

محاسبه تعداد، قطر و فرکانس تولید حباب‌های در حال صعود در سلول الکتروشیمیایی بااتری‌ها

محمد طاهریان^۱، سعید ناهیدی^{۲*}

^۱دانشگاه تهران

^۲دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

دریافت: بهار ۹۹ پذیرش: بهار ۹۹

چکیده

اهمیت تبدیل انرژی در کاربری‌های آینده باعث تحقیقات بسیاری برای ارزیابی فرآیندهای الکتروشیمیایی شده است. در موارد خاص مورد مطالعه، اندازه-گیری کمیت‌های حاضر در واکنش‌های الکتروشیمیایی با روش‌های عددی موجود امکان پذیر نیست. در نتیجه می‌باشد روش‌های جایگزین توسعه یابد. یکی از این روش‌ها، بررسی واکنش‌های تکاملی گازهای حاصل از واکنش با کمک نرمافزارهای محاسباتی است. سامانه‌های الکتروشیمیایی از مدیریت ضعیف و عدم تنظیم حباب‌های گاز در حال صعود آسیب می‌یابند. درک بهتر از رفتار حباب‌ها برای کمک به کاهش قدرت بیش از حد حباب‌های تولیدشده، صرفه‌جویی در انرژی و رفع موانع انتقال جرم طی واکنش‌های شیمیایی به کار می‌رود. یک نکته بسیار مهم در این زمینه، بررسی تعداد حباب‌ها، مقدار و فرکانس تولید آن‌ها است به طوریکه در فرآیند الکتروشیمیایی و در اثر انجام واکنش، حباب گاز تشکیل می‌گردد و این حباب‌های گاز تولیدشده بر روی سطوح الکترود قرار می‌گیرد و مانع از برخورد سیال به سطح الکترودشده و شارژ بااتری رخ نمی‌دهد که به این پدیده مقاومت حبابی می‌گویند. برای جلوگیری از رخ دادن این پدیده می‌توان با دخیل کردن پارامترهایی نظری تغییر در انرژی سطحی سامانه با استفاده از سرفکتنت‌های خاص، تعداد، اندازه و نرخ تولید آن‌ها را کنترل کرد. اساس این بررسی طی آزمایش سرعت‌سنگی ذرات^{*} صورت پذیرفت. نرمافزار مورد استفاده در این تحقیق برای بررسی کمی رفتارهای فوق، نرمافزار متلب است. در ادامه استفاده از دستورهای مهم این نرمافزار جهت رسیدن به اهداف تحقیق اشاره می‌گردد.

* عهدهدار مکاتبات: saeednahidi@yahoo.com

کلمات کلیدی: بااتری شناور، هیدرودینامیک حباب، قطر اندازه حباب، تعداد حباب، فرکانس تولید حباب، سرعت‌سنگی ذرات

۱- مقدمه

جديد گازی در فصل مشترک فاز جامد(الکتروود) و فاز مایع(محلول الکتروولیت) شکل می‌گیرد. مطالعات اولیه سعی در پیدا کردن تشابه بین فرآیند تشکیل حباب حین الکتروولیز و جوشش دارد. با این حال با توجه به ناهمنگی در سطح الکتروود(از جمله انرژی سطح ناشی از نقص‌های سطح در اندازه میکرون و پتانسیل) و فرآیندهای پیچیده از جمله انحلال گاز، فوق اشباع شدن، نفوذ، هسته‌گذاری حین فرآیند الکتروولیز باعث پیچیدگی بیشتر نسبت به فرآیند جوشش می‌گردد که هنوز به طور کلی ناشناخته است.

رشد حباب در ابتدا توسط انتقال گاز حل شده به سطح مشترک گاز-مایع رخ می‌دهد و افزایش فشار داخل حباب طی زمان اتفاق می‌افتد. با این حال مکانیسم غالب برای رشد حباب در فرآیند الکتروولیز در هم آمیختگی آن‌هاست که شامل مواد زیر می‌گردد:

- ۱- در هم آمیختگی حباب‌های کوچک بر سطح الکتروود
- ۲- رشد حباب‌ها با اندازه متوسط با جذب حباب‌های کوچک مجاور
- ۳- در هم آمیختگی حباب‌های در حال حرکت به این معنی که صعود حباب‌های بزرگ از سطح الکتروود درحالیکه جذب حباب‌های کوچک ادامه می‌پابد.

