

علمی- پژوهشی

بررسی اثر شکل جداکننده‌های بین آند و کاتد در باتری Al-AgO بر روی هیدرودینامیک جریان الکترولیت آن

احسان بهروزی‌زاده^۲سعید ناهیدی^۱

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی

دانشکده و پژوهشکده فنی مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۷)

چکیده

باتری‌های الکتروشیمیایی جریان‌ی همچون باتری Al-AgO، از جمله باتری‌های با ظرفیت بالا هستند که در آن‌ها الکترولیت بین صفحات آند و کاتد جریان داشته و سلول باتری در مسیر یک سیستم چرخشی بسته قرار دارد. با توجه به سنگین بودن این‌گونه باتری‌ها، تلاش‌هایی در جهت کاهش حجم و وزن آن‌ها تاکنون انجام شده و معمولاً فاصله بین آند و کاتد در حداقل مقدار تنظیم می‌شود. از طرفی نزدیک شدن بیش از حد آند و کاتد، خطر اتصال کوتاه داخلی در باتری را افزایش می‌دهد. بنابراین از جداکننده‌هایی بین صفحات آند و کاتد استفاده شده که مانع از برخورد آن‌ها با یکدیگر شوند. جداکننده‌ها با وجود جلوگیری از اتصال کوتاه، در مسیر جریان الکترولیت قرار داشته و مانع از حرکت مطلوب آن بین صفحات آند و کاتد می‌شوند. دنباله جریان ناشی از ممانعت آن‌ها بر مسیر جریان، از سطح فعال واکنش می‌کاهد و این رخداد باعث کاهش عملکرد و بازده باتری می‌گردد. به همین منظور در بررسی عددی حاضر، جریان الکترولیت در سل باتری به صورت تک‌فاز و پایا در نظر گرفته شده و بر روی اثر تعداد و نحوه چینش جداکننده‌ها با چهار شکل سطح مقطع دایره، مربع، لوزی و مثلث مطالعه و سطح فعال واکنش در هر یک بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: باتری Al-AgO، جداکننده آند و کاتد، سطح فعال واکنش الکتروشیمیایی، دنباله جریان

The Effect Of Anode And Cathode Separators In Al-Ago Battery On The Hydrodynamic Of Electrolyte

Nahidi, S.

Behroozizade, E.

Department of Mechanical Engineering,
Imam Hossein UniversityDepartment of Mechanical Engineering,
Shahid Beheshti University

(Received: 03/Desember/2021; Accepted: 17/January/2022)

ABSTRACT

Flow electrochemical batteries such as Al-Ago Batteries are high-capacity batteries that the electrolyte flows between the anode and cathode plates and the battery cell is in a close system. Due to the heaviness of such batteries, efforts are done to reduce their volume and weight so the distance between the anode and cathode is minimized. On the other hand, being to close to the anode and cathode increase the risk of short-circuit the battery. So, separators between the anode and cathode were used to prevent them from touch each other. Although preventing short-circuit, the separators are located in the direction of the electrolyte flow, preventing the desired flow between the anode and cathode plates. The flow wake due to their obstruction on the flow path effects the active area of the reaction and thereby reduces battery efficiency. On the other hand, the cross-section shape of these separators has a great influence on the hydrodynamics of the electrolyte, wake length and the active area of the reaction. In the present study, the electrolyte is considered as single-phase, steady and the effect of the number and arrangement of the separators are studied by four shapes of circle, square, Lozenge and triangle cross-sections on the electrolyte flow and the active area of the reaction.

Keywords: Al-Ago Flow Battery, Anode and Cathode Separator, Wake, Electrochemical Active Area

۱- دانشجوی دکتری: rbabayi@chmail.ir

۲- استاد: (نویسنده پاسخگو): alisha@shirazu.ac.ir

فهرست علائم و اختصارات (در صورت لزوم)

محل فهرست علائم و اختصارات بعد از چکیده است. ابتدا علائم انگلیسی به ترتیب الفبا و سپس علائم یونانی به ترتیب الفبا و در جدول تایپ شود. در بالای حروف یونانی نوشته شود "علائم یونانی".

A	مساحت، m^2
E	مدول الاستیسیته، N/m^2
	علائم یونانی
ρ	چگالی، kg/m^3
	زیرنویس
f	سیال
	بالانویس
*	شرایط مرجع

