Construction Science and Technology
Volume 7, Issue 1

Optimization of operational parameters using the Computational Fluid Dynamics method in Raff-R cells (case study: Sungun copper complex)

Behrad Abdollahzadeh[1] , Behrad Abdollahzadeh[1] , Behrad Abdollahzadeh[1]

[1] Khatam Al Anbia, Amin Institute, Urmia, Iran
[2] Khatam Al Anbia, Amin Institute, Urmia, Iran
[3] Chemical engineering, faculty of chemical and petroleum engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

R T I C L E I N F O

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 2025 January 20

Accepted: 2025 May 17

* Correspondence Email Addres:

behrad0217@gmail.com

Keywords:
Flotation;
Computational Fluid Dynamic;
Copper Concentration;
Turbulency;

A B S T R A C T

The performance of flotation cells is influenced not only by their geometric properties but also by operational parameters, including feed rate, inlet air flow rate, and impeller rotation speed. In this study, the optimization of these parameters in the rougher flotation cells of the slag flotation unit of the Sungun Copper Complex has been carried out using ANSYS FLUENT simulation software. To enhance the precision and comprehensiveness of the optimization results, Design Expert software was employed, resulting in the determination of optimal operational parameter values to minimize stress on the cell walls while maintaining an acceptable level of turbulence and mixing for cell efficiency. Evaluation results indicate that in terms of turbulence and flow mixing within the cell, there is a very slight difference between impeller rotation speeds of 9.3 rad/s and 12.3 rad/s (the obtained optimal parameter and the designed operational parameter). However, the force exerted on the cell walls at an impeller rotation speed of 9.3 rad/s is calculated to be 96371.22 Newtons, whereas for an impeller rotation speed of 12.3 rad/s, it is 159515.36 Newtons. At an impeller rotation speed of 9.3 rad/s, with feed rate of 28 kg/s and inlet air flow rate of 0.41 m^3/s, maximum turbulence and minimum force on the cell body were achieved. Consequently, by reducing the impeller rotation speed significantly, the stress on the cell walls can be notably reduced. Overall, through the optimizations, decrease in costs related to the repair, maintenance, and depreciation of these cells is anticipated.

Cite this article: Mohammadi Bazargani, S., Hasanzadeh, A., & Nejatbakhsh, S. (2025). Optimization of operational parameters using the Computational Fluid Dynamics method in Raff-R cells (case study: Sungun copper complex).. Construction science and technology, 6(1), 21-34. **DOI** 20.1001.1.29812577.1404.6.1.8.2

Publisher: Imam Hussein University

«مجله علمی علوم و فنون سازندگی»

سال چهارم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۴، صفحه ۲۱ الی ۳۴

علمی– تخصصی

بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی با استفاد از روش CFD در سلول‌های رافر(مطالعه موردی: مجتمع مس سونگون)

سجاد محمدی بازرگانی[1*]، امیر حسن زاده، سیامک نجات بخش

[1] دکترای تخصصی، قرارگاه سازندگی خاتم الانبیا، موسسه امین، ارومیه، ایران

[2] کارشناسی ارشد، قرارگاه سازندگی خاتم الانبیا،موسسه امین، ارومیه، ایران

[3] کارشناسی ارشد، مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۱، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۷)

چکیده

عملکرد سلول‌های فلوتاسیون علاوه بر ویژگی‌های هندسی‌شان، تحت تاثیر پارامترهای عملیاتی می‌باشد که از جمله آن‌ها می‌توان به دبی خوراک، دبی هوای ورودی به سلول و سرعت چرخش پروانه اشاره کرد. در این پژوهش برای بهینه‌سازی پارامترهای فوق در سلول‌های رافر واحد فلوتاسیون سرباره ذوب مجتمع مس سونگون، از نرم‌افزار شبیه‌سازیANSYS FLUENT استفاده شده است. برای دقیق‌تر و جامع‌تر شدن نتایج بهینه‌سازی، از نرم افزار طراحی آزمایش Design Expert استفاده و در نهایت مقادیر بهینه پارامترهای عملیاتی برای کسب کمترین میزان تنش وارده بر دیواره سلول در عین حفظ میزان آشفتگی و اختلاط قابل قبول برای حفظ راندمان سلول حاصل شد. نتایج ارزیابی‌ها نشان داد که در بحث آشفتگی و اختلاط جریان سلول تفاوت بسیار ناچیزی مابین سرعت چرخش پروانه ۹/۳rad/s و ۱۲/۳rad/s (پارامتر بهینه به دست آمده و پارامتر عملیاتی طراحی شده) وجود دارد ولی نیروی وارد بر دیواره سلول زمانی که سرعت چرخش پروانه rad/s ۹/۳ باشد برابر با ۹۶۳۷۱/۲۲ نیوتن خواهد بود، در حالی که این عدد برای سرعت چرخش پروانه ۱۲/۳rad/s، ۱۵۹۵۱۵/۳۶ نیوتن محاسبه شده است. در سرعت چرخش پروانه ۹/۳rad/s، دبی خوراک ورودی ۲۸kg/s و دبی هوای ورودی ۰/۴۱m3/s حداکثر آشفتگی و حداقل نیروی وارد بر بدنه سلول به دست آمد در نتیجه با کاهش سرعت چرخش پروانه، می‌توان بطور قابل توجهی تنش وارد بر دیواره را کاهش داد. در مجموع با بهینه‌سازی‌های انجام گرفته در این تحقیق پیش‌بینی می‌شود هزینه‌های مربوط به تعمیر، نگهداری و استهلاک این سلول‌ها کاهش یابد.

کلید واژه‌ها: فلوتاسیون، دینامیک سیالات محاسباتی، تغلیظ مس، آشفتگی

۱. مقدمه

صنعت مس یکی از بزرگترین صنایع کشور ایران به حساب می‌آید و برای افزایش ارزش افزوده کنسانتره مس تغلیظ شده از روش ذوب استفاده می‌شود. با اینحال سرباره واحد ذوب مس همواره حاوی مقادیر زیادی مس می‌باشد که با استفاده از روش‌های کارآمد می‌توان نسبت به جداسازی آن اقدام کرد. در بین روش‌های موجود، فلوتاسیون همواره بیشترین استفاده را در این صنعت داشته است. با اینحال بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی سلول‌های فلوتاسیون فرآیند پیچیده‌ای می‌باشد که بستگی به پارامترهای مختلف مانند هزینه، بازده فرآیند، طول عمر تجهیزات و همچنین مشخصات خوراک واحد بستگی دارد.

سرباره‌های مس به دلیل ظرفیت تولید و عیار مس بالا و همچنین خواص مکانیکی و مقاومتی خاص، پسماند محسوب نمی‌شوند و بازیابی مس موجود در آن‌ها هم از لحاظ زیست محیطی و هم از لحاظ اقتصادی بسیار حائز اهمیت می‌باشد [۱]. بلکه خود دارای پتانسیل بالای تولید کنسانتره مس از این مواد می‌باشند. فلوتاسیون در مقایسه با سایر روش‌های بازیابی مس از سرباره‌ها، از لحاظ فنی و اقتصادی برتری محسوسی به دیگر روش‌ها دارد. با استفاده از روش فلوتاسیون امکان دستیابی به کنسانتره‌های با عیار ٪۳۰ از سرباره مس با عیار حدود ۱ درصد فراهم است [۲].

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

فلوتاسیون یکی از روش‌های فرآوری مواد معدنی است که بر مبنای خواص شیمی-فیزیکی سطوح جامدات برای ذرات ۲۰- ۲۰۰ مش در یک محیط سیال و جریان هوا برای ایجاد حباب های مناسب بنا شده است.

طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های مختلف مکانیکی، نیازمند انجام آزمایش‌ها و تست‌های مختلف است. این آزمایش‌ها و طراحی‌های مجددی که در پی دارند، معمولا بسیار پرهزینه و زمان‌بر هستند و فرایند طراحی و ساخت را با چالش‌های زیادی رو به رو می‌کنند. به همین دلیل، به مرور و با بهبود توان محاسباتی کامپیوترها، تمایل مهندسان برای شبیه‌سازی فرایندهای مختلف مکانیکی افزایش پیدا کرد. این روش از مزایای بسیاری برخوردار است. برای مثال به دلیل قابلیت شبیه‌سازی دقیق، کاهش نیاز به آزمایشات آزمایشگاهی گران قیمت را فراهم می‌کند. علاوه بر این، می‌تواند زمان و هزینه‌های مرتبط با طراحی و بهینه‌سازی فرآیندها را کاهش دهد. با استفاده از مدل‌سازی محاسباتی، محققان و مهندسان می‌توانند نتایج سریعتری بدست آورند و تأثیر تغییرات مختلف را بر روی فرآیندها و محصولات بررسی کنند [۳].

ساختار اصلی مسائل وابسته به انتقال حرارت و سیالات، معادلات حاکمی هستند که به صورت مستقیم از قوانین بقای خواص فیزیکی سیال ناشی می‌شوند. قوانین بقا شامل سه قانون در تمام مسائل مکانیک سیالات هستند. قانون اول قانون بقای جرم است که با معادله پیوستگی نشان داده می‌شود، قانون دوم؛ قانون بقای مومنتوم را نشان می‌دهد که با استفاده از معادله مومنتوم و قانون دوم نیوتن قابل محاسبه هستند و قانون سوم، بقای انرژی را نشان می‌دهد. یکی از نرم‌افزار های توسعه یافته در این زمینه نرم افزار ANSYS FLUENT می‌باشد که یک ابزار قدرتمند برای شبیه‌سازی سیالات می‌باشد [۴].

امروزه ابزار شبیه‌سازی یکی از قدرتمندترین ابزار برای بررسی و بهینه‌سازی پارامترهای مختلف در فرآیندهای فلوتاسیون به شمار می‌رود [۵]. در این تحقیق نیز برای بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی سلول‌های فلوتاسیون واحد سرباره ذوب مجتمع مس سونگون از نرم‌افزار ANSYS Fluent استفاده گردید. این روش در این مجتمع برای اولین بار مورد استفاده قرار می‌گیرد و نتایج حاصل را نه تنها می‌توان در این واحد استفاده کرد بلکه از این کار می‌توان به عنوان پایه‌ای برای پروژه‌های آتی در این مجتمع استفاده کرد.

