

Hydrodynamic Simulation of Two Phase Flow in an Industrial Electrowinning Cell

ARTICLE INFO

Article Type Original Research

Authors Pourahmadi S.A.A.¹ MSc, Talebi Sh. *1 PhD

How to cite this article Pourahmadi S.A.A, Talebi Sh. Hydr-

odynamic Simulation of Two Phase Flow in an Industrial Electrowinning Cell. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(1):215-225.

ABSTRACT

Electrowinning is the process of copper deposing from the intracellular electrolyte solution to the cathode by creating an electric current. In the present study, the hydrodynamic simulation of the electrowinning cell of Miduk Copper Complex is studied using computational fluid dynamics. Ansys-CFX software is used for this modeling. Navier Stokes and continuity equations are considered as the two-phase fluid and gas, turbulent, incompressible and steady states and the equation for copper concentration in the electrolyte will be solved with consideration of its specific boundary condition. Turbulence will be modeled using the k- ω method. The general and local simulations have been used together due to the large variation in the properties, close to the cathode and anode, and the large volume of the cell, to create a good mesh and increase the speed and accuracy of the solution. First, in general simulation, the entire geometry of the cell is modeled by creating a suitable mesh. Then in the local simulation, only the volume between the two cathodes of the cell is considered and modeled with higher precision. Data on boundary conditions in the local simulation of interface boundary are obtained with general simulation data, which increases the accuracy of modeling. Comparison of the results of general and local simulations shows an accuracy of up to 30% in close to the electrodes. The results of this simulation are the velocity vector, the concentration of acid and copper, the turbulence intensity, pressure and the volume fraction of the oxygen phase in the whole of the electrowinning cell. Finally, the model has been validated by experiments on the real cells. The results show the high accuracy of this modeling technique with less than 2.5% deviation.

Keywords Hydrodynamic Simulation; Computational Fluid Dynamics; Electrowinning Cell; General and Local Simulation; Experimental Validation

¹Mechanical Engineering Department, Yazd University, Yazd, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Yazd University, Yazd, Iran Phone: -Fax: talebi_s@yazd.ac.ir

Article History

Received: November 7, 2018 Accepted: May 4, 2019 ePublished: January 01, 2020

CITATION LINKS

[1] Mechanisms of acid mist formation in electrowinning [2] Current density limitation and diffusion boundary layer calculation using CFD method [3] Experimental validation of a computational fluid dynamics model of copper electrowinning [4] Improving zinc processing using computational fluid dynamics modelling-successes and opportunities [5] Flow and mass transfer modelling for copper electrowinning: Development of instabilities along electrodes [6] CFD simulation of an industrial copper electrowinning cell [7] Modelling the electrolyte flow in a full-scale copper electrorefining tankhouse cell [8] Velocity measurements inside the concentration boundary layer during copper-magneto-electrolysis using a novel laser Doppler profile sensor [9] Transport processes and separation process principles [10] A combination of computational fluid dynamics (CFD) and adaptive neuro-fuzzy system (ANFIS) for prediction of the bubble column hydrodynamics

Copyright© 2019, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

۲۱۶ سیدعلیاکبر پوراحمدی و شهرام طالبی

شبیهسازی هیدرودینامیکی جریان دوفازی در یک سلول الکترو- وینینگ صنعتی

سیدعلیاکبر پوراحمدی MSc گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران **شهرام طالبی^{*} PhD**

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

چکیدہ

الکترو- وینینگ فرآیند نشاندن یونهای مس محلول در الکترولیت داخل سلول روی کاتد توسط ایجاد جریان الکتریکی است. در تحقیق حاضر، شبیهسازی هیدرودینامیکی این سلولها در مجتمع مس میدوک با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مطالعه میشود. نرمافزار مورد استفاده Ansys CFX است. معادلات ناویر استوکس و پیوستگی به صورت دو فازی مایع و گاز، آشفته، تراکمناپذیر و حالت پایدار در نظر گرفته میشوند و معادله مربوط به غلظت مس در الکترولیت با در نظر گرفتن شرط مرزی خاص آن حل خواهد شد. آشفتگی جریان با استفاده از روابط $k-\omega$ مدل خواهد شد. به علت زیادبودن تغییرات خواص، نزدیک کاتد و آند و همچنین بزرگبودن حجم سلول الکترو- وینینگ برای ایجاد شبکه خوب و افزایش سرعت و دقت جواب از شبیهسازی کلی و موضعی در کنار هم استفاده شده است. ابتدا در شبیهسازی کلی، کل هندسه سلول با ایجاد شبکه مناسب مدل میشود سپس در شبیهسازی موضعی تنها حجم بین دو کاتد از سلول در نظر گرفته شده و با مش بسیار ریزتر مدل می شود. دادههای مربوط به شرایط مرزی صفحات مرز مشترک در شبیهسازی موضعی از دادههای مربوط به شبیهسازی کلی به دست میآید که این باعث افزایش دقت مدلسازی می شود. مقایسه نتایج شبیه سازی کلی و موضعی نشان از افزایش دقت تا ۳۰% در نزدیک الکترودها خواهد داشت. از نتایج این شبیهسازی بردار سرعت، مقدار غلظت اسید و مس، شدت آشفتگی، مقدار فشار و مقدار نسبت حجمی فاز اکسیژن در تمامی میدان سلول الکترو- وینینگ است. در آخر برای اعتبارسنجی مدل به دست آمده توسط آزمایشات صورت گرفته روی سلول واقعی در صنعت مقایسه شدهاند. نتایج نشان از دقت بالا با مقدار انحراف کمتر از ۲/۵ درصدی این روش مدلسازی را میدهد.

کلیدواژهها: شبیهسازی هیدرودینامیکی، دینامیک سیالات محاسباتی، سلول الکترو[۔] وینینگ، شبیهسازی کلی و جزیی، اعتبارسنجی آزمایشی

> تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۸/۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۱۴ *نویسنده مسئول: talebi_s@yazd.ac.ir

۱- مقدمه

مس میدوک یکی از مجتمعهای مس کشور در استان کرمان در نزدیکی مجتمع مس سرچشمه و در مجاورت شهر بابک قرار دارد. فرآیند تولید مس عموماً به دو روش پیرومتالورژی برای کانی سولفیدی مس و هیدرومتالورژی برای کانی اکسیدی مس است. در فرآیند هیدرومتالورژی، مس با حلشدن در محلول رقیق الکترولیت اسیدی از کانی استخراج میشود. مزایای این روش مانند آلودگی کم و مصرف انرژی پایین باعث شده به شدت استفاده از این روش در صنعت گسترش یابد.

الکترو- وینینگ (Electro-winning) مس فرآیند بازیابی مس از الکترولیت بهصورت جامد روی صفحه کاتد است که با عبور جریان الکتریکی از میان الکترولیت به منظور جذب یونهای مس روی کاتد صورت می گیرد. الکترو- وینینگ مس در سلول الکترو- وینینگ شامل صفحات الکترودی که رو به روی هم قرار دارند، اتفاق میافتد (شکل ۱). در شکل ۱- الف، ب و پ جزییات سلول الکترو- وینینگ مانند ورودی و خروجی نشان داده شده است.