جدا شدن حباب‌ها زمانی رخ می‌دهد که نیروهای بیانسی از نیروی چسبندگی سطح بزرگتر باشد و بستگی به وضعیت سطح الکتروود، پارامترهای الکتروشیمیایی و شرایط جریان محلول الکتروولیتی(سرعت جریان) دارد.

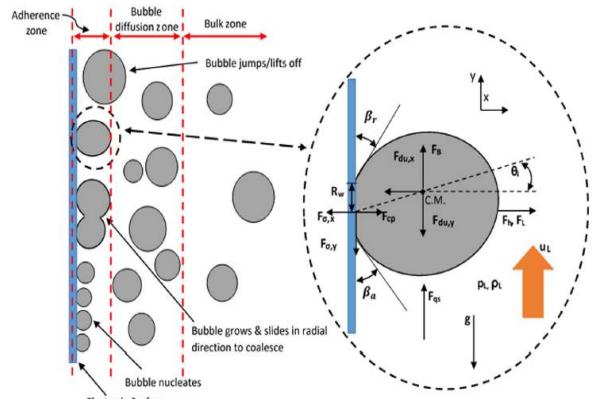
علاوه بر این تأثیر بر روی انتقال جرم، این اتفاق باعث تشکیل یک لایه با سپر الکتریکی می‌گردد که باعث کاهش اثر رسانش و افزایش مقاومت اهمی روی سطوح می‌شود. ویژگی‌های این لایه بستگی به ویژگی‌های فصل مشترک این سه فاز دارد، یعنی جامد، گاز و مایع که به ترتیب نشان‌دهنده الکتروود، حباب و توده سیال است. این فصل مشترک کاملاً به هم مرتبط هستند. متغیرهایی که بر این پارامتر تأثیر می‌گذارد عبارتند از: هندسه الکتروودها، حفره‌ها، قابلیت خیس شدن سطوح (شخص انرژی سطحی در فصل مشترک)، ترکیب حباب، شیمی سیال، سرعت جریان و اجزای واکنشی [۷,۶].

از سوی دیگر، قابلیت جدا شدن و رهایش حباب‌ها از سطح الکتروودها، باعث افزایش انتقال جرم در آن نقاط می‌گردد. این افزایش به‌اندازه حباب‌ها و سرعت جدا شدن آن‌ها از سطح بستگی دارد. درنهایت با تغییر متغیرهای فوق و بررسی تعداد حباب‌ها و فرکانس تولید آن‌ها در هر ناحیه سولول الکتروشیمیایی به سمت رسیدن به نقطه بهینه عملیاتی آزمایش‌ها صورت می‌پذیرد [۸].

۲- روش تحقیق

فیلمی حاوی حباب‌ها با نرخ تولید متغیر و در حال صعود برای فرآیند پردازش تصویر استفاده می‌گردد. فیلمی از این فیلم در شکل(۲) قابل مشاهده است.

واکنش‌های تکامل گاز در فرآیندهای الکتروشیمیایی از اهمیت فراوانی برخوردار است. مثال‌های عمومی از این فرآیند کلروآلکالین و سولول‌های سوختی است. در این واکنش‌ها حباب‌های گاز با شدت و به طور دائم در حال شکل‌گیری و تاثیرگذاری بر این فرآیندها هستند. فرآیند الکتروشیمیایی در مقیاس نانو، میکرو و ماکرو رخ می‌دهد که در کاربردهای بی‌شماری همانند سولول‌های سوختی، باتری‌ها، الکتروتابابی، تولید گاز هیدروژن، استخراج مواد معدنی، تصفیه آب، الکتروتابابی، حسگرها و موارد دیگر وجود دارد. این گازها حباب‌هایی تشکیل می‌دهند که در سامانه‌های الکتروشیمیایی نقش اساسی دارد. برای مثال حباب‌های گاز در سولول Hall-Heroult تأثیر بسیار مثبتی بر روی همگنس‌سازی توزیع آلومینا و توزیع میدان حرارت در توده سیال دارد [۱]. نمونه دیگر تمیز کردن سطوح با کمک التراسونیک است که حباب‌های گاز تولیدی از سطح الکتروود جدا و با کمک تابش التراسونیک برای تمیز کردن سطوح به کار می‌رود [۲]. همچنین برای ترمیم سفره‌های آب‌های زیرزمینی به‌وسیله الکتروشیمیایی، اکسیژن تولیدشده به‌وسیله سولول الکتروشیمیایی در کنار گاز هیدروژن در یک اکسایش بالا استفاده می‌گردد [۳]. در سولول‌های سوختی، کانال‌های حرکت سیال بین دو الکتروود با صعود حباب‌های گاز و تجمع آن‌ها مسدود می‌گردد [۴]. تمامی این نوع اختلال‌ها در سولول‌های الکتروشیمیایی ناشی از لایه چسبندگی بر روی سطح الکتروودهاست. این اتفاق در اثر اشباع بیش از حد حباب‌ها در سیال رخ می‌دهد. این لایه چسبندگی باعث تشکیل یک ناحیه فعال بر روی سطح الکتروود می‌شود که مانع از برخورد توده واکنش نداده و تازه با سطح الکتروودها برای انجام مابقی واکنش‌ها می‌گردد [۵].