۲. روش تحقیق

در مورد استفاده از CFD[1] برای شبیه‌سازی سلول‌ها و فرآیند فلوتاسیون تحقیقات بسیاری به عمل آمده است و پارامترهای مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. در بسیاری از تحقیقات، پارامترهای مختلف از جمله رژیم جریان، مقایسه و محاسبه میزان برخورد در قسمت‌های مختلف سلول، سرعت و برخوردها در نقاط مختلف سلول و پخش شدگی فازها و... بررسی شده‌اند که نشانگر گستردگی کاربرد و زمینه‌های قابل بررسی توسط این نرم افزار در زمینه سلول‌های فلوتاسیون می‌باشد.

برای مثال، کوه و همکارانش نشان دادند فلوتاسیون را می‌توان به سه فرآیند فرعی شامل برخورد، اتصال و جدا شدن تقسیم کرد. این گروه از مدل اختلاط آشفته برای شبیه‌سازی CFD استفاده کردند. میزان برخورد در قسمت‌های مختلف سلول محاسبه و مقایسه شد. مقادیر ثابت‌های سرعت بدست‌آمده از مدل‌سازی CFD نشان داد که نرخ‌های انتقال ذرات حباب به لایه کف ممکن است به طور قابل توجهی به نرخ شناورسازی کلی به ویژه در تجهیزات در مقیاس کارخانه کمک کند [۶].

در اکثر عملیات فرآوری مواد معدنی، شکاف بزرگی بین مقیاس صنعتی و مقیاسی که در آن عملکردهای مهم فرآوری انجام می‌شود (مقیاس حباب‌ها، ذرات، قطرات، سطوح، و...) وجود دارد. بنابراین مدل‌سازی در مقیاس خرد برای پیش بینی دقیق یک مدل صنعتی می‌تواند ابزار مفیدی باشد. شبیه‌سازی می‌تواند به منظور بررسی تاثیر تغییرات کلان در عملیات (اختلاط ورودی‌های انرژی، نرخ خوراک، ویژگی‌های خوراک و ...) بر عملکرد فرآیند باشد. در این راستا، شووارز و همکارانش سلول فلوتاسیون FROTH را به عنوان یک نمونه مورد بررسی قرار دادند [۷]. وانگ و همکارانش در مطالعه‌ای؛ شبیه‌سازی جریان آشفته وابسته به زمان را با روش CFD بررسی کردند، که می‌تواند جریان مایعات، گازها و ذرات را در تجهیزات شبیه‌سازی کند تا جزئیات مورد نیاز برای بهبود عملکرد فرآیند ارائه شود. مزیت این رویکرد پتانسیل مدل‌سازی هر سلولی در هر مقیاسی است که جزئیات زیادی مانند سرعت‌های داخلی، پارامترهای آشفتگی، توزیع فازها، اندازه حباب‌ها و توزیع زمان اقامت را ارائه می‌کند. اثر آشفتگی بر فرآیند فلوتاسیون را می‌توان در هنگام افزایش مقیاس سلول‌های فلوتاسیون از مقیاس آزمایشگاهی به مقیاس صنعتی در نظر گرفت. با توجه به موارد فوق، مدل‌سازی محاسباتی برای طراحی و بهینه‌سازی سلول‌های فلوتاسیون، علاوه بر بررسی‌های نظری و تجربی، ضروری است [۸]. ارزیابی مدار فلوتاسیون یک کار پیچیده و چالش برانگیز است وباید چندین متغیر که از خوراک مربوط تا تجهیزات و فرآیند متغیر است، بررسی و ارزیابی شود. بهینه‌سازی زمانی پیچیده می‌شود که متغیرهای متعددی مانند: نوع سنگ، درصد جامد پالپ، جریان حجمی، عمق کف، نرخ جریان هوا، نوع و دوز معرف‌ها،

[1] Computational Fluid Dynamic

pH و ... در شبیه سازی بررسی گردد. متغیرها به یکدیگر وابسته بوده و یافتن شرایط بهینه فرآیند در این سناریو امری تقریبا ناممکن است. ابزارهای شبیه‌سازی فلوتاسیون با استفاده از مدل‌های مبتنی بر فرآیند و CFD ابزار خوبی برای کمک به تجزیه و تحلیل عمیق‌تر مدار فلوتاسیون هستند، به‌عنوان مثال شناسایی پارامترهای عملیات ایده‌آل، نقاط احتمالی مسائل (مربوط به سلول/فرآیند) و ... [۹]. در مجموع با اطلاعات بدست آمده واضح است که CFD به عنوان یک ابزار کارآمد در عملیات کانه آرایی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

سیلوا و همکارانش در یک تحقیق اهمیت انتخاب نقطه نمونه برداری مناسب در داخل سلول فلوتاسیون هنگام جمع آوری اطلاعات اندازه حباب را نشان دادند. نتایج شبیه‌سازی‌های CFD توسط نتایج تجربی تایید شدند. نتایج توزیع ترجیحی/متفاوت اندازه حباب را در مکان‌های مختلف سلول نشان داد، توزیع ریز اندازه حباب و مواد جامد در سیستم باعث افزایش نگهداری هوا به طور کلی می‌شوند. در مجموع شبیه‌سازی به روش CFD یک ابزار عالی برای بهینه‌سازی فرآیند است و تطابق خوبی با داده‌های واقعی از یک سلول رافر در یک کارخانه مس نشان داد [۱۰].

کوه و همکارانش اثر سرعت پروانه بر جریان هوا در یک سلول فلوتاسیون آزمایشگاهی با سیستم خود هوادهی دنور را با استفاده از مدل‌سازی CFD مورد بررسی قرار دادند. هوا در اثر چرخش پروانه به داخل دوغاب القا می‌شود. میزان جریان هوا توسط فشار مکش ایجاد شده توسط پروانه، هد هیدرواستاتیک دوغاب و تلفات اصطکاکی در امتداد شفت شیر ورودی به پروانه تعیین می‌شود. شبیه‌سازی‌های دو فازی سلول فلوتاسیون در سرعت‌های مختلف پروانه، نرخ‌های جریان هوای پیش‌بینی‌شده با مقادیر اندازه‌گیری‌شده گزارش‌شده در گزارشات توافق مطلوبی نشان دادند. در اثر افزایش سرعت پروانه، سرعت جریان هوا و نگهداری گاز در سلول افزایش یافت. شبیه‌سازی با سینتیک فلوتاسیون نشان داد که نیروی گرانشی وارد بر ذرات متصل شده قابل توجه است [۱۱].

در راستای پروژه‌های قرارگاه خاتم در حوزه صنایع معدنی به ویژه صنعت مس و همچنین فراوانی این عنصر در کشور، شناخت و بهینه‌سازی فرآیندهای تغلیظ مس از اهمیت بالایی برخوردار است. همین طور امکان بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی مانند دبی جریان، سرعت چرخش پروانه و ... به روش تجربی در صنعت نیازمند زمان و هزینه‌های بالایی می‌باشد. همچنین روش‌های محاسباتی دقت کافی و لازم را ندارند. لذا روشی جامع و جایگزین برای بررسی عوامل ذکر شده مورد نیاز است. به وسیله ابزارهای شبیه‌سازی می‌توان اطلاعات دقیق‌تر و جزئیات بیشتری بدست آورد. طبق تحقیقات به عمل آمده در این زمینه، در ایران مطالعه‌ای در مورد رژیم جریان و دینامیک جریان داخلی در سلول‌های فلوتاسیون رافر و تاثیر جریان بر دیواره‌ها صورت نگرفته است. در این پژوهش برای اولین بار سلول‌های نسل جدید مورد استفاده در واحد فلوتاسیون سرباره ذوب مجتمع مس سونگون توسط نرم افزار شبیه‌سازی ANSYS FLUENT شبیه‌سازی شدند تا بتوان پارامترهای عملیاتی آنها شامل دبی خوراک، دبی هوای ورودی و سرعت چرخش پروانه را بهینه‌سازی کرد. لذا این پروژه می‌تواند پایه‌ای برای استفاده در صنایع مس در بخش‌های مختلف باشد تا علاوه بر شناخت پارامترهای تاثیرگذار در این زمینه، نسبت به بهبود و بهینه‌سازی آن‌ها اقدام شود. همچنین این پژوهش می‌تواند پایه‌ای برای تحقیقات بعدی در این زمینه قرار گیرد.

۲-۱- نرم افزارهای مورد استفاده

در این پژوهش از نرم افزار GAMBIT برای ایجاد هندسه و مش‌بندی و از نرم افزار ANSYS FLUENT برای شبیه‌سازی دینامیک جریان و تحلیل داده‌ها و از نرم‌افزار Design Expert برای بهینه‌سازی و تحلیل نتایج استفاده شده است.

۲-۲- اطلاعات هندسی و مش‌بندی

بعد از کسب اطلاعات هندسی سلول رافر مجتمع مس سونگون، شکل هندسی در نرم افزار Gambit رسم و سپس شبکه نامنظم (Unstructured Mesh) بر روی شکل هندسی اعمال شد. در مرحله بعدی سایزهای مختلف مش‌بندی بر سیستم اعمال شد تا مش‌بندی بهینه بدست آید. بدین معنی که نتایج اولیه حاصل از شبیه‌سازی وابسته به سایز شبکه انتخاب شده نباشد. نهایتا شبکه بهینه شده به نرم افزار فلوئنت انتقال داده شد.

۲-۳- شبیه‌سازی CFD

در این پژوهش شبیه‌سازی‌ها در محیط نرم افزار ANSYS FLUENT 22 انجام گرفت. نرم‌افزار ANSYS Fluent یک نرم‌افزار شبیه‌سازی جریان سیال است که بر اساس معادلات ناویر-استوکس عمل می‌کند.