شکل ۱) الف- فضای کلی سلول الکترو- وینینگ مس؛ ب- ناحیه لوله ورودی در کف سلول، شامل سوراخهای ۴۵درجه نسبت به افق برای ورود الکترولیت با غلظت بالای مس به داخل سلول؛ پ- ناحیه خروجی سلول شامل فضایی در بالا و گوشه سلول که الکترولیت با غلظت مس کم از آن توسط حفرهای خارج میشود؛ ت- فضای بین دو آند که وسط آن کاتد قرار دارد و یونهای مس روی آن مینشیند.

همان طور که مشاهده می شود جریان الکترولیت از لوله ای با سوراخهای تحت زاویه ۴۵درجه نسبت به افق در کف سلول وارد سلول شده و بعد از جریان داخل سلول، مس خود را تخلیه کرده و سپس بهصورت کمغلظت از مس از کانالی در بالای سلول خارج می شود. در ادامه ابعاد به شکل $x \times y \times z$ نشان داده شده است که در آن x اندازه در جهت طول سلول، y اندازه در جهت عرض سلول و z اندازه در جهت عمق سلول است. ابعاد داخلی سلول الکترو-وینینگ در معرض الکترولیت ۱۳۳۵×۱۲۰۰×۴۰۸۰میلیمتر، ابعاد الکترود آند در معرض الکترولیت ۱۰۵۰×۹۴۰×۶۰میلیمتر و ابعاد الكترود كاتد در معرض الكتروليت ۱۰۹۰×۱۰۱۸×۳میلیمتر است. فواصل بين الكترودي ۴۷٬۵mm و تعداد الكترود آند ۴۰ عدد و تعداد الکترود کاتد ۳۹ عدد است. در شکل ۱- ت، جریانی که بین دو الکترود حرکت میکند یونهای مس را روی کاتد تخلیه میکند. حبابهای اکسیژن نیز روی آند تولید میشود. حبابها از محلول الكتروليت عبور نموده و در سطح آزاد الكتروليت مىتركند. مشخص است که حبابهای اکسیژن باعث ایجاد یک ناحیه چرخشی بزرگ می شود و این چرخش به دلیل داشتن طبیعت اختلاط، اثر زیادی در انتقال جرم مس روی کاتد دارد^[1]. در فرآیند الکترو- وینینگ واکنشهای ۱ و ۲ انجام میشود:

واکنش کاتدی $Cu^{2+} + 2e^- \to Cu, \qquad E = 0.34 \, V$ (۱)

واكنش آندى

$$H_2 O \rightarrow H^+ + O H^- \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^-, \quad E = (Y)$$

-1.23 V

واکنش کلی الکترو- وینینگ مجموع واکنشهای آندی و کاتدی بهاضافه یون سولفات است.

 $Cu^{2+} + SO_4^{2-} + H_2O \rightarrow Cu + \frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + SO_4^{2-} \ (\curlyvee)$

با تولید هر مول مس یک مول اسید سولفوریک به الکترولیت اضافه میشود و ۵/مول اکسیژن نیز آزاد میگردد. برای بهبود کیفیت و کمیت مقدار مس تولیدی در الکترو- وینینگ نیاز به میدان سرعتی و غلظتی در داخل سلولهای الکترو- وینینگ است تا نحوه انتقال جرم مس روی کاتد بتواند کنترل شود.

یکی از نخستین مطالعات در این زمینه توسط *فیلزویسر*^[2] انجام شده است. در مطالعه *فیلزویسر* سلول الکترو- وینینگ آزمایشگاهی خاصی شامل یک آند و کاتد برای بررسی سرعت و لایه مرزی بین دو الکترود برقرار شده است و توسط روش لیزری (LDA) دادههای آزمایشگاهی دقیقی برای میدان سرعت بین الکترودها بهدست آورده شده است. از این میدان سرعتی جهت محاسبات مربوط به لایه مرزی غلظتی و چگالی جریان الکتریکی حدی استفاده شده است. این سلول شامل یک آند و کاتد با ورودی و خروجی بوده است.

Volume 20, Issue 1, January 2020

لیهی و *شوارتز*^[3] با شبیهسازی سیالاتی دوبعدی میدان سرعتی را برای سلول آزمایشی *فیلزویسر* با خطای ۲۰% بهدست آوردهاند. مقاله آنها جزء اولین مقالات شبیهسازی سلول الکترو- وینینگ بوده است. بعد از آن به شبیهسازی دوبعدی سلول الکترو- وینینگ فلز روی پرداختهاند و میدان سرعت و غلظتی را برای سلول ساده و خاص آن بهصورت دوبعدی بهدست آوردهاند[4]. همچنین آنها با جزییات بیشتری به شبیهسازی سلول الکترو- وینینگ پرداختهاند. در مقاله آنها برای مدلکردن جریان و انتقال جرم در فضای بین الکترودی یک جفت صفحه تکی (یک آند و کاتد) با هندسه و پارامترهای عملیاتی فرآیند الکترو- وینینگ مس، مدل دوبعدی، دو فازی گاز-مايع، اويلري- اويلري و آشفته بهكار برده شده است^[5]. مدل آنها یک ناحیه چرخشی را پیشبینی کرده است. در مدلسازی آنها فاز پیوسته مایع الکترولیت و فاز ناپیوسته حبابهای گازی اکسیژن و قطر حباب حدود ۱۵۰میکرون فرض شده است. مدل آشفتگی که برای حل در آن مقاله به کارگرفته شده، مدل آشفتگی ${
m k}{
m -}\omega$ است. نتایجی مانند محاسبه میدان سرعت، کانتورهای غلظت مس، کانتورهای کسر حجمی اکسیژن، کانتورهای مربوط به لزجت آشفته جریان بهدست آورده شده است. همچنین ناپایداری جریان در لایه مرزی الکترودها مدلسازی شده است و با درنظرگرفتن عرض بلند آند و کاتد، فضا دوبعدی مدلسازی شده است^[5]. نتیجه مهم آن، اثبات وجود جریان چرخشی بین آند و کاتد و همینطور بهدست آوردن ناپایداری های غلظتی در مرز الکترودها است که باعث انتقال جرم یونهای مس و کیفیت این انتقال خواهد بود.

در مطالعه سلولهای الکترو- وینینگ صنعتی نیاز به مدلسازی سهبعدی است تا بتواند اثرات لبههای الکترودها، مکان و هندسه ورودی و خروجی، جریانهای اجباری ناشی از ورود و خروج سیال از داخل سلول، آشفتگی واقعی که در سه بعد وجود دارد را مدلسازی کند و اثرات پارامترهای مختلف روی هم را مانند اثر غلظت و دبی الکترولیت ورودی سلول به مقدار مس تولیدی بهدست آورد. بحث مدلسازی سهبعدی سلول الکترو- وینینگ صنعتی بهصورت کامل و با جزییات دقیق در صنعت بسیار با اهمیت است و باید مورد مطالعه قرار میگرفت.