۱- مقدمه

استفاده از باتری‌های جریان‌ی (باتری جریان‌ی الومینیوم-اکسید نقره، باتری جریان‌ی وانادیوم، باتری جریان‌ی نقره-روی و ...) به دلیل کاربردی بودن آن‌ها در بسیاری از صنایع رو به افزایش است [۶-۱]. به دلیل ظرفیت و نرخ دشارژ بالای اغلب باتری‌های جریان‌ی، از آن‌ها در صنایع نظامی و هوافضا استفاده‌های زیادی می‌شود. افزون بر نگرش الکتروشیمیایی، در باتری‌های جریان‌ی نگرش دینامیک سیالات نیز مطرح است؛ زیرا الکترولیت به‌عنوان یک ماده فعال در فرایندهای الکتروشیمیایی حاضر باتری‌ها مانند سیالی تحت فشار پمپ درون سلول‌های باتری بین کاتد و آند جریان می‌یابد [۱۰-۷]. بنابراین الکترولیت باتری‌های جریان‌ی نقش مؤثری در عملکرد و بازده آن دارد. نرخ دبی جرمی الکترولیت نیز نقش مهمی در عملکرد باتری داشته و لذا مطالعات زیادی در این زمینه انجام شده است [۷]. به همین دلیلی در تحقیق حاضر نیز تمرکز بیشتر بر نگرش دینامیک سیال الکترولیت است. مسیر و الگوی جریان الکترولیت در مجاورت الکتروود یکی از عواملی است که می‌تواند از طریق تغییر سطح فعال واکنش (تماس الکترولیت و الکتروود) بر عملکرد باتری تأثیرگذار باشد [۱۷-۱۹]. مایوریا و همکاران [۱۰] با توجه به موضوع نحوه جریان الکترولیت در باتری‌های جریان‌ی اکسایش-احیا وانادیوم، تأثیر آن را بر چگالی جریان، ظرفیت و عملکرد

باتری را مورد مطالعه قرار دادند؛ زیرا با یکنواخت شدن توزیع الکترولیت بر روی الکتروود، چگالی توان بهبود می‌یابد.

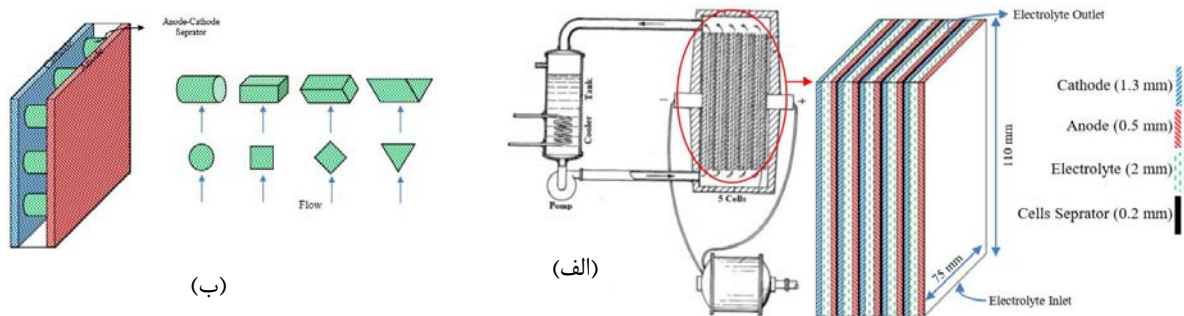
ژانگ و همکاران [۱۱ و ۱۲] مدلی ریاضی و دو بعدی اکسایش-احیا وانادیوم ارائه دادند. به کمک مدل ریاضی آن‌ها، امکان به دست آوردن دقیق عملکرد باتری و دمای آن در شرایط عملکردی مختلف وجود دارد. آن‌ها به کمک این مدل نتیجه گرفتند که ۲۵ درصد انسداد در وسط سلول می‌تواند ظرفیت آن را تا ۸۰ درصد کاهش دهد. راوندرا و همکاران [۱۳] با توجه به اثر مهم گردش مناسب الکترولیت در ناحیه فعال در باتری جریان‌ی اکسایش-احیا با چگالی انرژی زیاد، مطالعه‌ای تجربی انجام داده تا تأثیر ابعاد مسیر ماریپیجی جریان بر عملکرد باتری را بررسی کنند. آن‌ها تأثیر ابعاد باتری بر سه موضوع گسترش نفوذ در مسیرها، افت فشار در سلول با نرخ دبی الکترولیت مشخص و عملکرد الکتروشیمیایی بررسی و گزارش کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌داد که ابعاد مسیرها در سلول‌های بزرگ‌تر تأثیر محسوس‌تر و قابل توجه‌تر در افت فشار، چگالی توان و چگالی انرژی تخلیه دارد. آن‌ها افزایش عرض مسیرهای جریان الکترولیت را راهکاری ایده‌آل برای بهبود عملکرد کلی سلول معرفی کردند.

نادسن و همکاران [۱۴] نیز رفتار جریان الکترولیت در گذرگاه‌های موجود در باتری‌های جریان‌ی توان بالا (فاصله بین الکتروودهای آند و کاتد) را به کمک دینامیک سیالات محاسباتی، شبیه‌سازی نمودند. ایشان با ثابت در نظر گرفتن بهره‌وری از هر گذرگاهی موجود در باتری، دستیابی به چگالی انرژی‌های بیشتر را با افزایش دبی جریان الکترولیت مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دو الگوی جریان برای گذر الکترولیت ماریپیج و یکپارچه با اندازه سلول مختلف را شبیه‌سازی و جزئیات مسیرهای جریان که الکترولیت را بین ورودی و خروجی سلول تقسیم می‌کنند، بر افت فشار در سلول‌های بزرگ‌تر را بررسی نمودند. البته ایشی توبی و همکاران [۱۷]، مدلی پایا و دوبعدی از یک باتری جریان‌ی اکسایش-احیا وانادیوم با الگوی جریان یکپارچه و الکتروود فعال نازک ارائه دادند تا تصویری از سرعت جریان، تمرکز واکنش‌ها و توزیع جریان محلی در مسیر صفحه الکتروود داشته باشند. آن‌ها تمرکز بیشتر خود را معطوف نواحی با

