Bubbling and Froth Zones of a Gas-Liquid Column", Chemical Engineering Science, Vol. 40, pp. 1965-1968.

[21] Marrucci, G., 1965, "Rising Velocity of Spherical Bubbles", I & EC Fundamentals, Vol. 4, p. 224.

[22] Dehghanisani, M.A., 2008, "Simulation with Fluent 6.3.2", Tehran, Naghoos Andisheh Publications.

[23] Clift, R., Grace, J.R., and Weber, M.E., 1978, "Bubbles, Drops, and Particles", Academic Press, New York.

[24] Theodore J. and Heindel F.B., 2003, "Modeling flotation separation in a semi batch process", Chemical Engineering Science, Vol. 58, pp. 353-356.

[25] Crowe, C., Sommerfield, M. and Tsuji Y., 1998, "Multiphase flow with droplets and particles", CRC Press.

[1] Kawatra, S.K. and Mokrousov, V. A.; 1963; "An Introduction to the Theory of Flotation", London, Butterworths.

[2] Rice, R.G., Oliver, A.D., Newman, J.P. and Wiles, R.J., 1974, "Reduced dispersion using baffles in column flotation", Powder Tech., Vol. 10, pp. 201-210.

[3] Rice, R.G., Tupperanien, J.M.I. and Hedge, R.M., 1981, "Dispersion and holdup in bubble columns comparison of rigid and flexible spargers", Canadian J. Chem. Eng., Vol. 59, p. 677.

[4] Finch, J.A. and Dobby, 1991, "Column Flotation - A Selected Review. part I", International Journal of Mineral Processing, Vol. 33, pp. 343-354.

[5] Finch, J.A., 1990, "Column Flotation", New York, Pergamon Press.

[6] Shojaeifard, M.H. and Noorpoor, A.R., 2000, "An introduction to CFD", Tehran, Iran University of science & technology.

[7] Ferziger M., and Peric, J.H., 1996, "Computational Methods for Fluid Dynamics", Springer.

[8] Anderson, D., Tannehill, J. and Pletcher R., 1984, "Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer", New York, McGraw-Hill Book Company.

[9] Louis J. Mittoni and Phillip Schwarz M., 1998, "Computational Fluid Dynamics As A Tool In The Minerals Processing And Metal Production Industries", Melbourne CSIRO Minerals, 13th Australian Fluid Mechanics Conference.

[10] Gholami, M., 2011. "Numerical simulation of flow in heavy media cyclones using Fluent Software". M. Sc. Thesis, University of Tehran.

[11] Karimi M., Dehghani A., Nezam A. and Talebi Sh., 2010, "Prediction of hydrocyclone performance using artificial neural networks", The Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 110, pp. 207 - 212.

[12] Karimi, M., Dehghani, A. and Talebi, S., 2010. "Prediction of hydrocyclone air-core dimensions using computational fluid dynamics (CFD)". Iranian J. Mining Eng. Vol. 5, No. 10, pp. 31-38.

[13] Wang L., Yan X.k., Zhang H.j. and Li Z., 2011, "Experimental and numerical study on the stirred

[28] Hormozi, F. and Haghghi-Asl, A., 2005, "*CFD Modeling of bubble size distribution in bubble columns*", 10th National Iranian Chemical Engineering Congress, University of Sistan and Baloochestan.

[26] Bakker, A., 2002, "*Applied Computational Fluid Dynamics*", FLUENT INC.

[27] Brennen, Christopher E., "*Fundamentals of Multiphase Flows*", Cambridge University Press, 2005.