مطالعه انجامشده در رابطه با مدلسازی سهبعدی سلول الکترو-وینینگ مس صنعتی توسط *نجمی*^[6] انجام شده است که به مدلسازی فضای ناشی از ۹ عدد الکترود از سلول الکترو- وینینگ مس سرچشمه پرداخته است. در آن مطالعه قسمتی از سلول مس سرچشمه با فرض تکراریبودن شرایط مرزی قسمتهای دیگر و بهصورت سهبعدی مدلسازی شده و مدل آشفتگی بهکارگرفتهشده، مدل آشفتگی k-w است. از آنجا که تنها قسمتی از فضای سلول مس سرچشمه مدلسازی شده است، بررسی دقیق سلول صنعتی در طول سلول انجام نخواهد شد و همینطور برای مدلکردن فاصله بین آند و کاتد ایجاد شبکه محاسباتی روی کل یک سلول بهتنهایی جواب دقیقی نخواهد داشت. دلیل مدلسازی قسمتی از سلول این

۲۱۸ سیدعلیاکبر پوراحمدی و شهرام طالبی ـــ

الکترودها در حد کوچکتر از لایه مرزی غلظتی است. این شبکه محاسباتی با توجه به طول و عرض زیاد الکترودها و تعداد زیاد آنها برای دقیقبودن در حجم سلول بسیار زیاد خواهد بود. از طرفی در همگرایی در حل مساله بسیار کند خواهد بود. در نتیجه برای حل سهبعدی دقیق نیاز به ارائه راهکار جدیدی است. راهکاری که بتوان مساله الکترو- وینینگ صنعتی را با سرعت بالا و دقت زیاد مدل کرد در مطالعات انجامشده، وجود نداشته است؛ به همین دلیل به مطالعات روی مسالههای دیگر شبیه به الکترو- وینینگ بهخصوص پالایش مس پرداخته شده تا بتوان از آن برای مساله الکترو- وینینگ استفاده کرد.

در مقاله *کمینگر* و */ودویگ*^[7]، به مدلسازی یک سلول پالایشگاه مس پرداخته شده است. سلول پالایشگاه مس شبیه به سلول الکترو-وینینگ است با این تفاوت که در آن واکنشهای فرآیندی دیگری اتفاق میافتد که با فرآیند الکترو- وینینگ متفاوت خواهند بود. در آن مقاله برای ایجاد مدلسازی با سرعت و دقت بالا از دو نوع مدلسازی به موازات هم استفاده شده است. مدلسازی محلی که ناحیه بین الکترود آند و کاتد را با دقت زیاد مدل میکند و شرایط مرزی و اولیه خود را از مدلسازی کلی که تمام سلول را با دقت متوسط مدل میکند دریافت میکند. با این روش مدلسازی *کمینگر* توانست مدلسازی سلول پالایش مس را با سرعت و دقت بالا انجام دهد.

در مقاله حاضر سعی شده است برای رفع مشکل دقت و زمانبربودن، با توجه به روش مدلسازی کلی و محلی یک سلول الکترو- وینینگ صنعتی بهصورت کامل، سهبعدی مدلسازی شود. مدلسازی محلی مانند آنچه *کمینگر* بهکار گرفته است، مدلسازی بسیار دقیق نواحی بین کاتد و آند با توجه به شبکه محاسباتی ریز در این ناحیه است. مدلسازی کلی نیز مدلسازی با دقت متوسط در نواحی بین آند و کاتد و دقیق برای بقیه سلول با توجه به فیزیک مساله و شبکه محاسباتی متوسط آن برای این نواحی است. شایان ذکر است این روش برای اولین بار در سلول الکترو- وینینگ بهکار گرفته شده است. برای ارزیابی دقت این روش، مدل با مدلسازی کلی مقایسه شده و برای اعتبارسنجی، نتایج مدلسازی با نتایج آزمایشی سلول واقعی که در واحد الکترو- وینینگ مس میدوک انجام شده است، مقایسه و تطابق داده شده است. از آنجا که مدل بهصورت کامل و فضاهای موضعی، دقیقتر خواهد بود.

۲- مدلسازی

برای شروع شبیه سازی، ابتدا مراحلی قدم به قدم در نرم افزار طراحی Ansys CFX پیاده شده است. مدل کردن هندسه سلول الکترو-وینینگ (اولین قدم در شبیه سازی) مس میدوک براساس نقشه های اجرایی موجود است. شکل ۲ نشان دهنده هندسه سلول الکترو-وینینگ مدل سازی شده است.

از آنجا که سلول الکترو- وینینگ هم از لحاظ فیزیکی و هم هندسی متقارن است، در شکل ۲- الف مدل هندسی نصف این سلول نمایش داده شده است. مدلسازی کلی روی هندسه شکل ۲- الف انجام شده است. شکل ۲- ب نشاندهنده قسمتی از سلول است که بهصورت موضعی مدلسازی شده است. این قسمت فاصله بین دو آند را شامل کاتد، دیوار، فضای داخل سلولی، لوله و نازل ورودی نشان میدهد. شکل ۲- پ از حذف فضاهای موضعی از فضای کلی بهدست آمده است.

قدم بعد برای شبیهسازی تولید مش یا شبکه محاسباتی روی میدان حل بوده است. مشربندی دارای قواعد مهمی است که باید رعایت شود:

- مش، متناسب با گرادیانهای غلظتی یا سرعتی در نواحی مختلف ریزتر یا درشتتر شده است.

- مش تا حد امکان به مکعب در شبکههای سازمانیافته و در غیرسازمانیافته به ۴وجهی منتظم نزدیک شده است.

مش بندی در هندسه سلول الکترو- وینینگ با رعایت این موارد انجام شده و در نواحی مختلف برای افزایش سرعت حل از ترکیب مش سازمانیافته و غیرسازمانیافته استفاده شده است. تعداد مش در طول حل برای همگرایی سریعتر متغیر درنظر گرفته شد و در طول حل براساس گرادیان غلظت در ۴ مرحله تراکم مش افزایش یافته است، حل مساله ابتدا با تعداد مش ۱۰ شروع و تا حداکثر تعداد مش ۱۰٬×۶/۳ در آخر حل با مش ریزی دوباره روی مدل رسیده است. رعایت این عوامل باعث میشود که با کمترین تعداد مش بیشترین دقت در حل و همچنین همگرایی حل وجود داشته باشد.

در شکل ۳ مشربندی در فاصله بین دو کاتد نشان داده شده است. شکل۳- الف، ریزترین مش را برای مدلسازی کلی و شکل ۳- ب ریزترین مش را برای مدلسازی موضعی در صفحهای عمود بر الکترودها در وسط سلول نشان داده است. برای استقلال از شبکه محاسباتی تغییرات ریشه میانگین مربعات اختلافات برای میدان سرعت، غلظت و فشار در تغییر اندازه مشها در این ۴ مرحله درنظر گرفته شد. این مقدار در تعداد مش ۱۰×۶/۳ نسبت به تعداد مش ۱۰×۶/۳/۶ کمتر از مش ۱۰۰ شد.