بر عهده دارند. فشار سیال پتاسیم هیدروکسید محلول در آب به عنوان الکترولیت در پمپ افزایش یافته و وارد محفظه سلول‌ها می‌شود. سپس جریان الکترولیت بین سلول‌ها تقسیم شده و وارد فاصله بین آند و کاتد می‌شود. با تماس الکترولیت با سطوح کاتد و آند، واکنش‌های اکسایش و احیا آغاز شده و باتری تولید توان می‌کند. طی عبور الکترولیت از سلول‌ها، فشار سیال تا فشار محیط کاهش و دمای آن به دلیل گرمازا بودن واکنش‌های باتری افزایش می‌یابد. الکترولیت خروجی از سلول‌ها وارد مخزن شده و در آنجا خنک می‌شود. بعد از کاهش دما، الکترولیت مجدداً به سلول‌ها پمپ شده و این چرخه ادامه می‌یابد.

سرعت کم کرده و به این نتیجه رسیدند که در نواحی با سرعت کمتر الکترولیت، ضریب انتقال جرم (واکنش‌ها) نیز کمتر است.

یکی از انواع باتری‌های تک جریانی اکسایش-احیا، باتری روی-اکسید نقره است که معمولاً الکترولیت آن محلول هیدروکسید پتاسیم یا هیدروکسید سدیم است [۳]. هر سلول در این باتری مطابق شکل (۱-الف) شامل یک آند از جنس فلز روی و یک کاتد از جنس اکسید نقره و الکترولیتی (اغلب هیدروکسید پتاسیم محلول در آب) است که بین آند و کاتد جریان دارد. در این باتری، پمپ و خنک‌کن به ترتیب وظیفه انتقال و خنک‌سازی الکترولیت را



شکل (۱): الف) اجزای تشکیل‌دهنده یک باتری تک جریانی شامل ۵ سلول الکتروشیمیایی [۳] و ب) جداکننده بین آند و کاتد و ۴ سطح مقطع مختلف در نظر گرفته شده برای آن

الکترودها تأثیر مهمی در دنباله جریان و عملکرد مناسب جریان الکترولیت در عملکرد باتری دارد. این موضوع تاکنون در مطالعات انجام‌شده در زمینه باتری‌های جریانی دیده نشده و برای تحقیق حاضر انتخاب شده است. لذا در تحقیق حاضر تأثیر نحوه چینش و شکل سطح مقطع جداکننده‌های بین کاتد و آند یک باتری تک جریانی روی-اکسید نقره بر میدان جریان الکترولیت آبی هیدروکسید پتاسیم و سطح فعال واکنش بررسی و مطالعه می‌شود.

لازم به ذکر است که نگرش و تمرکز تحقیق حاضر دینامیک سیالات بوده و در مدل مربوطه فقط معادلات مربوط به دینامیک سیالات در نظر گرفته شده و از معادلات الکتروشیمیایی صرف نظر شده است.

۲- تعریف مسئله

با توجه به این‌که بی‌نهایت الگو و سبک برای چینش جداکننده‌ها در فاصله بین الکترودهایی با ابعاد

فاصله حدوداً ۲ میلی‌متری و بسیار کم بین کاتد و آند که الکترولیت از آن عبور می‌کند بسیار مهم است. دور نگه داشتن الکترودها از یکدیگر جهت جلوگیری از اتصال کوتاه با وجود این فاصله کم امری حیاتی به نظر می‌رسد. بنابراین در طراحی این باتری‌ها از جداکننده‌های توزیع‌شده در سطح الکترودها برای جلوگیری از تماس بین کاتد و آند استفاده می‌شود. این جداکننده‌ها با وجود جلوگیری از اتصال کوتاه، مانعی برای جریان الکترولیت محسوب شده و توزیع جریان الکترولیت را با تشکیل دنباله جریان^۱ تغییر می‌دهد. در شکل (۱-ب) نمایی از نحوه قرارگیری این جداکننده‌ها بین آند و کاتد نشان داده شده است. دنباله جریان به وجود آمده از این مانع باعث کاهش سطح فعال واکنش (سطح مشترک و تماس الکترولیت و الکترودها) و در نتیجه کاهش نرخ واکنش و توان باتری می‌شود. بنابراین نحوه چینش و شکل سطح مقطع جداکننده‌ها در فاصله بین

^۱ Wake

هندسه متفاوت به طور میانگین در حدود ۴۵۰۰۰۰ است. در شکل ۳ نمایی از نحوه شبکه بندی مدل عددی نشان داده شده است. به منظور بررسی استقلال نتایج از شبکه، تأثیرگذاری تعداد شبکه بر نتایج مدل و انتخاب بهترین نوع شبکه بندی، تعداد ۶ نوع شبکه بندی متفاوت در اندازه و تعداد سلول های محاسباتی برای هر هندسه در نظر گرفته شده و نتایج آن ها با یکدیگر در شکل ۴ مقایسه شده است. متغیر مورد مقایسه، ضریب درگ ناشی از نیرو درگ وارد شده بر یک جداکننده مشخص در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، با افزایش تعداد سلول های محاسباتی بیشتر از حدود ۴۵۰۰۰۰ سلول محاسباتی، تغییرات مقدار ضریب درگ کاهش یافته و تقریباً ناچیز می شود (ثابت تا دو رقم اعشار). بر همین اساس به منظور کاهش زمان محاسبات، از شبکه بندی با تعداد حدود ۴۵۰۰۰۰ سلول محاسباتی و اندازه ۰/۱۳ میلی متر جهت مدل سازی استفاده شده است.