۲-۴- تعریف خوراک ورودی و هوا

برای تعریف خوراک ورودی در حالت ابتدایی، از سیال آب استفاده شد با این تفاوت که دانسیته سیال $۲۲۰۰kg/m^3$ و ویسکوزیته آن $۰/۲ kg/m.s$ تعریف شد [۱۲] تا به شرایط سیال پالپ نزدیک‌تر باشد. همچنین مقدار Surface tension بین آب و هوا ۰/۰۵ لحاظ شده است [۱۳]. برای بهتر شدن برهمکنش‌های بین هوا و آب در سلول که به نوعی مهم‌ترین پدیده موجود در

سلول می‌باشد از مدل VOF (Volume of Fluid) استفاده شد. هوای ورودی نیز از طریق ورودی‌های تعبیه شده در اطراف پروانه وارد سلول شدند. مدل VOF یکی از روش‌های شبیه‌سازی CFD است که برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی رفتار سیالات چند فازی استفاده می‌شود. در این مدل، محلول مورد مطالعه به تعدادی فاز تقسیم می‌شود و حجم مخصوص هر فاز در هر نقطه از دامنه محاسبه می‌شود. هر فاز با استفاده از معادلات ناویر-استوکس و یک معادله حفظ جرم مستقل از فازهای دیگر شبیه‌سازی می‌شود. مدل VOF برای شبیه‌سازی و تحلیل فرآیند فلوتاسیون بسیار مناسب است [۱۴].

۲-۵- تعریف پروانه و چرخش سیال

برای تعریف حرکت و چرخش پروانه دو حالت وجود دارد: اولی استفاده از مش متحرک (Dynamic mesh) و دومی استفاده از Reference Frame motion است. حالت اول بدلیل بالا بردن قابل توجه حجم محاسبات و همچنین وجود خطاهای احتمالی استفاده نشد و بجای آن در اطراف پروانه یک محوطه متحرک تعریف شد که با تعریف سرعت برای این ناحیه در واقع همان چرخش در پروانه شبیه‌سازی می‌شود. نتایج مربوط به این مورد در فصل نتایج بخوبی بحث و بررسی شده است.

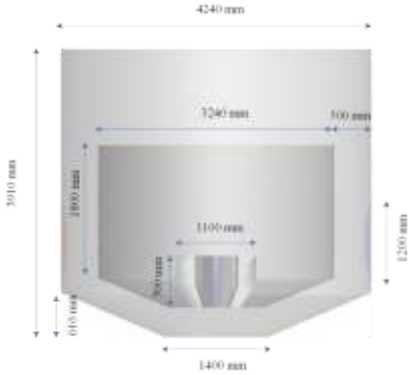
۲-۸ - محل انجام کار

همانطورکه اشاره شد در این تحقیق به عنوان مطالعه موردی سلول‌های رافر واحد فلوتاسیون سرباره ذوب مس در مجتمع مس سونگون انتخاب شدند. این واحد دارای ۳ مرحله ذوب به صورت سری می‌باشد. که سرباره مرحله اول که مربوط به کوره‌ی DSB (Double sided blown) می‌باشد، با عیار مس متوسط ۱/۸٪ برای افزایش عیار ابتدا جمع آوری شده سپس بعد از یک مرحله خردایش اولیه، وارد واحد فلوتاسیون سرباره این واحد می‌شود. در این بخش بعد از نرمایش توسط آسیا نیمه خودشکن (سگمیل) و بال میل و کنترل ابعاد توسط دو عدد هیدروسیکلون اندازه ذرات به استاندارد خوراک فلوتاسیون d80-40 می‌رسد. سپس این خوراک وراد conditioner tank شده و در نهایت پس از افرودن مواد مورد نیاز، وارد اولین سلول رافر می‌گردد. که در ادامه مسیر فلوتاسیون شامل انواع سلول‌های رمق‌گیر و کلینر و ... را طی کرده و کنسانتره مس ۲۲٪ خارج می‌گردد. مشخصات کلی خوراک سلول رافر اولیه این واحد که موضوع پژوهش فعلی نیز می‌باشد، در جدول ۱ ذکر شده است.

جدول ۱. مشخصات خوراک سلول رافر

دبی طراحی	۱۲۵ تن بر ساعت
دبی متوسط	۹۷/۶۸ تن بر ساعت
عیار مس موجود	۱/۸٪
درصد جامد پالپ	۲۵-۴۵٪
اندازه ذرات جامد	۴۰ میکرون
دبی طراحی کنسانتره خروجی	۶/۷۷ تن بر ساعت
دبی متوسط کنسانتره خروجی	۵/۲۹ تن بر ساعت
عیار کنسانتره خروجی	۲۲/۲۲٪

شکل ۱ نشان دهنده شماتیک و ابعاد و جزئیات سلول‌های رافر واحد سرباره ذوب مجتمع مس سونگون می‌باشد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، این سلول‌ها ساختار متفاوت و جدیدی دارند و خوراک وارد شده بر سلول مستقیما وارد بخش اختلاط و پروانه نمی‌شود و درون سلول توسط یک جداره داخلی به دو قسمت ناحیه اختلاط و ناحیه آرام اطراف سلول تقسیم شده است. همچنین لازم به ذکر است حجم مفید کلی این سلول‌ها ۴۰ متر مکعب می‌باشد.



شکل ۱. شماتیک کلی سلول‌های رافر مورد استفاده

۳. نتایج و بحث

در مدل سازی سه بعدی، سیستم با مش منظم (structured) از نوع mixed tetra-hex مش‌بندی شد که این نوع مش برای هندسه‌های کروی و استوانه‌ای مانند بسیار مناسب است. همچنین برای بررسی استقلال از شبکه، ۴ مش مختلف استفاده شد که نتایج حاصل از آن در جدول ۲ آورده شده است. بنا به شرایط مسئله و وجود آشفتگی زیاد در درون سیستم و همچنین ناحیه‌های مختلف از جمله ناحیه آرام مابین دو جداره داخلی و

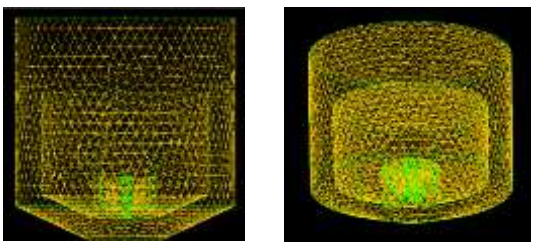
خارجی، ناحیه بسیار پرسرعت اطراف پروانه و ناحیه نسبتا آرام نیمه بالایی سلول که در بردارهای سرعت مستخرج از شبیه‌سازی‌ها نیز مشخص است، تعیین پارامتر سرعت به عنوان مرجع امکان‌پذیر نبود برای همین منظور از پارامتر درصد آشفتگی متوسط حجم سلول برای مقایسه این مش‌ها استفاده شد [۱۵, ۱۶]. همانطورکه از داده‌های جدول ۲ مشخص است، با ریزتر شدن مش از شماره ۲ به ۳ تعداد مش‌ها و به تبع آن حجم محاسبات افزایش قابل توجهی دارند ولی دقت محاسبات تغییر محسوسی ندارند لذا مش ۲ به عنوان مش بهینه انتخاب شد.

جدول ۲. اطلاعات مربوط به استقلال از شبکه

شماره شبکه	تعداد مش	شدت آشفتگی متوسط حجم سلول (٪)	درصد تفاوت نسبت به مش شماره ۴
۱	۱۷۴۲۹	۲۱۷/۱۵۱	۰/۰۵۸
۲	۴۶۲۰۴	۲۲۸/۵۳۱	۰/۰۰۹
۳	۷۹۹۱۰	۲۳۰/۱۳۰	۰/۰۰۲
۴	۱۱۰۲۹۸	۲۳۰/۶۲۱	۰

شکل ۲ نمایانگر تصاویر مش‌بندی سلول توسط نرم‌افزار گمبیت است. همانطورکه در شکل ۴ الف مشاهده می‌شود سلول در حالت کلی متشکل از دیواره خارجی، دیواره داخلی و پروانه می‌باشد که ورودی و خروجی نیز روی دیواره خارجی تعبیه شده است و در مجموع منظم بودن مش‌ها، انتخاب مناسب مش را نشان می‌دهد.

الف) ب)



شکل ۲. تصاویر مربوط به مش‌بندی توسط نرم‌افزار Gambit

۳-۱- همگرایی روش حل

برای همگرا شدن محاسبات در محیط نرم افزار ANSYS FLUENT روش‌های مختلفی وجود دارد که در این شبیه‌سازی نیز از آن‌ها استفاده شد [۱۷]. در گام اول کوپلینگ فشار-سرعت بروی SIMPLEC و همچنین مقدار پارامتر Skewness correction بر روی ۵ تنظیم شد. معادله مومنتوم در مقایسه با سایر معادلات حساسیت بالایی به روش‌های عددی دارد. لذا برای گسسته‌سازی (Discretization) معادلات مومنتوم ابتدا از مدل first order upwind و سپس برای افزایش دقت شبیه‌سازی‌ها بر روی second order upwind تنظیم شد. ولی برای مدل آشفتگی از مدل first order upwind استفاده شد. همچنین بعد از چندین بار شبیه‌سازی و واگرایی حل مسئله، under relaxation factor طی روش سعی و خطا برای مقادیر فشار و مومنتوم بروی ۰/۳و ۰/۷ تنظیم شد. در گام نهایی نیز در مدل ناپایا، time step بروی ۰/۰۵ تنظیم گردید. در مجموع با استفاده از این روش‌ها مدل همگرا شد و محاسبات انجام شدند. همچنین برای همگرایی حل مدل، مقادیر باقیمانده در 10^{-5} تنظیم شدند.

۳-۲- مدل آشفتگی انتخاب شده

در این تحقیق برای شبیه‌سازی سلول‌های فلوتاسیون و مشاهده پدیده‌های هیدرودینامیکی آن، از مدل k-ε standard استفاده شده است. این مدل یکی از مدل‌های رایج و معروف برای شبیه‌سازی جریان سیال است که از معادلات ناویر-استوکس برای حل جریان سیال استفاده می‌کند و بر اساس دو معادله برای متغیرهای آشفتگی کینتیکی (K) و انرژی آشفتگی (E) ساخته شده است. مزایای استفاده از مدل آشفتگی k-ε standard عبارتند از: قابلیت مدلسازی جریان‌های پیچیده: مدل آشفتگی k-ε standard قادر است جریان‌های سیال با آشفتگی‌های پیچیده را مدلسازی کند. این مدل قابلیت توصیف جریان‌های توربولانسی با الگوهای مختلف را دارد. همچنین پیش‌بینی آشفتگی و تبدیلات انرژی: با استفاده از مدل آشفتگی k-ε standard، می‌توان آشفتگی و تبدیلات انرژی در جریان سیال را به خوبی پیش‌بینی کرد. این مدل قابلیت تحلیل ناهمگنی‌ها و اثرات توربولانسی را در نظر می‌گیرد.