بهدلیل اینکه لایه مرزی غلظتی کاتد نزدیک به μm ۵۵۵ است لایه اول مش روی الکترودها در هر دو مدل دارای عرض ۳۰۰μ است. مقدار ضخامت لایه مرزی غلظتی نزدیک الکترودها در این مقاله براساس نتایج مدلسازی بهدست آمده و در مقاله *کنیگ* و همکاران^[8] نیز بهصورت آزمایشی بهدست آمده است. لایههای مش با ضریب هندسی مناسب روی الکترودها گسترده شده است. این مقدار گستردگی هم از طرف آند و هم کاتد باعث میشود قسمت اعظم ناحیه با گرادیان غلظتی و سرعتی بزرگ را شامل شود و همین طور در لایه مرزی غلظتی برای ایجاد طرح مناسب ۲ لایه مش وجود داشته باشد.



شکل ۲) مدل هندسی سلول الکترو- وینینگ میدوک؛ الف) مدل کلی، ب) مدل موضعی بین دو آند، پ) مدل موضعی هندسه کلی منهای مدلهای موضعی فواصل بین آند و کاتدها

۳- معادلات حاکم

مدل شبیهسازی این سلول مدل اویلری- اویلری است. این مدل معادلات ممنتوم و پیوستگی را برای هر فاز حل میکند. توصیف جریان چند فازی بهعنوان محیط پیوسته و در هم نفوذکننده، بیانکننده مفهوم کسرهای حجمی- فازی است که با a_{q} نشان داده میشود. کسر حجمی بیانگر فضای اشغالشده توسط هر فاز است و قوانین بقای جرم و ممنتوم برای هر فاز بهطور جداگانه ارضاء میشود.

رابطهای که با توجه به تعریف کسرهای حجمی برای جریان دو فازی موجود است رابطه ٤ است^[9]:

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1 \tag{(F)}$$

درصورتی که مساله دائم باشد، معادلات پیوستگی بهصورت کلی با رابطه ۵ بیان خواهد شد:

$$\frac{\partial(\rho_N \alpha_N u_{Ni})}{\partial x_i} = S_N \tag{(a)}$$

ρ_N بهترتیب نماینده فاز الکترولیت و گاز اکسیژن است. N=1, 2 چگالی فاز، S_N بهعنوان جمله چاه مس در کاتد یا جمله چشمه اکسیژن در آند است که طبق روابط فارادی در شرط مرزی آنها تعریف و در بخش شرط مرزی توضیح داده شده است.

رابطه ممنتوم هر فاز در رابطه (۶) موجود است که این رابطه بهصورت پایا است^[9]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_N \alpha_N u_{Ni} u_{Nk}) = \alpha_N \rho_N g_k + F_{Nk} - \delta_N \left\{ \frac{\partial p}{\partial x_k} - \frac{\partial \sigma_{Cki}^D}{\partial x_i} \right\}$$

Volume 20, Issue 1, January 2020

که σ تانسور تنش در میدان سیال دو فازی است و توسط رابطه σ می توسط رابطه $\frac{\partial \sigma^D_{Cki}}{\partial x_i} = \mu_N \frac{\partial^2 \alpha_N u_{Nk}}{\partial x_i^2}$



شکل ۳) مشربندی بین دو صفحه کاتد که در وسط صفحه آند قرار دارد. الف) مدلسازی کلی، ب) مدلسازی موضعی

در رابطه (۶)، ۰
$$\delta_2$$
= ۱، δ_2 و F_{Nk} نیروی عکسالعمل از طرف دیگر

۲۲۰ سیدعلیاکبر پوراحمدی و شهرام طالبی

فازها روی فاز N و در جهت k است که طبق قانون سوم نیوتن رابطه (۷) موجود است:

$$\sum_{N} F_{Nk} = 0 \tag{(Y)}$$

با استفاده از رابطه پیوستگی یک فاز در میان فازهای دیگر رابطه ممنتوم (۶) برای یک تکفاز N بهصورت رابطه (۸) ساده خواهد شد: (۸)

$$\rho_N \alpha_N \left\{ u_{Ni} \frac{\partial u_{Nk}}{\partial x_i} \right\} = \alpha_N \rho_N g_k + F_{Nk} - Y_N u_{Nk} - \delta_N \left\{ \frac{\partial p}{\partial x_k} - \frac{\partial \sigma_{Cki}^D}{\partial x_i} \right\}$$

که Y_N شدت انتقال جرم به فاز N است. F_{Nk} از برآیند \mathfrak{r} نیروی موجود در رابطه (\mathfrak{r}) بهدست میآید $^{[6,9]}$.

 $f_{Nk} = F_{N,drag \, k} + F_{N,turb \, k} + F_{N,grav \, k} + F_{N,conc \, k}$ (۹) برای نیروی درگ حباب در حجم کنترلی که کسر حجمی α_D از آن را حباب تشکیل داده باشد، رابطه سادهشده شیلر- نیومن در رابطه (۱۰) نشان داده شده است^[6].

$$F_{N,drag\,k} = -\frac{3}{4} \frac{c_D}{d} \rho_C \alpha_D |W_k| W_k \tag{10}$$

W بردار اختلاف سرعت بین فازهای دیگر از فاز N است و ضریب درگ نیز در رابطه (۱۱) محاسبه میشود^[6]:

$$C_{\rm D} = \frac{24}{\rm Re} (1 + 0.15 \rm Re^{0.687}) \tag{11}$$

اختلاف غلظت ایجادشده در یک فاز پیوسته میتواند باعث ایجاد تفاوت چگالی و در نتیجه اختلاف وزن نقاط مختلف سیال شود. در نتیجه نیروی گرانشی که بر این اختلاف وزن اثر گذاشته نیروی شناوری غلظتی را بر فاز پیوسته وارد میکند که طبق رابطه (۱۲) بیان شده است:

$$\vec{f}_{N,conc} = \delta_{N,1} \alpha_N \left[-\rho_N \vec{g} \beta \left(C - C_{ref} \right) \right] \tag{1Y}$$

 β ضریب انبساط غلظتی، C غلظت مس و C_{ref} غلظت مس ورودی است. در معادله انتقال ممنتوم بخشی از نیرو ناشی از تفاوت غلظت است، در نتیجه رابطه دیگری که باید حل شود و با معادله ممنتوم کوپل است، معادله انتقال گونهها است که طبق رابطه (۱۳) با غلظت ارتباط دارد^[3].

$$\vec{\nabla} \cdot \left(\alpha_1 C_{Cu} \vec{U}_1 \right) = \vec{\nabla} \cdot \left(\alpha_1 \left(\rho_1 D_1 + \frac{\mu_{T,1}}{Sc_T} \right) \vec{\nabla} \left(\frac{C_{Cu}}{\rho_{Cu}} \right) \right) + S_{Cu} \quad (1)$$

این معادله نشان میدهد که یونهای مس چگونه در اثر وجود اختلاف غلظتی در میدان سیال جابجا میشوند و در واقع انتقال جرم مییابد. *C*، *Sc* و *Sc* بهترتیب ضریب نفوذ یون مس، عدد اشمیت آشفتگی و جمله چشمه شار جرمی برای مثال در آند و چاه شار انتقال جرم در کاتد است.