جدول (۱): چیدمان های مختلف مورد نظر برای جداکننده ها

نسبت تعداد ردیف به تعداد ستون	تعداد کل جداکننده	تعداد ستون	تعداد ردیف	چیدمان
۱/۳۳	۱۲	۳	۴	۴ در ۳
۱/۶۶	۱۵	۳	۵	۵ در ۳
۱/۲۵	۲۰	۴	۵	۵ در ۴
۱/۵	۲۴	۴	۶	۶ در ۴
۱/۲	۳۰	۵	۶	۶ در ۵
۱/۴	۳۵	۵	۷	۷ در ۵

۱۱۰ × ۷۵ mm² مطابق شکل (۱-الف) وجود دارد، وضع قوانین و فرضیه های زیر الزامی است.

۱- تعداد جداکننده ها از ۱۰ کمتر نباشد.

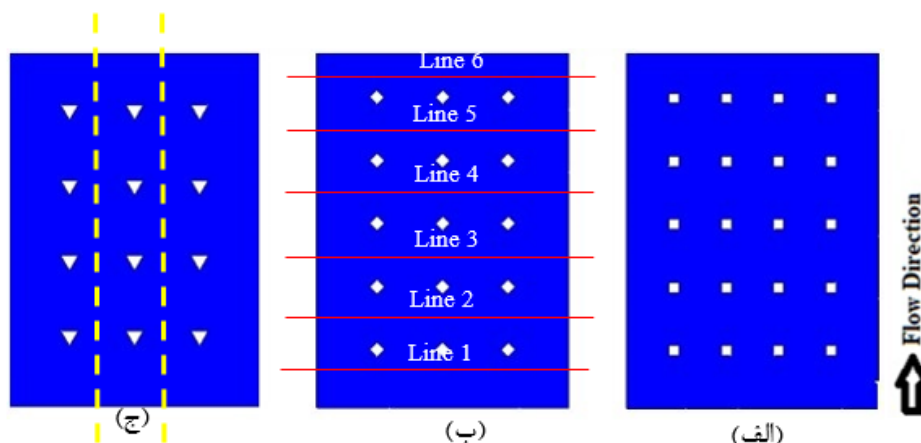
۲- چینش جداکننده ها به مانند الکتروود به صورت مستطیل و در چند ردیف و ستون دقیقاً در وسط باشد.

۳- با توجه به نسبت ابعاد الکتروود ($\frac{110}{75} = 1.46$) نسبت تعداد ردیف ها (X) به تعداد ستون ها (Y) نیز بین عدد ۱ و ۲ باشد ($1 < \frac{X}{Y} < 2$).

۴- قطر هیدرولیکی شکل سطح مقطع جداکننده ها ۳ mm باشد.

به این ترتیب در تحقیق حاضر ۶ چینش مختلف مطابق جدول ۱ برای ۴ شکل سطح مقطع متفاوت دایره، مربع، لوزی و مثلث مطابق شکل ۱ برای جداکننده ها بررسی شده است. بنابراین ۲۴ حالت و هندسه متفاوت در مدل عددی جریان الکتروولیت تک فاز منظور شده است که تعدادی از آن ها در شکل ۲ نشان داده شده است.

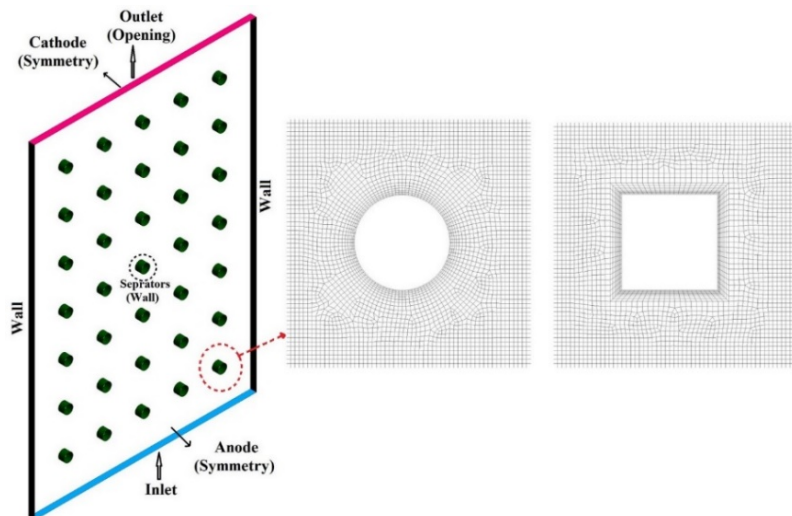
شبکه بندی هندسه به عنوان یکی از مهم ترین بخش های این مدل سازی عددی توسط نرم افزار Ansys Mesh انجام شده است. در این نرم افزار هندسه سل باتری به منظور حل معادلات در آن به شکل سازمان یافته و ریز شده در مجاورت جداکننده ها، شبکه بندی شده است. به این ترتیب شکل هندسی شبکه ها، شش وجهی^۱ با ابعاد ۲ mm × mm ۰/۱۳ × ۰/۱۳ mm در نظر گرفته شده است. مش لایه مرزی اطراف جداکننده ها به صورتی انجام شده است که در آن $y^+ < 10$ است. تعداد سلول های محاسباتی در ۲۴