شکل (۱): نمودار شماتیک برای تعادل نیرو در حباب‌های در حال رشد و جدا شدن در منطقه پیوستن الکتروود عمودی با عدم وجود منابع خارجی و تقسیم‌بندی ناحیه مختصاتی

فرآیند تشکیل حباب شامل هسته‌گذاری، رشد و جداسازی است. علت اصلی برای تشکیل حباب، تولید یک فاز جدید است به این معنی که فاز

-محاسبه قطر حباب‌ها:
در محاسبه قطر معادل، قطر دایره‌ای به اندازه ناحیه جداسده (دایره‌های سفید با مرز قرمز جدا شده) در نظر گرفته می‌شود و با استفاده از فرمول (۱-۱) محاسبه می‌گردد.

$$D = \sqrt{\frac{4 \times \text{Area}}{\pi}} \quad (1-1)$$

-محاسبه مساحت حباب‌ها:

تعداد پیکسل‌های درون ناحیه جدا شده به عنوان کمیتی اسکالار گزارش می‌گردد.

برای اندازه‌گیری قطر حباب کد به شکل زیر در نرم افزار نوشته می‌شود:

`D = regionprops(BW, 'EquivDiameter')`

برای نوشتتن کد متلب برای این پخش از پروژه، ابتدا داده‌های تصویر را وارد نرم افزار کرده و سپس با دستور `im2bw` به فرمت سیاه‌وسفید تبدیل می‌شود. در دستور `regionprops` نرم افزار محیط دور عکس اصلی که در آن ذرات حباب یا سیال دیگری قرار دارند نیز شامل می‌شود. درنتیجه می‌باشد این داده از بقیه جدا و حذف گردد. حذف درایه اول از ماتریس قطر اندازه ذره و محیط را به روش زیر است.

`D(1).EquivDiameter = []`

پس از رسیدن به قطر معادل، در ادامه دستور قبل تعداد ذرات در هر عکس مشخص می‌گردد. بدین صورت که کلیه ذراتی که در مرحله قطر معادل آن‌ها محاسبه گردید و متلب آن‌ها را به عنوان ذره مستقل تشخیص داد وارد ماتریس دیگری می‌گردد. با کمک دستور `length` تعداد درایه‌های این ماتریس معین می‌گردد. تعداد درایه‌های این ماتریس با تعداد ذرات درون صفحه برابر است. برای محاسبه نرخ تولید حباب، تعداد حباب‌های هر جفت عکس را از یکدیگر کم کرده و سپس تقسیم بر زمان عملیاتی می‌گردد. زمان عملیاتی یا همان تعداد فریم‌ها در هر ثانیه در قسمت `properties` فیلم قابل دستیابی است. تعداد فریم‌های در هر ثانیه این فیلم ۱۰ است. پس از عملیات پردازش تصویر برای هر فریم، با کم کردن تعداد حباب‌ها در فریم n از فریم $n-1$ آن تقسیم بر $1/10$ فرکانس تولید آن حساب می‌شود. عملیات پردازش تصویر برای ۲۴ فریم از این فیلم انجام شد.^[۹]

۳- نتایج پروژه

نتایج قطر حباب، تعداد و فرکانس تولید حباب به شرح زیر است:



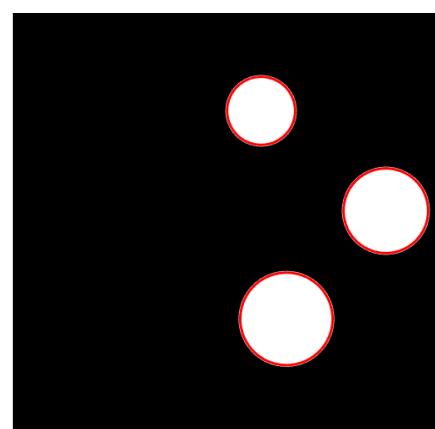
شکل (۲): فریمی از حباب‌های در حال صعود

پس از اینکه اطلاعات تصویر وارد نرم افزار گردید، با استفاده از دستور `im2bw` عکس تبدیل به تصویر دودوبی می‌گردد. در این سیستم‌ها شدت تصویر هر پیکسل صفر و یا یک دیده می‌شود. صفر حالتی است که آن پیکسل سیاه دیده می‌شود و یک حداکثر روشنایی در نظر گرفتن شود. برای استفاده از این دستور می‌باشد آستانه‌ای برای درنظر گرفتن روشنایی حساب کرد. برای مثال در سیستم ۸ بیتی شدت روشنایی پیکسل‌ها از صفر تا ۲۵۵ تعیین می‌گردد. با گرفتن آستانه تا مقدار ۱۲۵، پیکسل‌هایی با شدت روشنایی بالاتر از این مقدار سفید (مقدار ۱) و پایین‌تر از آن سیاه (مقدار ۰) فرض می‌شود. بر همین مبنای شدت پیکسل‌های عکس دودوبی در نقاطی که پیوسته از ۱ است یک شیء در نظر گرفته می‌شود. در واقع با دودوبی کردن عکس حباب‌ها را از پس زمینه جدا کرده و قطر، تعداد و فرکانس تولید آن محاسبه می‌گردد.

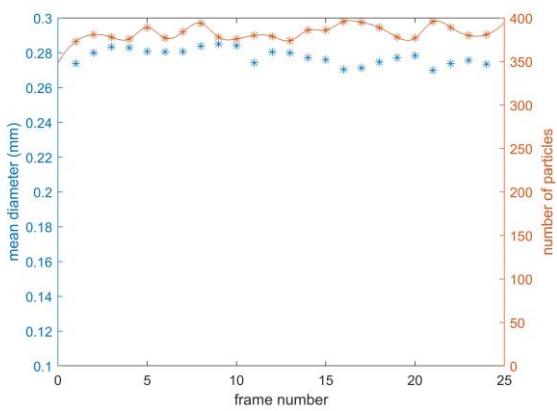
پس از آن با استفاده از دستور `regionprops` ویژگی‌های عکس ذخیره می‌گردد. فهرستی از مهم‌ترین متغیرهای اندازه‌گیری شده در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول (۱): مهم‌ترین متغیرهای اندازه‌گیری شده دستور `regionprops`

توضیحات	لیست پارامترها
اندازه‌گیری مساحت	area
قطر معادل مجموعه پیکسل‌ها	equivdiameter

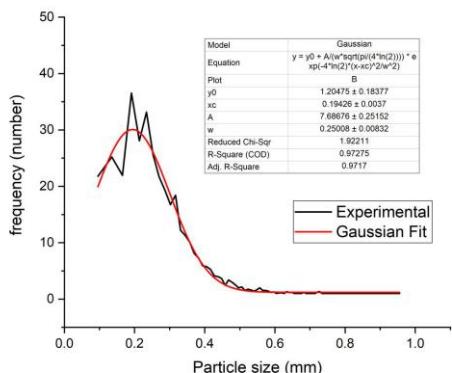


شکل (۲): شماتیکی از حباب‌های گاز برای محاسبه مساحت و قطر حباب‌ها

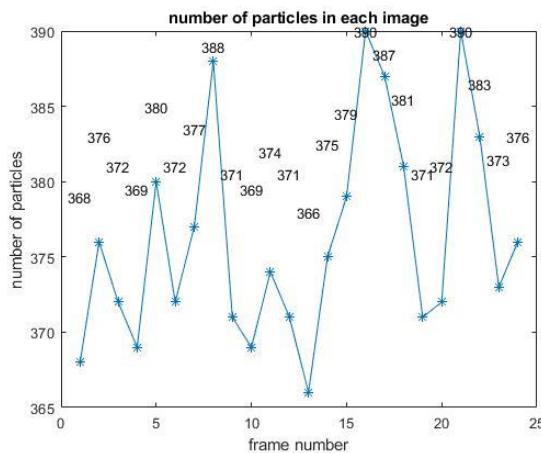


شکل (۶): نمودار توانان قطر و تعداد حبابها برای ۲۴ فریم

از آن جایی که ماهیت فیلم تولید حبابها توزیعی شبیه به گوسین دارد نمودار فراوانی بر حسب قطر اندازه این ۲۴ فریم در شکل (۷) نشان داده شده است.