برای جمله ناشی از نیروی شناوری تغییر چگالی رابطه (۱۴) برقرار است:

$$\vec{\mathbf{F}}_{N,grav} = \alpha_N (\rho_N - \rho_{ref}) \vec{g} \tag{14}$$

ماهنامه علمی- پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس

 $ec{g}$ که ho_N چگالی فاز N، جع یا ورودی الکترولیت و $ec{p}_N$ شتاب جاذبه زمین است. در نهایت جمله ناشی از نیروی توربالانسی توسط رابطه (۱۵) بهدست خواهد آمد:

$$\vec{\mathbf{F}}_{N,turb} = (-1)^N \mathcal{C}_{td} \rho_N K \, \vec{\nabla} \, \alpha_N \tag{10}$$

 C_{ta} ضریب نیروی پراکندگی آشفته است که یک درنظر گرفته میشود. در جریان دوفازی میتوان جریان هر فاز نوع آرام یا آشفته باشد. در جریان داخل سلول الکترو- وینینگ از آنجا که عدد رینولدز برای حالت گاز و مایع کوچک است^[6]، جریان بهنظر میرسد آرام باشد. اما بهدلیل وجود جریان طبیعی بزرگ ناشی از اختلاف غلظت و درگ حرکت حباب دارای عدد رایلی بسیار بزرگی است. در نتیجه جریان فاز الکترولیت آشفته و فاز گاز بهدلیل کوچکبودن حباب آرام فرض شده است^[6].

برای تحلیل آشفتگی مدلهای متفاوتی وجود دارد. یکی از بهترین آنها برای مساله الکترو- وینینگ بهعلت وجود دیوارهها و جریان طبیعی غالب مدل دو معادلهای k-w است. معادلات آن برای یک فاز بهصورت روابط (۱۶) است $^{[9]}$:

$$\frac{\partial(\rho \kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \kappa)}{\partial x_j} = \rho P - \beta' \rho \omega K + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{1}{\sigma_K} \rho \frac{\kappa}{\omega} \right) \frac{\partial(\kappa)}{\partial x_j} \right] \\ \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\alpha \omega}{\kappa} P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{1}{\sigma_\omega} \rho \frac{\kappa}{\omega} \right) \frac{\partial(\omega)}{\partial x_j} \right] + \frac{\rho \sigma_d}{\omega} \frac{\partial(\kappa)}{\partial x_j} \frac{\partial(\omega)}{\partial x_j}$$

(۱۲) تعریف می شوند:

$$\mu_t = \rho \frac{\kappa}{\omega}$$

 $\beta' = 0.09$
 $\alpha = \frac{5}{9}$
 $\beta = 0.075$
 $\sigma_K = 2$
 $\sigma_\omega = 2$

۴- پارامترها و شرایط مرزی سلول

(18)

شرط مرزی دیواره از نظر محدودیت میتواند به دو نوع شرط عدم لغزش و شرط لغزش آزاد تقسیم شود، شرط عدم لغزش که • U_{wall} است و شرط لغزش آزاد که طبق رابطه (۱۸) تعریف میشود: $U_{n,Wall} = 0$ و $\tau_w = 0$ (۱۸)

کلیه دیوارههای سلول و آند و کاتد دارای شرط مرزی دیواره عدم لغزش برای فاز الکترولیت و شرط لغزش آزاد برای فاز اکسیژن گازی میباشند. در بسیاری از مقالات با اعتبار آزمایشی شرط لغزش آزاد برای حباب گازی در جریان دوفازی درنظر گرفته شده است^[10].

بری بر بری و بری و بری و روی و روی و رو سطح آزاد بالای سلول دارای شرط مرزی گاززدا است. این شرط برای میکند و برای حبابهای گازی که فاز گسسته است، مانند خروجی همسرعت با گازی که به سطح آزاد رسیده است، عمل میکند. در نتیجه حباب گاز اکسیژن با همان سرعتی که به سطح میرسد آن را ترک میکند.

آند و کاتد دارای شرط مرزی دیواره عدم لغزش برای فاز الکترولیت و دیواره لغزش آزاد برای فاز اکسیژن گازی است و از آنجا که واکنش تولید اکسیژن نیز در آند رخ میدهد چشمه تولید اکسیژن نیز است.

مقدار جرمی که هنگام اکسیداسیون از سیال مجاور الکترود به واسطه میدان الکتریکی جذب الکترود میشود و یا از آن دفع میشود، طبق قانون فارادی به جریان الکتریکی سلول ارتباط دارد. حجم کلی اکسیژن تولید شده در آند به جریان الکتریکی آن بهطور خطی ارتباط دارد. با توجه به قانون فارادی برای دبی ظاهری گاز تولیدی کلی توسط رابطه (۱۹) بهدست خواهد آمد^[1,6].

$$Flux_{OX} = \frac{IM_{O2}}{z_{O2}F} \tag{19}$$

که I جریان الکتریکی کلی روی سطوح آند و کاتد، F ثابت فارادی، M_{0_2} جریان الکتریکی کلی روی سطوح آند و کاتد، M_{0_2} جرم مولی اکسیژن و z_{0_2} تعداد الکترونهای آزادشده توسط یون اکسیژن است. برای شرط مرزی کاتد نیز رابطه (۲۰) وجود دارد: $Flux_{cu} = \eta \frac{IM_{cu}}{z_{cu}F}$ (۲۰)

 M_{cu} جرم مولی مس و Z_{cu} تعداد الکترونی است که یون مس میگیرد. η بازده جریان الکتریکی کاتدی که معمولاً حدود ۸۸ تا ۹۲% است^[1]، به شرایط کاری سلولها ارتباط دارد. ذکر این نکته قابل اهمیت است که الکترولیت بهصورت مخلوط تکفاز متغیر پیوسته شامل دو ترکیب یون مس و اسید سولفوریک رقیقشده درنظر گرفته شده است تا بتواند تغییر کسر جرمی مس را در آن نشان داد.

برای شرط مرزی ورودی، دبی ثابت یکنواخت با شرایط واقعی صنعتی درنظر گرفته میشود که تنها شامل الکترولیت با غلظت مس واقعی است. این ورودی توسط سوراخهای مورب لولهای که در گوشه پایین قرار دارد، خارج میشود. شرایط فازی ماده خروجی تنها الکترولیت و با غلظت مس واقعی صنعتی درنظر گرفته میشود. صفحه عمودی طولی وسط سلول مرز صفحه تقارن وجود دارد که هم تقارن فیزیکی و هم تقارن هندسی در آن وجود دارد. شرط مرزی تقارن طبق روابط ۲۱ نشان داده میشود:

$$U_n = 0 \,_{\varrho} \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \tag{(Y1)}$$

که ϕ شامل همه پارامترهای اسکالر مانند فشار، غلظت و کسر حجمی میشود. در جدول ۱، پارامترهای صنعتی واقعی مورد نیاز برای سلول الکترو- وینینگ میدوک برای مقایسه مدلسازی کلی و موضعی آورده شده است.