شکل (۲): سه حالت از ۲۴ حالت متفاوت هندسه مدل عددی جریان الکتروولیت تک فاز

^۱ Hexagonal

^۲ Y Plus



شکل (۳): نحوه شبکه‌بندی و شرایط مرزی مدل عددی جریان الکترولیت تک فاز

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{v} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

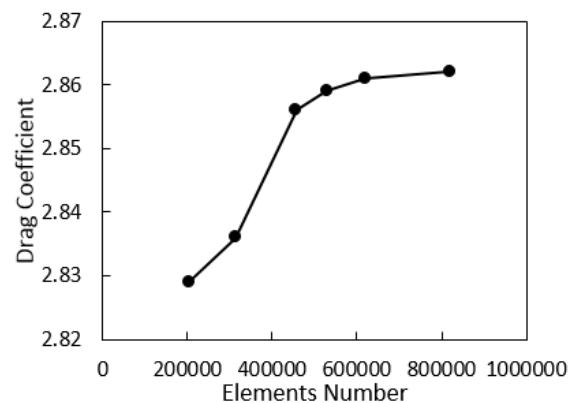
$$\rho \left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v} \vec{v}) \right] = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{g} \quad (3)$$

لازم به ذکر است که جهت مدل‌سازی تنش‌های رینولدز در معادله بقای مومنتم از مدل اغتشاشی دو معادله‌ای $k-\varepsilon$ استفاده شده است. سیال سیستم یا الکترولیت باتری محلول آبی ۳۳ درصد جرمی یا ۶ مولار هیدروکسید پتاسیم است که خواص آن به‌عنوان ماده جدید در نرم‌افزار تعریف شده است [۲۰]. در این بررسی برای اعمال شرایط مرزی یکسان بر هندسه‌های آماده‌شده مطابق شکل ۳، مقدار الکترولیت وارد شده به سلول برابر ۸۰ لیتر بر ساعت [۳] به‌عنوان شرط مرزی ورودی در نظر گرفته شده است. در مرز خروج نیز شرط مرزی باز یا آزاد با فشار محیط تنظیم شده است. همچنین دو صفحه عمود بر راستای بعد سوم، با شرط مرزی تقارن تعریف شده‌اند. بر اساس این توضیحات شرط مرزی دو صفحه کاتد و آند، تقارن تنظیم شده است. دو صفحه و مرز باقی‌مانده نیز شرط مرزی دیوار را دارا می‌باشند.

۴- صحت‌سنجی نتایج مدل عددی به کمک نتایج

آزمایشگاهی

در این بررسی، یک جداکننده در ردیف نخست (نزدیک‌ترین ردیف جداکننده به ورودی الکترولیت) با سطح مقطع دایره شکل نقش حضور یک استوانه در مسیر جریان را مطابق



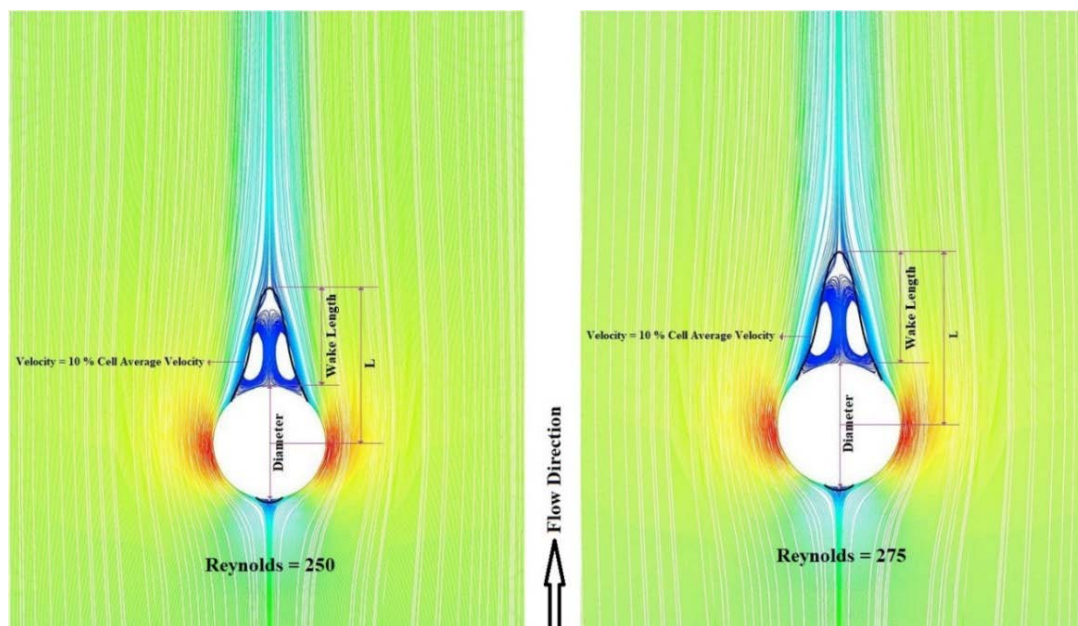
شکل (۴): نمودار ضریب درگ بر حسب تعداد سلول‌های محاسباتی جهت بررسی استقلال نتایج از شبکه‌بندی