با این حال، باید توجه داشت که مدل آشفتگی k-ε standard تنها به توصیف جریان سیال می‌پردازد و نیاز به کوپلینگ با مدل‌های دیگر برای مدلسازی فرآیند فلوتاسیون دارد. برای شبیه‌سازی فرآیند فلوتاسیون که شامل جریان سیال و حضور گازها یا ذرات جامد است، باید از روش‌های کوپل شده‌ای مانند کوپلینگ فشار-سرعت و روش SIMPLEC استفاده کرد. مدل آشفتگی k-ε standard به توصیف تلاطم جریان سیال می‌پردازد و قابلیت مدلسازی جریان‌های پیچیده را دارد [۱۸].

۳-۲-۱ روش رویه پاسخ برای سلول رافر

روش رویه پاسخ مجموعه‌ای از فنون ریاضی و آماری سودمند

جهت تحلیل مسائلی است که در آن‌ها یک متغیر وابسته یا پاسخ تحت تأثیر چندین متغیر مستقل است و هدف یافتن ترکیبی از متغیرهای مستقل است که مقدار پاسخ را بهینه می‌کند. کار ابتدایی در این زمینه، توسط اعضای یک گروه در صنایع شیمیایی انگلستان انجام‌گرفته است. سرپرست این گروه جی او پی باکس بوده است. کامل‌ترین مدلی که در روش رویه پاسخ استفاده می‌شود، مدل Full Quadratic است که با در نظر گرفتن تمامی عوامل همراه با اثرهای متقابل‌شان و همچنین توان‌های دومشان قادر به بررسی وجود یا عدم وجود خمیدگی یا خمیدگی‌های سیستم و تحلیل آن می‌باشد [۱۹, ۲۰]. پارامترهای متعددی می‌توانند بر کارایی سلول‌های فلوتاسیون اثرگذار باشند که از جمله مهمترین آن‌ها می‌توان به دبی خوراک، دبی و سرعت هوای ورودی و سرعت چرخش پروانه اشاره کرد. برای بررسی اثر مستقیم و متقابل این عوامل بر مقدار آشفتگی متوسط حجم سلول و همچنین تنش وارد بر دیواره و بهینه‌سازی آن‌ها، از نرم‌افزار Design Expert (Version 10.0.7.1) استفاده گردید و در این نرم‌افزار از طرح ترکیب مرکزی CCD[1] با مقدار $\alpha = \pm 1$ استفاده شد. جدول ۳ محدوده تغییرات پارامترها و سطوح سه‌گانه طراحی آزمایش را نشان می‌دهد. ماتریس آزمایش‌های طراحی شده با استفاده از روش CCD شامل ۱۵ آزمایش در جدول ۴ ارائه شده است. در این طراحی، شدت آشفتگی متوسط حجم سلول و تنش وارد بر دیواره سلول به عنوان پاسخ در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۳. سطوح و محدوده متغیرهای عملیاتی در مقادیر واقعی و کدبندی شده

متغیرهای مستقل یا فاکتورها	سطوح و محدوده‌ها		
	α=+۱	α=۰	α=−۱
دبی خوراک (kg/s)	۳۸	۲۸	۱۸
سرعت هوای ورودی (m/s)	۱/۵	۱	۰/۵
سرعت چرخش پروانه (rad/s)	۱۵	۱۰	۵

جدول ۴. داده‌های شبیه‌سازی برای مدل RSM

ردیف	دبی خوراک (kg/s)	سرعت هوای ورودی (m/s)	سرعت چرخش پروانه (rad/s)	تنش وارد بر دیواره سلول	شدت آشفتگی متوسط حجم سلول
۱	۲۸	۱	۱۰	۱۱۱۶۹۳	۲۴۷/۳۸
۲	۱۸	۱	۱۰	۱۱۲۶۷۴	۲۵۹/۰۷
۳	۳۸	۱/۵	۵	۲۰۰۶۴	۲۹/۸۸
٤	۲۸	۱	۱۵	۲۰۳۶۱۱	۲۵۷/۵۲
۵	۲۸	۱	۵	۲۲۱۴۵	۲۸/۲۲
٦	۳۸	۰/۵	۱۵	۲۱۶۰۴۷	۲۶۵/۹۸
۷	۳۸	۱/۵	۱۵	۲۰۹۰۴۰	۲۶۱/۲۹
۸	۲۸	۱/۵	۱۰	۱۱۳۶۸۲	۲۵۱/٤
۹	۱۸	۰/۵	۱۵	۲۰۱۵۱۲	۲۵۹/۷۷
۱۰	۱۸	۰/۵	۵	۳۶۲۴۹	۵٤/٤
۱۱	۱۸	۱/۵	۵	۲۰۱۸۵	۲۹/۷
۱۲	۲۸	۰/۵	۱۰	۱۲۴۹۴۸	۲۵۹/۵٦
۱۳	۳۸	۰/۵	۵	۳۵۹۵۰	۵۳/۲
۱٤	۱۸	۱/۵	۱۵	۱۷۲۴۴۹	۲٤۲/۵
۱۵	۳۸	۱	۱۰	۱۱۹۳۴۹	۲۵۰/۳

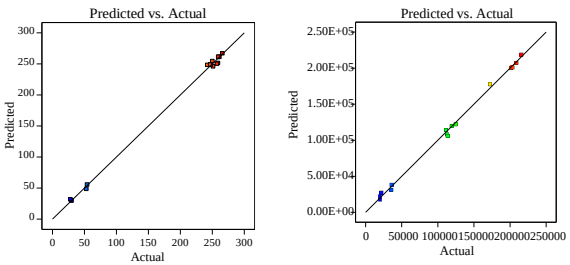
۳-۲-۲ آنالیز آماری واریانس مدل‌های بدست‌آمده

برای ارزیابی معنادار بودن و مناسب بودن مدل پیش‌بینی شده از تحلیل آماری واریانس (ANOVA) استفاده می‌شود. نتایج تحلیل آماری واریانس مدل بدست آمده برای پاسخ‌های شدت آشفتگی متوسط حجم سلول و تنش وارد بر دیواره بدست آمده است. مطابق این نتایج مقادیر F-value (۷۷۴/۵۵ برای شدت آشفتگی متوسط حجم سلول و ۷۳۷/۹۹ برای تنش وارد بر دیواره) و p-value پایین (کمتر از ۰/۰۰۰۱) نشان می‌دهد که مدل بدست آمده از لحاظ آماری قابل قبول است. مقدار F-value بالا و p-value کمتر از ۰/۰۵ نشان می‌دهد که تغییرات در پاسخ به خوبی توسط مدل بدست آمده توصیف می‌شود [۲۱].

ضریب همبستگی نشان‌دهنده این است که تغییرپذیری در مقادیر پاسخ تا چه اندازه می‌تواند بوسیله متغیرهای مستقل و اثرات متقابل آن‌ها توضیح داده شود. هر چه مقدار R^2 مدل به عدد یک نزدیک‌تر باشد، توانایی آن مدل در توجیه تغییرات پاسخ بیشتر خواهد بود. مقدار R^2= ۰/۹۸۸۲ برای شدت آشفتگی متوسط حجم سلول، نشانگر این است که ۹۸/۸۲ درصد از تغییرات در شدت آشفتگی متوسط حجم سلول توسط مدل قابل توجیه است. Adj-R^2 در واقع R^2 اصلاح شده است که بر اساس تعداد عبارت‌های موجود در رابطه به‌دست آمده برای مدل حاصل می‌شود، به‌طوری‌که اگر عبارت‌هایی که لازم نیستند حذف شوند Adj-R^2 حاصل می‌شود [۲۲]. در شکل ۳ مقادیر محاسبه شده توسط مدل و مقادیر آزمایشگاهی برای هر دو پاسخ مقایسه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر حاصل از شبیه‌سازی حول خط راست ۴۵° توزیع شده‌اند، که این نشان‌دهنده توانایی بالای مدل در پیش‌بینی پاسخ می‌باشد.

[1] Central Composite Design

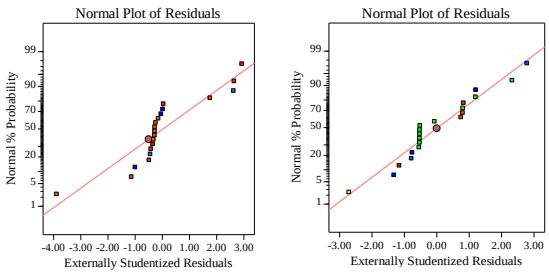
الف) ب)



شکل ۳. مقایسه مقادیر واقعی و مقادیر پیش بینی شده برای الف) تنش وارد شده بر دیواره سلول و ب) شدت آشفتگی متوسط حجم سلول

نمودار نرمال‌شده در برابر خطاهای باقی مانده باید به صورت خطی با زاویه ۴۵ درجه تغییر کند تا از صحت نتایج اطمینان حاصل شود. همچنین نمودار خطای باقی‌مانده به ازای هر آزمایش نشان می‌دهد که خطای موجود باید از حد معین (خطوط قرمز) عبور نکرده تا بتواند با درصد بالایی قابل اطمینان باشد. در شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب نمودارهای مذکور رسم شده و مشهود است که اکثر نقاط روی این خط با دقت بالایی قرار دارند و خطاها برای هر آزمایش از محدوده خطاهای قابل قبول بیشتر نیست.