روش حل عددی مورد استفاده در نرمافزار تجاری Ansys CFX براساس الگوریتم حلگر تمام کوپل است. از آنجا که در این الگوریتم تمام معادلات بهصورت کوپل با هم و ضمنی حل میشوند، مقدار حافظه بیشتری اشغال میکند؛ اما همگرایی بالاتری نسبت به الگوریتمهایی مانند سیمپلسی دارد که در دیگر کدهای تجاری مورد معادلات آشفتگی، ممنتوم، پیوستگی، غلظتی استفاده شده است که خود همگرایی بالاتری ایجاد میکند. برای افزایش سرعت از پردازش موازی ۸ قسمتی روی پردازنده ۸ هستهای با سرعت شده است.

...... شبیه سازی هیدرودینامیکی جریان دوفازی در یک سلول الکترووینینگ صنعتی ۲۲۱ جدما ۱۰) بارامترهای صنعتی میدمک

	بدون () پرمشرندی عشتگی میکدون
مقدار	پارامتر
۱۹۶A/m2	چگالی جریان الکتریکی I
$1/\Delta \frac{lit}{s}$	دبی ورودی سیال
$\rho_1 = 1 \gamma_{\circ \circ} \frac{kg}{m^3}$	چگالی الکترولیت
$\rho_2 = 1/\gamma \frac{kg}{m^3}$	چگالی اکسیژن
$\mu_1 = 1/1 \Lambda \times 10^{-4} \frac{kg}{m_s}$	لزجت الكتروليت
$\mu_2 = \gamma / \lambda \times 10^{-2} \frac{kg}{m.s}$	لزجت اكسيژن
$D = \Lambda / \Im Y \times 10^{-12} \frac{m^2}{s}$	ضريب نفوذ
٥/٥٧٤٩	$t_{\scriptscriptstyle +}$ عدد انتقال
$\circ/\circ\circ 19 \frac{m^3}{kg}$	eta ضریب انبساط
$\Psi \mathcal{F} \frac{kg}{m^3}$	\mathcal{C}_{ref} غلظت ورودی و مرجع
$\lambda \circ \frac{kg}{m^3}$	غلظت اسيد

۵- اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی، مدل غلظت جرمی یونهای مس در سلول الکترو-وینینگ مس میدوک روی دو خط اندازهگیری شده است. این اندازهگیری توسط برداشتن نمونههای کوچک توسط میکروپیپت و استفاده از روش تیتراسیون انجام شده است. در تیتراسیون به نمونه یدید پتاسیوم اضافه شده و سپس با تیوسولفات سدیم تیتر شدهاند. در این روش یونهای مس کاهش داده شده و تهنشین میشوند. واکنش طبق رابطه ۲۲ انجام شده است:

$$2Cu^{2+} + 4I^- \rightarrow 2CuI(s) + I_2 \tag{(YY)}$$

ید تولیدشده توسط تیوسولفات سدیم اندازهگیری شده و سپس توسط استوکیومتری مقدار یونهای مس اندازهگیری شده است. واکنش طبق رابطه ۲۳ انجام شده است:

$$2Na_2S_2O_3 + I_2 \rightarrow Na_2S_4O_6 + 2NaI \tag{YY}$$

برای تشخیص دقیق نقطه انتهایی تیتراسیون از چسب نشاسته استفاده شده است. مقدار عدم قطعیت در نتایج آزمایش غلظت مس توسط تیتراسیون با تکرار دو بار برای هر نقطه، استفاده از چسب نشاسته، استفاده از میکروپیپت برای نمونهبرداری مقدار کم، انجام آزمایش توسط وسایل دقیق و دمای حدود ۲۵درجه کاهش یافته است و عدم قطعیت استاندارد نسبی برای تیتراسیون حدود ۱/۰% است.

کار آزمایشی در ۲ مرحله انجام شده است. تفاوت هر کدام از مراحل در این است که در دو زمان متفاوت با فاصله زمانی چند روزه و در دو سلول متفاوت و بین دو الکترود با مکانهای متفاوت و از لحاظ تولید دارای شرایط متفاوت ورودی و خروجی و جریان الکتریکی انجام شده است. هر کدام از این مراحل در ادامه با a و d نشان داده شده است. آزمایش در دو روز مختلف و در نتیجه با شرایط متفاوت سلول انجام شده است. در هر مرحله ۲ خط مختلف در سلول و بین دو الکترود یکسان درنظر گرفته شده است. خط اول خط افقی وسط دو صفحه الکترودی کاتد تا آند و در فاصله مشخصی

۲۲۲ سیدعلیاکبر پوراحمدی و شهرام طالبی

از سطح الکترولیت و خط دوم خطی عمودی از سطح الکترولیت تا کف سلول و در وسط بین الکترود کاتد و آند است. برای هر کدام از این مراحل و خطوط در چند نقطه توسط دستگاه ساختهشده برای نمونهبرداری (شامل یک میکروپیپت و دو خطکش میلیمتری ویژه و پایه) نمونه برداشته شده و توسط روش تیتراسیون غلظتسنجی مس با دقت روی آنها انجام شده است. شرایط دبی و غلظت ورودی و خروجی، چگالی جریان الکتریکی و فاصله خط افقی از سطح الکترولیت در دو مرحله a و b در جدول ۲ نشان داده شده است.

در شکل ۴ غلظت مس بهدست آمده از آزمایش در مقایسه با غلظت مس بهدست آمده از شبیه سازی در مراحل مختلف a و d برای خط افقی بین کاتد و آند نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود محور افقی فاصله بین دو الکترود از کاتد تا آند و محور عمودی نیز غلظت مس است. در دو نقطه نزدیک به الکترودها انحراف نتیجه آزمایشی تا مقدار به دست آمده از مدل سازی بیشتر است که دلیل آن می تواند مواردی مانند سخت بودن نمونه گیری مطلوب نزدیک الکترودها با فاصله کم از آنها و اغتشاشات به وجود آمده ناشی از اثر میکروپیپت نزدیک دیواره الکترودها باشد. چون تغییرات غلظت نزدیک به کاتد بسیار زیاد است، در نتیجه اغتشاشات کوچک ناشی از وسیله آزمایشی نیز می تواند روی غلظت اثر شدیدی بگذارد.

جدول ۲) پارامترهای مختلف در مراحل a و b

مرحله b	مرحله a	پارامتر
$\Psi_{\circ\circ} \frac{m^3}{hr}$	$\Psi\Psi_{\circ} \frac{m^3}{hr}$	دبی ورودی الکترولیت به تمام سلولها
$\Psi \mathcal{F} \frac{kg}{m^3}$	$WF/F \frac{kg}{m^3}$	غلظت مس الكتروليت ورودى
$Y9\Delta \frac{A}{m^2}$	$Y \land 9 \frac{A}{m^2}$	چگالی جریان الکتریکی الکترود
۵۱ <i>. mm</i>	Y∘ mm	فاصله از سطح الكتروليت
$\mathcal{W}_{o/1} \frac{kg}{m^3}$	$\mathcal{V}_{\circ} / \Im \frac{kg}{m^3}$	غلظت مس الكتروليت خروجى

ذکر این نکته قابل توجه است که دامنه مقدار غلظت مس در محور عمودی نمودارهای ۱ و ۲ از حدود ۱۶ تا ۳۴/۶ گرم بر سانتیمتر مکعب نشان داده شده است. این دامنه کمترین و بیشترین مقدار غلظت مس در کل سلول الکترو- وینینگ است که در مدلسازی بهدست آمده است. بیشترین غلظت مس در ورودی و کمترین غلظت مس نیز روی سطح نزدیک کاتد است.