۳- تنظیمات حل و شرایط مرزی مدل عددی

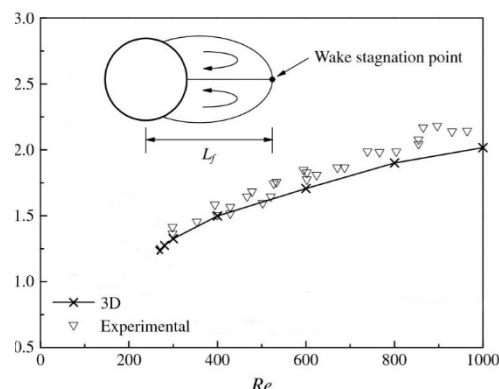
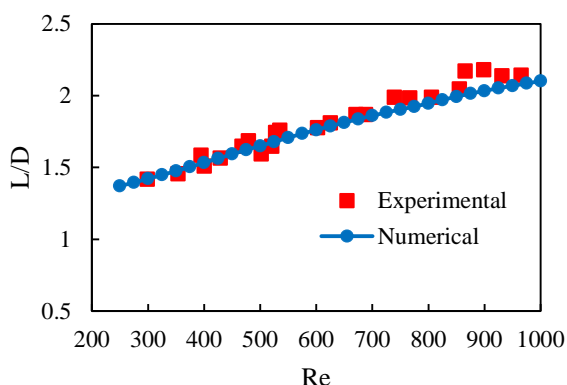
حلگر انتخاب‌شده در تحقیق حاضر، نرم‌افزار Ansys CFX است که قابلیت تحلیل جریان سه‌بعدی و لزج را دارد. در این نرم‌افزار از روش حجم محدود برای حل معادلات حاکم شامل معادله پیوستگی (رابطه (۱)) و معادله بقای مومنتم ناویر-استوکس (رابطه (۲)) و از روش دقت بالا جهت گسسته‌سازی معادلات استفاده شده است. در این روابط ρ چگالی، t زمان، \vec{v} بردار سرعت و ∇ نماد گرادیان و نیز u ، v و w به ترتیب بردار سرعت در راستای x ، y و z می‌باشند. الکترولیت یا محلول هیدروکسید پتاسیم نیز به‌عنوان سیال تراکم‌ناپذیر و با چگالی ثابت در نظر گرفته شده است. همچنین نمادهای μ ، ρ و g به ترتیب فشار استاتیک، تانسور تنش لزج، لزجت دینامیکی و بردار شتاب گرانش را بیان می‌کنند.

به صورت آزمایشگاهی و عددی انجام شده است، لذا از این هندسه جهت صحت سنجی نتایج استفاده شده است.

شکل (۵) ایفا می کند. از آنجا که تاکنون مطالعات زیادی در زمینه الگو و طول دنباله جریان عبوری از یک استوانه



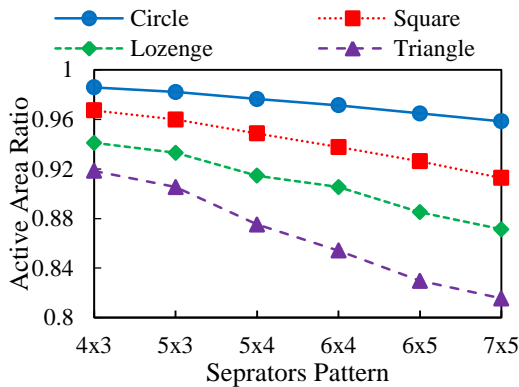
شکل (۵): طول دنباله جریان ناشی از حضور استوانه با سطح مقطع دایروی شکل در مسیر جریان



شکل (۶): الف) نمودار تجربی نسبت طول دنباله جریان به قطر استوانه بر حسب عدد رینولدز [۲۱] و ب) مقایسه نتایج تجربی آن با نتایج معادله عددی حاضر

سطح فعال واکنش به عنوان سطحی که الکترولیت در آن جریان داشته و در تماس با الکترود است، اثری مستقیم با عملکرد و بازده باتری دارد. در مطالعه حاضر، در واقع حضور جداکننده‌ها در مسیر جریان الکترولیت و تشکیل دنباله جریان، از مقدار سطح فعال واکنش می‌کاهند. در تحقیق حاضر، سطحی که سرعت الکترولیت در آن از ۱۰ درصد سرعت میانگین سلول کمتر باشد (مطابق شکل (۵))، به عنوان سطحی شامل دنباله جریان پشت هر مانع و گرداب‌های درون آن در نظر گرفته شده است، بطوریکه در