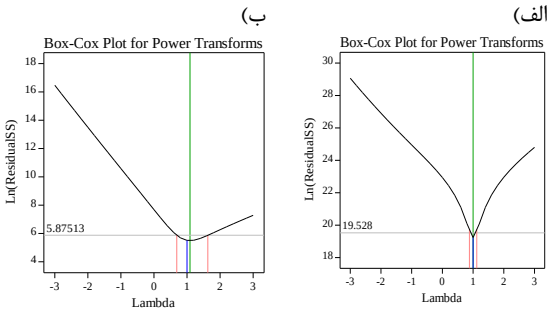
الف) ب)



شکل ۴. مقایسه مقادیر نرمال شده در برابر خطاهای باقیمانده برای الف) تنش وارد شده بر دیواره سلول و ب) شدت آشفتگی متوسط حجم سلول

نمودار Box-Cox یک روش آماری برای نرمال کردن داده‌ها می‌باشد به طوری که نمودار نرمال داده‌ها و خطاهای باقی مانده به بهترین شکل ممکن خطی باشد. همان‌طور که در شکل ۵ پیداست، مدل نرمال ارائه شده با توجه به آنالیز Box-Cox دارای توان‌های ۱ و ۱/۰۹ به ترتیب برای تنش وارد شده بر دیواره سلول و شدت آشفتگی متوسط حجم سلول است که بهترین حالت که توسط آنالیز داده شده است توان ۱ می‌باشد که این اعداد بسیار به هم نزدیک بوده و قابلیت بالای مدل را نشان می‌دهد. همچنین نزدیکی این دو عدد به همدیگر (۱ و ۱/۰۹) نشان‌گر رفتار تقریبا یکسان مدل برای هر دو پارامتر می‌باشد.

الف) ب)



شکل ۵. نمودار Box-Cox برای نرمال کردن داده‌های الف) تنش وارد شده بر دیواره سلول و ب) شدت آشفتگی متوسط حجم سلول

۳-۲-۳ تحلیل نتایج بهینه RSM

طبق مدل به دست آمده مقادیر بهینه برای سرعت چرخش پروانه، دبی خوراک ورودی و دبی هوای ورودی در کمترین تنش در دیواره و حداکثر آشفتگی در داخل سلول به دست آمده و در جدول ۵ آورده شده است. تمامی نتایج حاصله اعم از کانتورها، وکتورها، و ردیابی ذره در این نقطه بهینه به دست آمده است که در ادامه نتایج به تفصیل بررسی می‌گردد.

جدول ۵. مقادیر بهینه بدست آمده برای پارامترهای عملیاتی سلول طبق نتایج RSM

پارامتر	سرعت چرخش پروانه (rad/s)	دبی هوای ورودی (m^3/s)	دبی خوراک ورودی (kg/s)
بهینه	۹/۳	۰/۴۱	۲۸

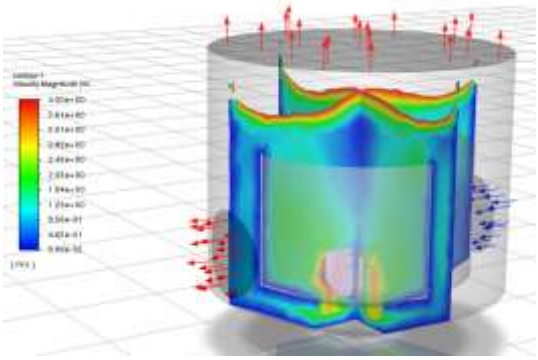
۳-۳- کانتور فاز و سرعت و نحوه حرکت سیال

شکل ۶ الف و ب، نشان دهنده کانتورهای فاز مایع و گاز (حباب‌های هوا) در برشی از سطح مقطع داخل سلول هستند. همانطورکه مشاهده می‌شود هر دو فاز بخوبی در سلول پخش شده‌اند. بدلیل ساختار ویژه و متفاوت این سلول‌ها، فاز حباب بیشتر در محفظه درونی سلول جریان دارد و مابین دو جداره سلول صرفا سیال پالپ در جریان است که بیشتر وظیفه ورود و خروج خوراک و باطله و همچنین تامین مسیر جریان‌های برگشتی را دارد. این جداره میانی درون سلول کمک می‌کند تا دو ناحیه متفاوت آشفته در قسمت میانی و ناحیه آرام اطراف سلول ایجاد شود که در ادامه بیشتر بحث خواهد شد.

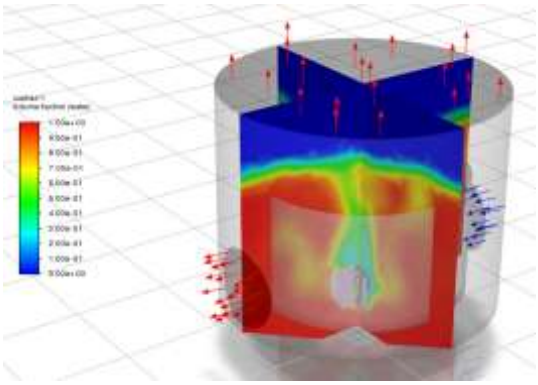
نکته مهم در این مورد زمانی حاصل می‌شود که این نتایج همراه با نتایج کانتور و وکتور سرعت بطور همزمان تحلیل شوند.

همانطورکه در شکل ۶ ج و د مشاهده می‌شود، توزیع سرعتی درون سلول مشاهده می‌شود. این سرعت در مرکز پره تقریبا صفر و در لبه‌های پره به بیشینه مقدار خود می‌رسد که تطابق بسیار خوبی با داده‌های علمی و عملی دارد که نشان‌گر صحت شبیه‌سازی است. همچنین جریان‌های برگشتی در طرفین سلول به سمت پایین و مکش ایجاد شده توسط پروانه که به حالت چرخشی (circulation) پالپ منجر می‌شود بخوبی نمایان است. همچنین کمتر بودن سرعت در نزدیکی جداره خارجی سلول کاملا مشهود است که می‌تواند به طول عمر سلول کمک کند و در واقع بیشترین فشار بر روی جداره داخلی سلول اعمال می‌شود. مجموع این داده‌ها نشان می‌دهد مشخصات خوراک ورودی و پدیده‌های هیدرودینامیکی داخل سلول بخوبی به نرم افزار تعریف شده‌اند و نتایج خروجی قابل قبولی اخذ شده است.

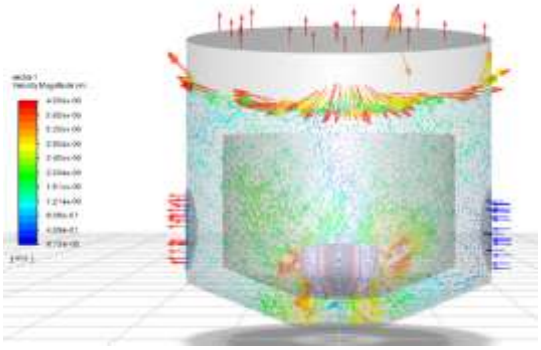
الف)



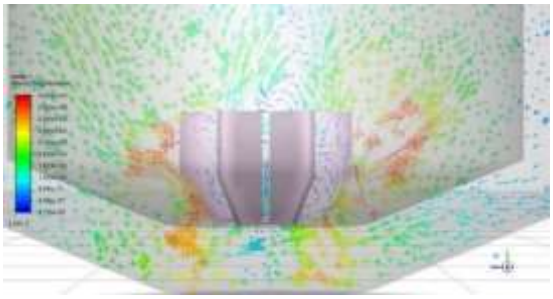
ب)



ج)



د)

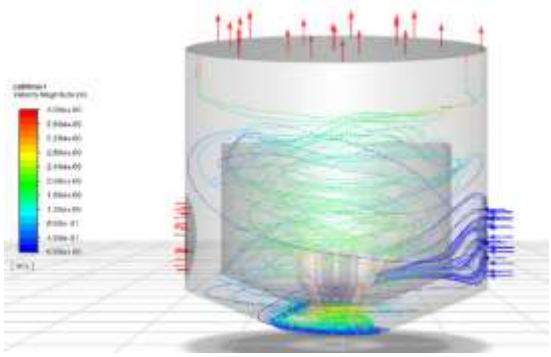


شکل ۶. کانتورها و بردارهای فاز و سرعت مربوط به شبیه‌سازی CFD سلول در محیط نرم افزار ANSYS FLUENT

۳-٤- ردیابی ذره‌ای

مدل ردیابی ذره‌ای به منظور بررسی رفتار و حرکت ذرات در این تحقیق استفاده شده است و نتایج حاصل در شکل ۷ مشاهده می‌شود. همانطورکه مشخص است، پالپ بخوبی درون سلول جریان دارد. همچنین در این شکل نیز توزیع سرعت درون سلول بخوبی نمایان است. سیال در بدو ورود به سلول به سبب نیروی گرانشی بصورت تقریبا خزشی از اطراف جداره داخلی دور زده و با نزدیک شدن به مرکز سلول بدلیل افت فشار ایجاد شده توسط پروانه، پالپ به قسمت پایینی پره کشیده شده و از طریق پروانه دوران یافته و سپس در قسمت محفظه داخلی پخش می‌شود که در این ناحیه از سرعت بالایی نیز برخوردار است. همچنین در جداره داخلی سلول حباب‌های خروجی به پالپ اضافه شده و یک سیال یکنواختی در این جداره ایجاد می‌شود که نهایتا مقداری از جریان از بالای سلول سرریز شده و خارج می‌شود و بخشی از جریان نیز بصورت جریان برگشتی به خوراک پیوسته و مجددا به سمت پروانه می‌رود. نکته قابل توجه این است که همانطورکه در شکل نیز مشخص است جریان پالپ در مابین جداره داخلی و خارجی آنچنان حرکتی نداشته که نشان‌دهنده کارایی و بهینه بودن سرعت دوران پروانه می‌باشد چراکه در صورت کم بودن سرعت پروانه و عدم مکش کافی، پالپ در جداره بیرون جریان

پیدا کرده و با حباب‌های خروجی از مرکز سلول در تماس نخواهد بود که باعث افت چشمگیر راندمان سلول می‌شود.