در نمودار ۲ غلظت بهدستآمده از آزمایش در مقایسه با غلظت بهدستآمده از شبیهسازی در مراحل مختلف a و d برای خط عمودی از سطح الکترولیت تا کف سلول نشان داده شده است. همانطور که در این نمودار نشان داده شده است، مقدار انحراف بسیار کمی بین مدلسازی و آزمایش حتی در شرایط بالای سلول که چرخش و آشفتگی شدید هست، وجود دارد.

انحراف نتایج آزمایشی نسبت به نتایج مدلسازی توسط رابطه ۲۴ تعریف میشود:

$$Err = \sum_{i=1}^{n} \frac{\left| c_i^{experimental} - c_i^{simulation} \right|}{c_{max} - c_{min}} \tag{YF}$$

ماهنامه علمی- پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس

n تعداد نمونهگیری روی هر خط داخل سلول است و بیشترین غلظت مربوط به غلظت ورودی و کمترین آن در لایه مرزی کاتد محاسبه میشود. محاسبات نشان از انحراف ۲/۶% برای آزمایش مرحله a و ۲/۸% برای آزمایش مرحله d روی خط افقی و انحراف ۸۴/۰۰% برای مرحله a و ۲/۸۵% برای مرحله b روی خط عمودی میدهد.



نمودار ۱) غلظت مس روی خط افقی وسط الکترودها (خطوط، نشاندهنده غلظت مس بهدستآمده از شبیهسازی و نقاط، نشاندهنده دادههای آزمایشی برای نمونه a و نمونه d است.)



نمودار ۲) غلظت مس روی خط عمودی بین دو الکترودها (خطوط، نشاندهنده غلظت مس بهدستآمده از شبیهسازی و نقاط، نشاندهنده دادههای آزمایشی برای نمونه a و نمونه d است.)

۶- نتایج مدلسازی

در این بخش به بررسی نتایج مدلسازی سلول پرداخته شده است. غلظت مس در ورودی $\frac{kg}{m^3}$ ۳۶ C_{in} است و با ازدستدادن مس خود روی صفحات کاتد از خروجی خارج میشود. در شکل ۴، نواحی مختلف از لحاظ غلظت مس دیده میشود. این شکل نشان میدهد لایه مشکی با غلظت بیش از $\frac{kg}{m^3}$ ۵۳ و بعد از آن لایه سفیدرنگ با

غلظت بین ۳۴ تا $\frac{kg}{m^3}$ ۳۵ بیشترین غلظت مس را دارند و حجم ناحیه پایین سلول و زیر کاتدها و آندها را تشکیل دادهاند و توسط انتقال جرم طبیعی، مس را به قسمتهای بالاتر جابجا میکنند. شکل ۵ مقادیر سرعت کلی سیال را با پردازش رنگی نشان داده است. دهانه ورودیها و خروجی بالاترین سرعت در سلول را با رنگ مشکی و سرعت حدود ۲m/s، دارند. بعد از آنها فاصله نزدیک آندها و کاتدها و بین آنها بیشترین سرعت را داخل سلول با سرعت حدود ۵۰/۰ تا ۲m/s، دارند. در اکثر حجم زیر الکترودها که دارای بیشترین غلظت مس نیز است، سرعت بسیار کم خواهد بود. در نتیجه انتقال مس از کف سلول توسط انتقال جرم ناشی از نفوذ مولکولی به لایههای بالاتر انتقال مییابد.



شکل ۴) پردازش رنگی حجم سلول الکترو- وینینگ براساس غلظت مس؛ سیاه: بیش از ۳۵کیلوگرم بر متر مکعب، خاکستری: کمتر از ۳۴کیلوگرم بر متر مکعب، سفید: بین ۳۴ تا ۳۵کیلوگرم بر متر مکعب



شکل ۵) پردازش رنگی براساس سرعت سیال؛ سیاه: بیشتر از m ۲/۰، خاکستری: بین ۵۰/۰ و m ۲/۰، سفید: بین ۱/۰ و m ۲/۰

در شکل ۶ نواحی که اکسیژن گازی در آنها از مقدار کسر حجمی ۱ تا ۱۰۰% وجود دارد را نشان میدهد. اطلاعات مربوط به این نواحی برای مدلسازی ایجاد مه اسیدی بالای سلولها^[1] یا مدلسازی جهت پاشش هوا داخل سلول^[1] برای بهینهسازی تولید و کیفیت مهم است.

Volume 20, Issue 1, January 2020

<u>سیه سازی هیدرودینامیکی جریان دوفازی در یک سلول الکترووینینگ صنعتی ۲۷۳</u> شکل ۷ کانتور غلظت اکسیژن را از نمای بالای سلول الکترو- وینینگ روی سطح آزاد نشان میدهد. رنگ سفید نشاندهنده الکترولیت با غلظت اکسیژن کمتر است. همانطور که در این شکل دیده میشود در سطح آزاد با خروج حبابهای اکسیژن که در اطراف آند تجمع بیشتری داشتهاند باعث ایجاد جریان الکترولیت به داخل و بین الکترودها میشود.



شکل ۶) پردازش رنگی حجم براساس کسر حجمی حباب اکسیژن؛ رنگ خاکستری: کسر حجمی بیش از ۱%



شکل ۲) نمایی از سطح آزاد سلول الکترو- وینینگ که رنگ تیره وجود اکسیژن بیشتر را نشان میدهد.

در شکل ۸، چند خط جریان در ورودی سلول نشان داده شده است. این خطوط با توجه به آرامبودن جریان در کف سلول بهدلیل سرعت کم (حدود ۵۰/۰متر بر ثانیه) و در نتیجه عدد رینولدز کوچک جریانی آرام به سمت خروجی طی میکنند. اما در خطوط جریانی که به فضای بین الکترودی نفوذ میکند، با توجه به فضای کوچک بین الکترودی (۴۵میلیمتر) و وجود جریانهای طبیعی با سرعتهای زیاد (حدود ۲/۰متر بر ثانیه) به صورت آشفته و با پیچیدگی زیاد (بهدلیل وجود نیروهای مختلف) خواهد شد. شکل ۹ این پیچیدگی را برای یک جریان ورودی به داخل فضای بین الکترودی نشان داده است.

در شکل ۱۰، کانتور غلظت مس برای صفحه وسط دو الکترود نشان داده شده است. در این شکل رنگ روشن، غلظت مس بیشتر را نشان میدهد. همانطور که مشاهده میشود جریان ورودی توسط لوله باعث بالابردن غلظت مس در ناحیه پایین کاتد میشود.

۲۲۴ سیدعلیاکبر پوراحمدی و شهرام طالبی



شکل ۸) خطوط جریانی که از ورودی وارد سلول میشوند، جریانی آرام را در مسیر کف سلول تا خروجی دنبال میکنند و اگر وارد فضای بین الکترودها شوند جریانی بسیار پیچیده و آشفته را طی خواهد کرد.