جیانگ و همکاران [۲۱] با ارائه نموداری در شکل (۶-الف)، نسبت طول دنباله جریان بر قطر سطح مقطع استوانه را در اعداد رینولدز مختلف ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ برای حالت پایا گزارش کردند. بنابراین جهت بررسی صحت مدل عددی حاضر، شبیه‌سازی در اعداد رینولدز ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ نیز انجام شده و با نتایج آزمایشگاهی جیانگ و همکاران [۲۱] در شکل (۶-ب) مقایسه شده است، که نشان از تطابق مناسب مدل عددی تحقیق حاضر با نتایج آزمایشگاهی دارد.



شکل (۷): نمودار نسبت سطح فعال واکنش به سطح الکترود در چینش‌ها و شکل سطح مقطع‌های متفاوت

در شکل ۹ نمودارهای تغییرات نسبت سرعت الکترولیت در راستای عرض الکترود در خطوط مختلف چینش‌های متفاوت با جداکننده‌هایی با شکل سطح مقطع‌های دایروی، مربعی، لوزی و مثلثی را نشان داده شده است. به این ترتیب برای هر کدام از ۲۴ حالت، یک نمودار سرعت در راستای عرض الکترود رسم شده است. نسبت سرعت الکترولیت (متغییری بی‌بعد) در نظر گرفته شده در نمودارها، حاصل تقسیم سرعت محلی بر سرعت ورود جریان به سلول (یکسان در تمام حالات) است. در همه نمودارهای شکل ۸، تغییرات سرعت در راستای عرض الکترود به صورت قله و دره دیده می‌شوند. دره‌ها در راستای ستون‌های جداکننده‌ها می‌باشند و تعداد آن‌ها نیز با تعداد ستون‌های جداکننده‌ها برابر است؛ زیرا وجود جداکننده‌ها باعث افت سرعت جریان و تشکیل دنباله جریان می‌شود. اما قله‌ها که سهم بیشتری از عرض الکترود را شامل شده و بیشترین سرعت را دارند، در راستای ستون‌های فاصله بین جداکننده‌ها با یکدیگر و دیوار بوده و تعداد آن‌ها یک قله بیشتر از تعداد دره‌ها است. نمودار سرعت در خط ۱ (قبل از رسیدن جریان الکترولیت به اولین ردیف جداکننده) در تمام حالات، در راستای عرض الکترود تقریباً ثابت و سرعت در آن برابر با سرعت ورودی الکترولیت است.

مطالعه نمودارهای تغییرات سرعت در تمام چینش‌ها نشان می‌دهد که اختلاف سرعت بین قله‌ها و دره‌ها به ترتیب برای سطح مقطع شکل دایره، مربع، لوزی و مثلث افزایش می‌یابد. به بیانی دیگر، یکنواختی جریان الکترولیت در سلول با جداکننده‌های دایره شکل، بیشتر از دیگر اشکال است و از آنجا که یکنواختی جریان و سرعت الکترولیت در

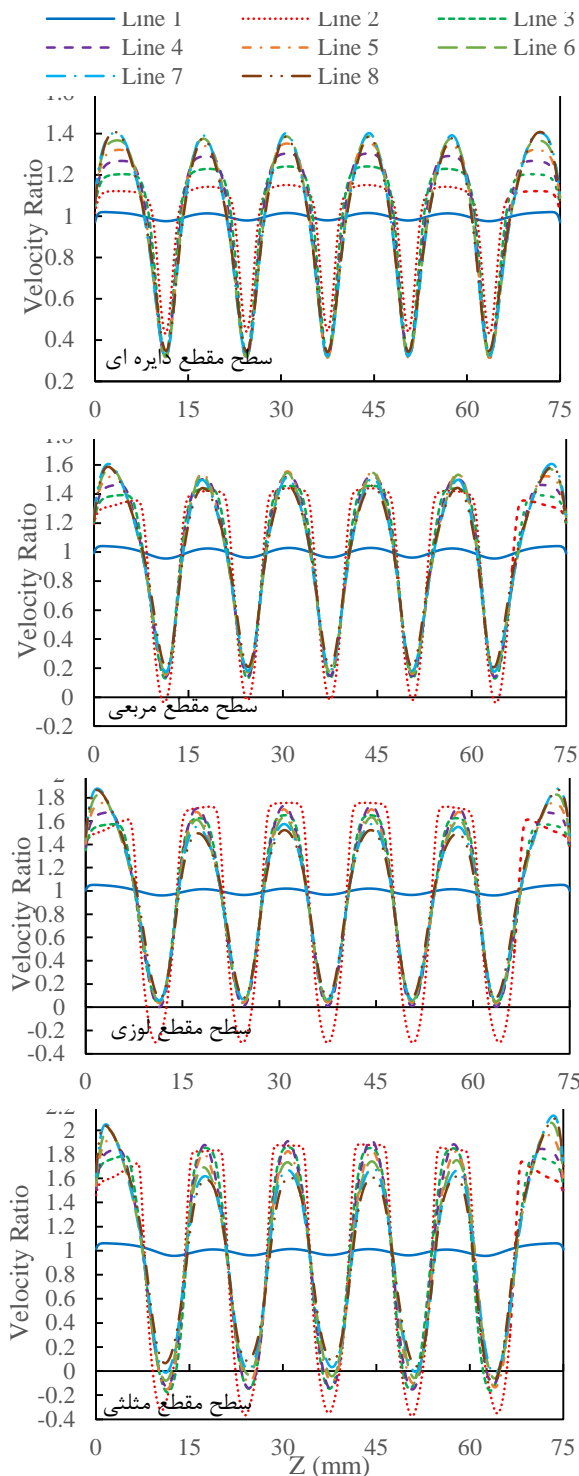
این ناحیه عملاً جریانی وجود نداشته و تماس بین الکترولیت و الکترود برقرار نیست.