شکل ۷. ردیابی ذره‌ای سیالات درون سلول پالپ

۳-۵- تاثیر پارامترهای عملیاتی

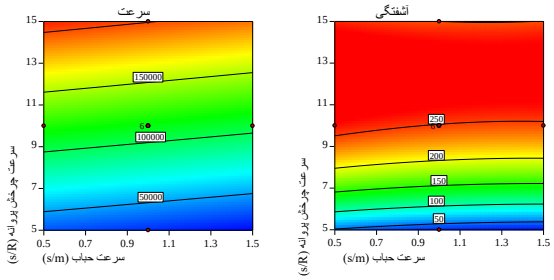
شکل ۸ نشان‌دهنده‌ی تاثیر پارامترهای سرعت حباب ورودی و سرعت چرخش پروانه بر الف) شدت آشفتگی متوسط حجم سلول و ب) مقدار تنش وارد بر دیواره می‌باشد. پارامتر شدت آشفتگی متوسط نمایانگر میزان اختلاط درون سلول می‌باشد که به نوعی می‌تواند تضمین کننده اختلاط مناسب پالپ باشد. در صورتی که این پارامتر مقدار کمی داشته باشد، بدلیل عدم اختلاط کافی پالپ درون سلول فرآیند تغلیظ بخوبی انجام نخواهد شد. برای عملکرد بهینه سلول و حفظ راندمان آن نیاز است آشفتگی درون سلول ایجاد گردد. بدین ترتیب ذرات مس موجود در پالپ شانس جدا شدن از دیگر ذرات را داشته و امکان تماس موثر آن‌ها با حباب‌های بالارونده هوا میسر می‌شود. از طرفی دیگر پارامتر مقدار تنش وارد بر دیواره نیز یک معیار از مجموع فشارها و تنش‌های وارد شده بر دیواره‌های سلول از طرف سیال می‌باشد. این پارامتر می‌تواند معیاری برای ارزیابی سایش و در نتیجه کاهش طول عمر جداره‌های سلول باشد. همانطورکه قبلا ذکر شد برای کاهش اثرات پالپ بر دیواره سلول باید میزان تنش وارد بر دیواره در حالت کیمنه باشد و از طرفی برای حفظ راندمان سلول و اختلاط مناسب پالپ در درون سلول، باید مقدار شدت آشفتگی زیاد باشد. همانطور که داده‌های شبیه‌سازی و نمودارهای RSM در شکل ۸ مشخص است، شدت آشفتگی و تنش وارد بر دیواره سلول بیشتر تحت تاثیر سرعت چرخش پروانه است و سرعت حباب ورودی تاثیر چندانی بر مقادیر آن‌ها ندارد. همچنین بدلیل محدودیت در اعمال تغییرات در دبی خوراک ورودی این پارامتر تغییر داده نشد. زیرا بدلیل پیوسته بودن فرآیند، هرگونه تغییرات در این پارامتر نیازمند تغییر در کلیه مراحل قبلی اعم از خردایش و ... می‌باشد که به راحتی امکان‌پذیر نیست.

شدت آشفتگی متوسط حجم سلول در سرعت‌های پروانه بالاتر از ۹ رادیان بر ثانیه مقدار تقریبا ثابتی بدست آمده است و نسبتا مناسب است. از طرف دیگر نیز در همین میزان سرعت چرخش پروانه، مقدار تنش وارد شده بر دیواره‌ها با افزایش سرعت افزایش می‌یابد. بر اساس داده‌های بهینه‌سازی مقدار سرعت ۹٫۳ رادیان بر ثانیه را می‌توان به عنوان سرعت بهینه چرخش پروانه انتخاب کرد. مقادیر بهینه پارامترهای عملیاتی نام برده شده بر اساس بیشترین میزان شدت آشفتگی متوسط و کمترین میزان تنش وارد بر دیواره حاصل شدند که در آن شدت آشفتگی متوسط و تنش وارد بر دیواره به ترتیب ۲۳۷٫۲٪ و ۹۶۳۷۱٫۲۲ نیوتن به دست آمده است که مقدار شدت آشفتگی، تقریبا نزدیک به مقداری است که در داده‌های طراحی (۲۶۲/۵۶٪) تنظیم شده است که به اختلاط مناسب پالپ در درون سلول کمک می‌کند و تنش وارد بر دیواره نیز بسیار کمتر از مقدار طراحی (۱۵۹۵۱۵/۳۶ نیوتن) است که باعث کاهش اثرات پالپ بر دیواره سلول و درنتیجه افزایش طول عمر آن می‌شود. با اینحال سرعت چرخش پروانه در پارامترهای طراحی مقدار ۱۲٫۳ رادیان استفاده شده است که با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌ها و همچنین نتایج حاصل از بهینه‌سازی‌ها مشاهده می‌شود، این مقدار با اینکه از نظر آشفتگی مقدار تقریبا یکسانی با مقدار آشفتگی حاصل از سرعت چرخش پروانه ۹/۳ دارد، ولی در مورد تنش وارد بر دیواره بسیار مقدار بیشتری داشته و می‌تواند سبب کاهش عمر سلول شود.

لازم به ذکر است مقادیر سرعت چرخش پروانه بسیار کمتر که تنش وارد شده بر دیواره نیز بسیار کم است، بدلیل عدم اختلاط کافی و آشفتگی بسیار کم سیستم نمی‌تواند به عنوان نقطه بهینه مورد استفاده قرار گیرد. و به عبارت دیگر نقطه بهینه باید هر دو عامل را بطور همزمان در نظر داشته باشد. همچنین از نتایج بدست آمده می‌توان گفت بیشترین تاثیر بر نتایج شدت آشفتگی و تنش وارد بر دیواره از سوی سرعت چرخش پروانه اعمال شده است. چراکه مستقیما سرعت حرکت سیال در داخل سلول را کنترل می‌کند و با افزایش سرعت، آشفتگی به شدت افزایش پیدا کرده و در نتیجه تاثیرات پالپ بر دیواره نیز افزایش می‌یابد. همچنین کمترین تاثیر نیز مربوط به دبی خوراک ورودی می‌باشد چراکه خوراک از ناحیه مابین دوجداره وارد می‌شود و تاثیر چندانی در آشفتگی ایجاد شده درون سلول ندارد. و سرعت حباب که ارتباط مستقیمی با دبی هوای ورودی به سلول دارد حالت بینابینی داشته ولی با اینحال در مقایسه با سرعت چرخش

پروانه تاثیر بسیار کمتری بر آشفتگی و تنش وارد بر دیواره دارد. لذا آسان‌ترین روش برای کنترل این دو پارامتر، کنترل سرعت چرخش پروانه می‌باشد و دبی هوای ورودی نیز باید بهینه‌سازی شود تا راندمان سلول در حد قابل قبول خود حفظ شود.

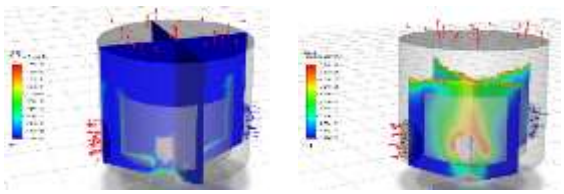
الف) ب)



شکل ۸. تاثیر پارامترهای سرعت حباب و سرعت چرخش پروانه بر الف) شدت آشفتگی متوسط حجم سلول و ب) تنش وارد بر دیواره سلول

شکل ۹ نیز نشان‌دهنده دو پارامتر شدت آشفتگی متوسط و تنش وارد بر دیواره توسط سیال پالپ می‌باشد که این تصاویر از نرم افزار Ansys fluent در حالت بهینه بدست آمده، استخراج شده‌اند. همانطورکه در شکل الف مشخص است بیشترین تنش وارده بر جداره داخلی است. با توجه به شکل ب مشخص می‌شود که آشفتگی در محفظه داخلی زیاد بوده و در مابین دو جداره بسیار کم می‌باشد. این موارد علاوه بر تصدیق عملکرد صحیح شبیه‌سازی و نشان دادن قابلیت نرم افزار در پیش‌بینی و شبیه‌سازی صحیح و دقیق پدیده‌های موجود در سلول، می‌توانند دیدگاه خوبی از مشخصات هیدرودینامیکی سلول در اختیار ما قرار دهند. برای مثال در تشخیص نقاط مرده سلول، بهینه کردن سیستم اختلاط و ... می‌توان از این قابلیت‌های نرم افزار استفاده کرد. همچنین در پروژه‌های آتی اگر هدف تغییر هندسی سیستم یا طراحی نوع متفاوتی از پروانه مد نظر قرار بگیرد می‌توان از این ابزار بهره‌گیری کرد.

الف) ب)



شکل ۹. کانتورهای دو پارامتر الف) شدت آشفتگی متوسط حجم سلول و ب) تنش وارد بر دیواره توسط سیال پالپ

۶-۳- اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی مدل، از آنجاییکه واحد نامبرده شده هنوز راه‌اندازی نشده است، لذا نمی‌توان از داده‌های صنعتی استفاده کرد. لذا در گام اول از داده‌های طراحی استفاده شد. این داده‌ها بدلیل محاسبات و تجربه و دانشی که در محاسبات آن‌ها توسط شرکت طرف قرارداد بکار رفته است از دقت کافی برای استفاده در مرحله اعتبارسنجی دارا می‌باشند. شرایط عملیاتی مورد استفاده توسط طراح به شرح جدول ۶ می‌باشد:

جدول ۶. شرایط عملیاتی مورد استفاده توسط طراح برای اعتبارسنجی مدل

پارامتر	سرعت چرخش پروانه (rad/s)	دبی هوای ورودی (m^3/s)	دبی خوراک ورودی (kg/s)
مقدار	۱۲/۳	۰/۳۳	۲۸

همچنین در جدول ۷ خلاصه‌ای از اطلاعات دبی‌های خوراک، کنسانتره و باطله و همچنین درصد مس موجود در این جریان‌ها در سلول رافر اولیه جمع آوری شده است:

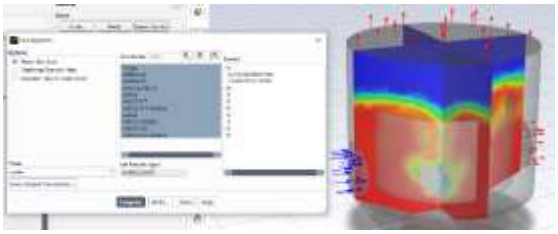
جدول ۷. مقادیر پارامترهای طراحی سلول‌های رافر

پارامتر	خوراک	باطله	کنسانتره
دبی (kg/s)	۲۸	۲۶/۵	۱/۵
درصد مس (%)	۱/۸	۲۲	۰.۱>

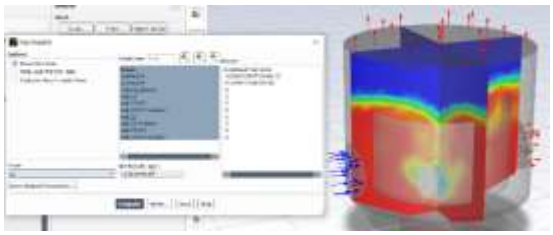
با توجه به داده‌های فوق شبیه‌سازی‌ها در نرم افزار اجرا شدند و با ایجاد تغییراتی در مدل‌های استفاده شده در نرم افزار در نهایت نتایج مورد انتظار حاصل شد که دو مورد از مهم‌ترین آن‌ها درصد مس موجود در کنسانتره و دیگری دبی‌های مربوط به کنسانتره که از سر ریز سلول و باطله که از خروجی سلول تامین می‌شوند، بودند که در شکل ۱۰ به ترتیب این موارد مشاهده می‌شوند.