شکل ۹) یک خط جریان در بین دو الکترود داخل سلول الکترو- وینینگ نشان داده شده است. تغییر رنگ خط جریان حرکت در جهت عمق صفحه و فاصله از کاتد و آند را نشان داده است.



شکل ۱۰) کانتور غلظت مس روی صفحه وسط آند و کاتد. رنگ روشنتر غلظت بیشتر مس را نشان میدهد.

با توجه به شکل ۱۱، انرژی آشفتگی جنبشی در نواحی که سرعت بیشتری دارند، بهخصوص نزدیک به آندها، بیشتر است. در نمودار ۳، منحنی غلظت مس در فاصله بین خطی عمود بین صفحات آند و کاتد یکسان برای هر دو مدل کلی و موضعی نشان داده شده است. در این شکل سمت چپ آند و سمت راست کاتد است و تخلیه مس روی کاتد سبب خالیشدن مس محلول در سمت راست نمودار (کاتد) شده است. مدلسازی کلی الف برای الکترولیت نواحی میانی فضای بین الکترودی انحراف کمی دارد، اما در نزدیک الکترودها و مخصوصاً الکترود کاتد مقدار انحراف بسیار زیاد شده است. از آنجا که این ناحیه بسیار مهم است لذا لزوم استفاده مدلسازی موضعی در موازات مدلسازی کلی مشخص میشود.



شکل ۱۱) پردازش رنگی حجم براساس انرژی جنبشی آشفته



نمودار ۳) منحنی غلظت مس بین خطی عمود بین صفحات آند و کاتد؛ الف) مدلسازی کلی و ب) مدلسازی موضعی

در نمودار ۴، سرعت عمودی فاصله بین دو الکترود را در دو مدلسازی کلی (الف) و موضعی (ب) نشان میدهد. سرعت طرف چپ (آند) بهدلیل درگ ناشی از حرکت حباب زیاد است. در وسط به علت چرخش جریان سرعت کم شده و جهت جریان به سمت پایین میشود. در سمت راست نیز به علت نیروی شناوری ایجادشده ناشی از تخلیه مس سرعت در فاصله کمی نزدیک کاتد رو به بالا میشود.

همانطور که در این شکل دیده میشود در مدلسازی موضعی جزییات با دقت مشاهده میشود. خطای نسبی متوسط طبق رابطه ۲۵ تعریف شده است:

$$err = \frac{\sum_{n\Delta V} \Big|_{Case_{\Delta S}}^{Case_{\Delta S}}}{n.V_{\max}}$$
(Y۵)

که در رابطه ۲۵، n برابر تعداد نقاط محاسبه شده بین دو آند و کاتد در هر دو مدلسازی برابر ۱۰۰ بوده است. محاسبات، خطای نسبی متوسط مدلسازی کلی نسبت به مدلسازی موضعی را حدود ۷% نشان داده است. هرچند مقدار خطای نسبی بین دو مدلسازی در بعضی نقاط به صورت موضعی تا ۳۰% نیز می رسد.



نمودار ۴) سرعت عمودی بین خطی عمود بین صفحات آند و کاتد یکسان برای مدلسازی کلی (الف) و مدلسازی موضعی (ب)

۷- نتيجه

در این مقاله ابتدا سلول الکترو- وینینگ میدوک بهطور کامل مدلسازی شد. برای افزایش دقت این مدلسازی برای اولین بار از مدلسازی موضعی بهصورت موازی با مدلسازی کلی استفاده شد. با ترکیب این دو نوع مدلسازی کلی و موضعی، توانایی زیادی برای افزایش دقت در عین سرعت حل پیدا شد. واقعیت اصلی که نتیجه این کار است این است که برای مدلسازی کلی یک سلول الکترو-وینینگ نیاز به مدلسازی موضعی در موازات آن برای افزایش دقت و سرعت حل خواهد بود. در این مدلسازی میدانهای سرعت، غلظت مس و اسید، انرژی آشفتگی، کسر حجمی حباب اکسیژن و فشار بهطور کلی و با دقت بالا بهدست آمده است. حداکثر انحراف نتایج مدلسازی از آزمایش کمتر از ۳% بهدست آمده است.

تشکر و قدردانی: از مدیریت مجتمع مس میدوک و بهخصوص

<u>شبیه سازی هیدرودینامیکی جریان دوفازی در یک سلول الکترووینینگ صنعتی ۲۲۵</u> مهندس */بر/هیمی* بابت دراختیارگذاشتن منابع اطلاعاتی مجتمع مس لیچینگ و همین طور فراهم آوردن منابع مادی این مطالعه تشکر فراوان می شود.

تاییدیه اخلاقی: نویسندگان موردی بیان نکردند.

تعارض منافع: نویسندگان موردی بیان نکردند.

سهم نویسندگان: سیدعلیاکبر پوراحمدی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روششناس/پژوهشگر اصلی /تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰%)؛ شهرام طالبی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/روششناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۰۵%)

منابع مالی: نویسندگان موردی بیان نکردند.

منابع

1- Al Shakarji R. Mechanisms of acid mist formation in electrowinning [Dissertation]. Townsville: James Cook University; 2012.

2- Filzwieser A, Hein K, Mori G. Current density limitation and diffusion boundary layer calculation using CFD method. JOM. 2002;54(4):28-31.

3- Leahy MJ, Schwarz MP. Experimental validation of a computational fluid dynamics model of copper electrowinning. Metallurgical and Materials Transactions B. 2010;41(6):1247-1260.

4- Schwarz MP. Improving zinc processing using computational fluid dynamics modelling-successes and opportunities. Minerals Engineering. 2012;30:12-18.

5- Leahy MJ, Schwarz MP. Flow and mass transfer modelling for copper electrowinning: Development of instabilities along electrodes. Hydrometallurgy. 2014;147-148:41-53.

6- Najminoori M, Mohebbi A, Ghadami Arabi B, Daneshpajouh Sh. CFD simulation of an industrial copper electrowinning cell. Hydrometallurgy. 2015;153:88-97.

7- Kemminger A, Ludwig A. Modelling the electrolyte flow in a full-scale copper electrorefining tankhouse cell. European Metallurgical Conference EMC, 2013 June 23-26, Weimar, Germany. Clausthal-Zellerfeld: GDMB; 2013. pp. 795-806.

8- König J, Mühlenhoff S, Eckert K, Büttner L, Odenbach S, Czarske J. Velocity measurements inside the concentration boundary layer during copper-magnetoelectrolysis using a novel laser Doppler profile sensor. Electrochimica Acta. 2011;56(17):6150-6156.

9- Geankoplis CJ. Transport processes and separation process principles. Plano: Prentice Hall Professional Technical Reference; 2003.

10- Pourtousi M, Sahu JN, Ganesan P, Shamshirband Sh, Redzwan G. A combination of computational fluid dynamics (CFD) and adaptive neuro-fuzzy system (ANFIS) for prediction of the bubble column hydrodynamics. Powder Technology. 2015;274:466-481.