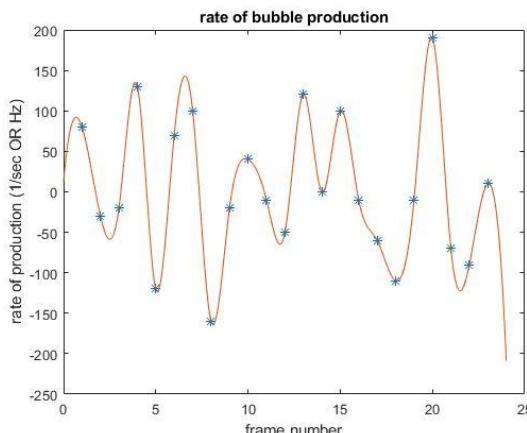


شکل (۷): نمودار توزیع فراوانی بر حسب قطر اندازه ذره ۲۴ فریم



شکل (۳): تعداد حبابها در هر ۲۴ فریم

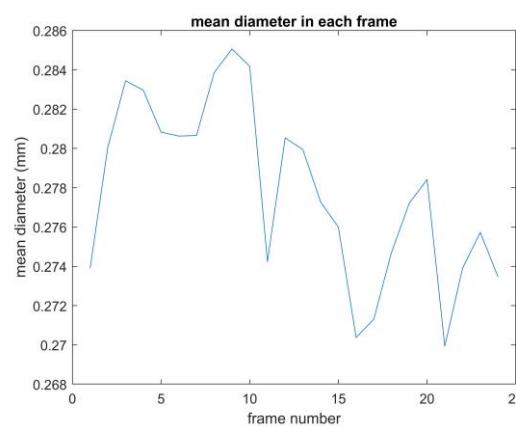
همانطور که مشاهده می شود تعداد حبابها در بازه ۳۶۵ الی ۳۹۰ است.



شکل (۴): فرکانس تولید حباب

مراجع

- [1] M. Alam, W. Yang, K. Mohanarangam, G. Brooks, and Y. S. Morsi, "Investigation of Anodic Gas Film Behavior in Hall-Heroult Cell Using Low Temperature Electrolyte," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 44, no. 5, pp. 1155-1165, 2013.
- [2] P. Birkin, D. Offin, C. Vian, and T. Leighton, "Electrochemical 'bubble swarm' enhancement of ultrasonic surface cleaning," *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 17, no. 33, pp. 21709-21715, 2015.
- [3] X. Mao, S. Yuan, N. Fallahpour, A. Ciblak, J. Howard, I. Padilla, R. Loch-Caruso, and A. N. Alshawabkeh, "Electrochemically induced dual reactive barriers for transformation of TCE and mixture of contaminants in groundwater," *Environmental science &*



شکل (۵): قطر اندازه حباب در هر فریم

اندازه قطر حبابها در حدود ۰.۲۷ میلی متر است.

technology, vol. 46, no. 21, pp. 12003-12011, 2012.

- [4] G. Lu, and C. Wang, "Electrochemical and flow characterization of a direct methanol fuel cell," *Journal of Power Sources*, vol. 134, no. 1, pp. 33-40, 2004.
- [5] F. Hine, and K. Murakami, "Bubble effects on the solution IR drop in a vertical electrolyzer under free and forced convection," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 127, no. 2, pp. 292-297, 1980.
- [6] H. Matsushima, T. Iida, and Y. Fukunaka, "Observation of bubble layer formed on hydrogen and oxygen gas-evolving electrode in a magnetic field," *Journal of Solid State Electrochemistry*, vol. 16, no. 2, pp. 617-623, 2012.
- [7] H. Vogt, and R. Balzer, "The bubble coverage of gas-evolving electrodes in stagnant electrolytes," *Electrochimica Acta*, vol. 50, no. 10, pp. 2073-2079, 2005.
- [8] H. Cheng, K. Scott, and C. Ramshaw, "Intensification of water electrolysis in a centrifugal field," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 149, no. 11, pp. D172-D177, 2002.
- [9] <https://www.mathworks.com/products/image.html>