همانطور که از جداول ۷ و ۸ مشخص است، دبی خوراک ورودی ۲۸ کیلوگرم بر ثانیه و عیار مس ۱/۸ درصد تعریف شده است که طبق داده‌های طراحی مجتمع قرار است kg/s۲۶/۵ از آن از قسمت خروجی باطله با عیار مس بسیار کم خارج شده و مقدار تقریبا kg/s۱/۵ از آن با عیار مس ۲۲ درصد بصورت کنسانتره از بالای سلول سر ریز شود. با توجه به شکل ۱۵ مشاهده می‌شود این نتایج با دقت بسیار بالایی با مقادیر حاصل از شبیه‌سازی همخوانی دارد که نشانگر دقت و صحت نتایج کسب شده می‌باشد و می‌توان گفت نتایج حاصل از شبیه‌سازی از تطابق بسیار خوب و قابل قبولی نسبت به پارامترهای طراحی برخوردار است.

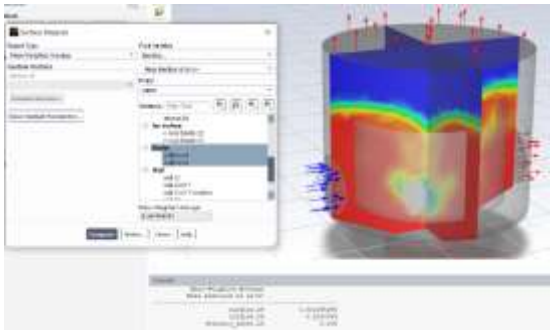
الف)



ب)

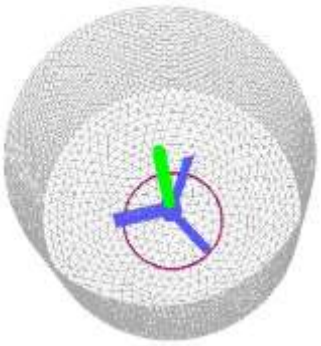


ج)



شکل ۱۰. الف) دبی خوراک (velocity-inlet.23)، باطله (outflow.29) و کنسانتره (outflow.24)، ب) دبی هوای ورودی (hobab) و خروجی و ج) درصد مس در دو وردی و خروجی‌های باطله و کنسانتره

همچنین در گام بعدی از یک مقاله در این زمینه که با استفاده از نرم‌افزار ANSYS Fluent یک سلول فلوتاسیون را شبیه‌سازی کرده است استفاده شد [۲۳]. در این مرحله ابتدا ایجاد هندسه و مش‌بندی طبق داده‌های ارائه شده در مقاله در محیط نرم افزار گمبیت انجام شد. بدلیل شرایط هندسی سلول مورد نظر و جهت کاهش تعداد مش و همچنین بهره مندی از دقت کافی، برای نواحی میله میانی، پروانه‌ها و همچنین اسپارژر هوا از مش tetragonal با interval size ۰/۲ استفاده شد. همچنین برای rotation zone که یک ناحیه برای تعریف چرخش پروانه بود از همان مش با سایز ۰/۵ استفاده شد و در پایان برای باقی صفحات از مش با سایز ۱ استفاده شد و در نهایت کل حجم از روی مش‌بندی صفحات مش زده شد که در مجموع تعداد مش ۲۱۰۵۶۴ عدد شد. همچنین ورودی هوا را از اطراف اسپارژر تعریف گردید. نتایج مش‌بندی و هندسه در شکل ۱۱ ارائه شده است.

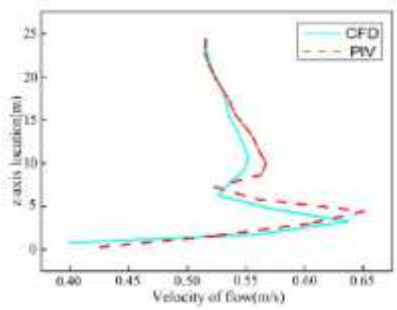


شکل ۱۱. نتایج مش‌بندی و ایجاد هندسه

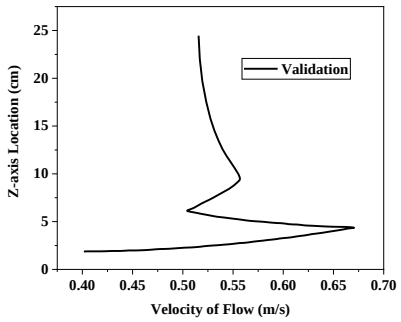
در نرم افزار فلوئنت، مشابه کار انجام شده در این پژوهش و طبق توضیحات خود مقاله از مدل VOF استفاده شد. کوپلینگ فشار-سرعت بر روی SIMPLE قرار داده شد و برای مدل آشفتگی از k-ε standard استفاده گردید و همچنین شبیه‌سازی در محیط ناپایا با Time step size 0.01 انجام گردید. در مقاله نامبرده شده، برای اعتبارسنجی داده‌ها از مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی استفاده شده است که دو مورد سرعت در راستای عمودی درون سلول و همچنین streamline سرعت بدین منظور استفاده شده‌اند. برای اعتبارسنجی این پژوهش نیز همین داده‌ها از شبیه‌سازی‌ها استخراج و در شکل‌های ۴-۱۶ و ۴-۱۷ کنار هم قرار داده شد. نتایج حاصل نشان از همخوانی داده‌ها دارد. همانطور در دیاگرام ۴-۱۶ دیده می‌شود، سرعت در راستای عمودی درون سلول تقریبا فرم و رفتار یکسانی داشته است (البته ذکر این نکته حائز اهمیت است که بدلیل اشتباه تایپی در مقاله استناد شده در محور y از متر استفاده شده که باید سانتی متر باشد). این دیاگرام نشان می‌دهد که هر چه از کف سلول به سمت ناحیه حضور پروانه که تقریبا در ارتفاع ۵ سانتی از کف سلول قرار داده شده است نزدیک‌تر می‌شویم سرعت بطور قابل توجهی افزایش یافته سپس با نزدیک‌تر شدن به قسمت بالای سلول مجددا سرعت کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به شکل ۴-۱۷ می‌توان به وضوح دید که در ناحیه‌ای که خروجی حباب از اسپارجر می‌باشد، یک ناحیه گردابه‌ای بدلیل ورود هوا به سلول تشکیل شده است که بخصوص با داده‌های آزمایشگاهی بخوبی همخوانی دارد. همچنین در اطراف پره بوضوح مشخص است که سرعت بیشتر است و همچنین بدلیل فرم زاویه‌دار پره‌ها و همچنین زاویه ۱۲۰ درجه‌ای آن‌ها از یکدیگر، در ناحیه خلا مابین دو پره یک خلا نسبی ایجاد شده است. از مجموع این نتایج می‌توان گفت شبیه‌سازی‌ها بخوبی پدیده‌های موجود را پیش‌بینی و اعمال کرده‌اند. لذا با توجه به ماهیت مقاله انتخاب شده و همچنین مدل‌های مشترک موجود برای شبیه‌سازی و در راس

آن‌ها مدل چندفازی VOF می‌توان گفت نتایج پژوهش حاصل از اعتبار و صحت کافی برخوردار بوده و نتایج آن قابل استناد است.

الف)

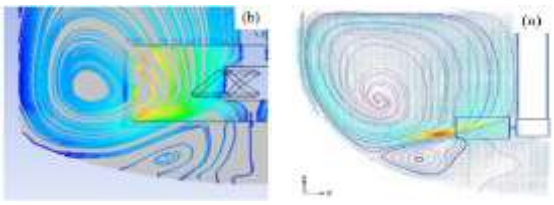


ب)

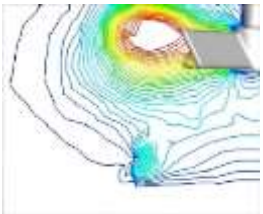


شکل ۱۲. دیاگرام توضیح سرعت در راستای عمودی درون سلول الف) مقاله اعتبارسنجی انتخاب شده و ب) شبیه‌سازی انجام شده

الف) ب)



ج)



شکل ۱۳. Streamline سرعت در کنج سلول برای الف) نتایج آزمایشگاهی ب) نتایج شبیه‌سازی مقاله اعتبارسنجی و ج) شبیه‌سازی انجام شده

۷-۳- ارزش افزوده مالی

ارزش افزوده مالی پروژه حاضر را می‌توان از دو دیدگاه مورد بررسی قرار داد. از دیدگاه نحوه حصول نتایج و ذات فرآیند شبیه‌سازی و همچنین از لحاظ بهینه‌سازی‌های انجام شده در فرآیند. با توجه به نتایج بدست آمده، می‌توان گفت علاوه بر کاهش سرعت چرخش پروانه که می‌تواند در هزینه‌های تامین انرژی سلول صرفه‌جویی داشته باشد، مقدار تنش وارد بر دیواره‌های سلول نیز به مقدار چشمگیری (از ۱۵۹.۰۰۰ به ۹۶.۰۰۰) کاهش پیدا کرد که بطور واضح در طول عمر سلول تاثیر بسزایی خواهد داشت. قیمت فعلی هر سلول استفاده شده در این واحد تقریبا ۲۰۰.۰۰۰ یورو معادل تقریبا ۱۴۰ میلیارد ریال می‌باشد. در این واحد ۵ سلول رافر استفاده شده که در مجموع هزینه آن‌ها معادل ۷۰۰ میلیارد ریال می‌باشد. در صنعت مس بطور میانگین هزینه‌های استهلاک سلول‌ها را ۲۰٪ سالانه در نظر می‌گیرند که با این حساب سالانه تقریبا ۱۴۰ میلیارد ریال از مجموع ۵ سلول برای استهلاک در نظر گرفته می‌شود. با توجه به این‌که با بهینه‌سازی‌های انجام شده پیش بینی می‌شود تنش وارد بر دیواره سلول تا حد ۴۰ درصد کاهش یابد همچنین با در نظر گرفتن اینکه سرعت چرخش پروانه کمتر می‌تواند آسیب وارد بر پره‌ها را بطور قابل توجهی کاهش دهد، لذا می‌توان گفت استهلاک سلول‌ها بطور قابل توجهی کاهش خواهد داشت. علاوه بر این کاهش سرعت چرخش پروانه می‌تواند در کاهش مصرف برق واحد نیز موثر بوده و باعث صرفه‌جویی در هزینه‌های جاری گردد. همچنین به عنوان یک دستاورد جانبی پروژه، با توجه به اینکه می‌توان این شبیه‌سازی‌ها را مبنایی بر استفاده در دیگر پروژه‌ها و طرح‌های مشابه قرار داد، می‌توان با شناخت پدیده‌های دینامیکی درون سلول نسبت به طراحی بهینه‌تر سلول‌ها از نظر هندسی، نوع و شکل پروانه و ... اقدام کرد. چراکه با نتایجی که در بخش‌های قبلی تشریح شد واضح است که می‌توان تمامی پارامترهای هیدرودینامیکی درون سلول را با دقت بالایی مورد بررسی قرار داد و می‌توان آشفتگی درون سیستم را برای حصول بیشترین راندمان بهینه‌سازی کرد و حتی برای مثال جهت تشخیص نقاط مرده درون سلول و یا جریان‌های بای پس صورت گرفته در سلول را تشخیص داد و با اعمال یک سری اصلاحات در طراحی سلول و یا پارامترهای عملیاتی آن، عملکرد سلول را بهبود بخشید بدون آنکه نیاز باشد هزینه‌ای در صنعت متحمل شد.

۴. نتیجه گیری

به منظور بررسی دینامیک جریان داخلی در سلول رافر از مدل VOF استفاده شد که امکان بررسی انواع پارامترهای مربوط به رژیم جریان‌های دو فازی در این مدل امکان‌پذیر است. با تغییر و بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی سلول‌ها شامل دبی خوراک دبی هوای ورودی و سرعت چرخش پروانه، تاثیر این پارامترها بر سرعت در نزدیکی دیواره‌ها و تاثیرات پالپ بر دیواره بررسی شد و جهت افزایش طول عمر دستگاه و کاهش فشارات وارد بر دیواره پیشنهاداتی ارائه شد. برای دقیق‌تر و جامع‌تر شدن نتایج بهینه‌سازی، از نرم افزار طراحی آزمایش Design Expert استفاده شد و در نهایت مقادیر بهینه پارامترهای عملیاتی برحسب کمترین میزان تنش وارده بر دیواره سلول و همچنین کسب حداکثر میزان آشفتگی و اختلاط قابل قبول برای حفظ راندمان سلول حاصل شد. همچنین از وکتورهای سرعت و همچنین ردیابی ذره‌ای برای بررسی جهت جریان در داخل سلول استفاده شد تا درک بهتری از پدیده‌های دینامیکی و مدل‌های آشفتگی درون سلول حاصل گردد. مدل ارائه شده در این بهینه‌سازی دارای دقت بالا و مطابقت ۹۹ درصدی با نتایج شبیه‌سازی داشته است. سرعت چرخش پروانه ۹/۳ rad/s، دبی خوراک ورودی kg/s ۲۸ و دبی هوای ورودی ۰/۴۱ m^3/s به دست آمد که در این نقطه حداکثر آشفتگی و حداقل نیروی وارد بر بدنه سلول به دست آمد. این نتایج بسیار نزدیک به پارامترهای عملیاتی و طراحی شده می‌باشد (سرعت چرخش پروانه ۱۲/۳ rad/s، دبی خوراک ورودی ۲۸ kg/s و دبی هوای ورودی ۰/۳۳ m^3/s، که برای اعتبارسنجی مدل نیز از این مقادیر استفاده شد) که محسوس‌ترین اختلاف بین این دو نقطه سرعت چرخش پروانه و دبی هوای ورودی می‌باشد. نکته قابل توجه این است که در بحث آشفتگی و اختلاط جریان سلول تفاوت بسیار ناچیزی مابین سرعت چرخش پروانه ۹/۳ rad/s و ۱۲/۳ rad/s (پارامتر بهینه به دست آمده و پارامتر عملیاتی طراحی شده) وجود دارد ولی نیروی وارد بر دیواره سلول زمانی که سرعت چرخش پروانه ۹/۳ rad/s باشد ۹۶۳۷۱٫۲۲ نیوتن است. در حالی که این عدد برای سرعت چرخش پروانه ۱۲/۳ rad/s، ۱۵۹۵۱۵/۳۶ نیوتن است. در نتیجه با کاهش سرعت چرخش پروانه، می‌توان بطور قابل توجهی تنش وارد بر دیواره را کاهش داد و از طرف دیگر با افزایش مقدار حباب ورودی به سیستم علاوه بر حفظ راندمان سلول، می‌توان به افزایش آشفتگی و اختلاط نیز کمک کرد

٤. مراجع

[۱] A. Gümüşsoy, M. Başyiğit, and E. U. Kart, "Economic potential and environmental impact of metal recovery from copper slag flotation tailings," *Resources Policy*, vol. 80, p. 103232, 2023.

[۲] İ. Alp, H. Deveci, and H. Süngün, "Utilization of flotation wastes of copper slag as raw material in cement production," *Journal of hazardous materials*, vol. 159, no. 2-3, pp. 390-395, 2008.

[۳] J. D. Anderson and J. Wendt, *Computational fluid dynamics*. Springer, 1995.

[٤] Y. Zhu, P. Zhang, S. Jin, L. Ou, W. Zhang, and "Fine Bauxite Recovery Using a Plate-Packed Flotation Column," *Metals*, vol. 10, no. 9, p. 1184, 2020.

[٥] Q. Xu, W. Hu, and M. Zhang, "High-turbulence fine particle flotation cell optimization and verification," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, p. 23124, 2024.

[٦] P. Koh and M. Schwarz, "CFD modelling of bubble–particle collision rates and efficiencies in a flotation cell," *Minerals Engineering*, vol. 16, no. 11, pp. 1055-1059, 2003.

[۷] M. P. Schwarz, P. T. Koh, D. I. Verrelli, and Y. Feng, "Sequential multi-scale modelling of mineral processing operations, with application to flotation cells," *Minerals Engineering*, vol. 90, pp. 2-16, 2016.

[۸] G. Wang, L. Ge, S. Mitra, G. M. Evans, J. Joshi, and S. Chen, "A review of CFD modelling studies on the flotation process," *Minerals Engineering*, vol. 127, pp. 153-177, 2018.

[۹] R. R. R. Silva, "Flotation Circuit Optimization Using Modelling and Simulation," *16th International Journal of Mineral Processing*, 2020.

[۱۰] R. Silva, J. Wallace, and D. Lelinski, "Using Experimental Data to Validate a Flotation Cell CFD Model for Development of a Dynamic CFD-based Simulator".

[۱۱] P. T. Koh and M. Schwarz, "CFD model of a self-aerating flotation cell," *International Journal of Mineral Processing*, vol. 85, no ۱-۳, pp. 16-24, 2007.

[۱۲] L. Wang and C. Li, "A brief review of pulp and froth rheology in mineral flotation," *Journal of Chemistry*, vol. 2020, pp. 1-16, 2020.

[۱۳] A. Kramer, S. Gaulocher, M. Martins, and L. d. S. Leal Filho, "Surface tension measurement for optimization of flotation control," *Procedia Engineering*, vol. 46, pp. 111-118, 2012.

[۱٤] A. Farzanegan, N. Khorasanizadeh, G. A. Sheikhzadeh, and H. Khorasanizadeh, "Laboratory and CFD investigations of the two-

phase flow behavior in flotation columns equipped with vertical baffle," *International Journal of Mineral Processing*, vol. 166, pp. 79-88, 2017.

[۱۵] A. Khataee, M. E. Farshchi, M. Fathinia, and H. Aghdasinia, "Photocatalytic ozonation process for degradation of an anthelmintic drug using ceramic coated TiO2 NPs: CFD simulation coupling with kinetic mechanisms," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 141, pp. 37-48, 2020.

[۱۶] T. Liu and M. Schwarz, "CFD-based multiscale modelling of bubble–particle collision efficiency in a turbulent flotation cell," *Chemical Engineering Science*, vol. 64, no. 24, pp. 5287-5301, 2009.

[۱۷] F. Stern, R. V. Wilson, H. W. Coleman, and E. G. Paterson, "Verification and validation of CFD simulations," *Iowa Institute of Hydraulic Research IIHR*, vol. 407, ۱۹۹۹.

[۱۸] A. Sarhan, J. Naser, and G. Brooks, "CFD analysis of solid particles properties effect in three-phase flotation column," *Separation and Purification Technology*, vol. 185, pp. 1-9, 2017.

[۱۹] M. A. Bezerra, R. E. Santelli, E. P. Oliveira, L S. Villar, and L. A. Escaleira, "Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry," *Talanta*, vol. 76, no. 5, pp. 965-977, 2008.

[۲۰] M. Antoniadou, V. M. Daskalaki, N. Balis, D. I. Kondarides, C. Kordulis, and P. Lianos, "Photocatalysis and photoelectrocatalysis using (CdS-ZnS)/TiO 2 combined photocatalysts," *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 107, no. 1, pp. 188-196, 2011.

[۲۱] J. Sjöblom, K. Papadakis, D. Creaser, and C. I. Odenbrand, "Use of experimental design in development of a catalyst system," *Catalysis today*, vol. 100, no. 3, pp. 243-248, 2005.

[۲۲] D. M. Wardrop and R. H. Myers, "Some response surface designs for finding optimal conditions," *Journal of statistical planning and inference*, vol. 25, no. 1, pp. 7-28, 1990.

[۲۳] B. Kou, Y. Hou, W. Fu, N. Yang, J. Liu, and G. Xie, "Simulation of multi-phase flow in autoclaves using a coupled CFD-DPM approach," *Processes*, vol. 11, no. 3, p. 890, 2023.