۵- ارائه نتایج

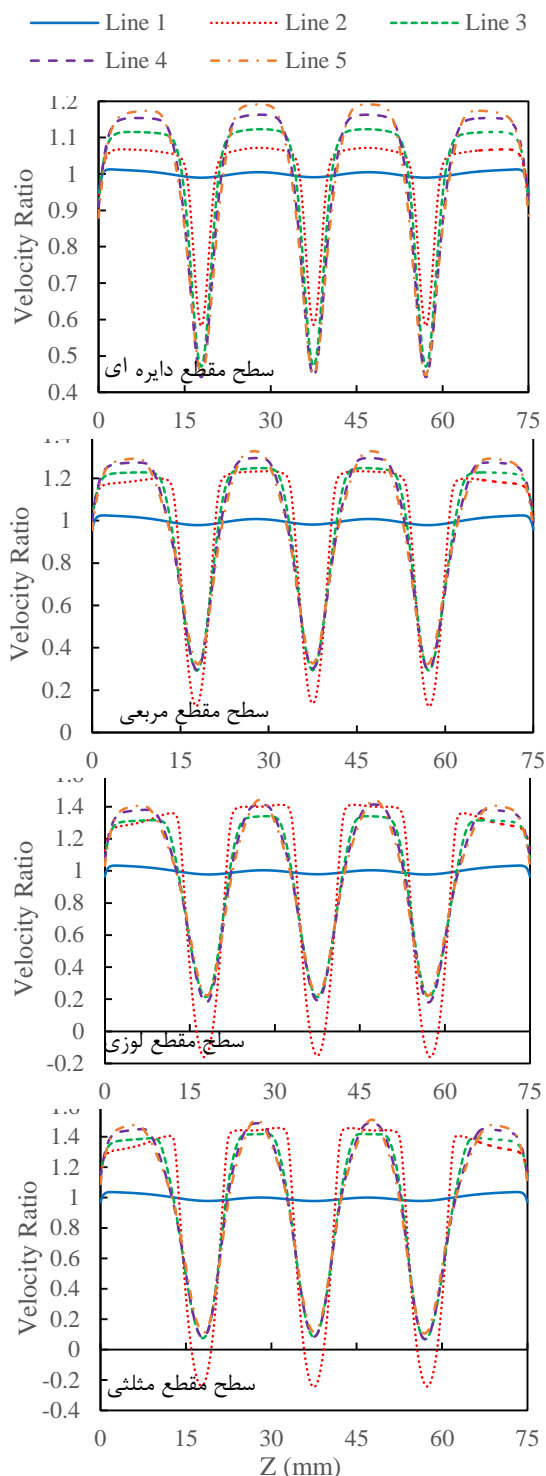
در این بخش نتایج مربوط به ۲۴ مدل، شامل ۶ چینش مختلف جداکننده با ۴ شکل سطح مقطع مختلف، ارائه شده است. همان‌طور که پیشتر اشاره شد، سطح فعال واکنش یکی از عوامل تأثیرگذار بر عملکرد باتری و تأثیرپذیر از نحوه چینش و شکل سطح مقطع جداکننده‌ها است. در شکل ۷ نمودار نسبت سطح فعال واکنش به مساحت کل الکترود (بدون جداکننده‌ها)، در هر ۲۴ مدل رسم شده است. نتایج این شکل نشان می‌دهد که در هر ۴ شکل سطح مقطع با افزایش تعداد جداکننده‌ها، سطح فعال واکنش کاهش می‌یابد. با در نظر گرفتن چینش یکسان برای جداکننده‌ها، سطح فعال واکنش به ترتیب برای شکل سطح مقطع دایره، مربع، لوزی و مثلث کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که بهترین عملکرد را چینش ۴ در ۳ با سطح مقطع دایره شکل و بدترین عملکرد را چینش ۷ در ۵ با سطح مقطع مثلث شکل دارد. شیب کمتر نمودار مربوط به دایره در شکل ۷ نشان می‌دهد که افزایش تعداد جداکننده با سطح مقطع دایره شکل به صرفه‌تر از دیگر اشکال است زیرا میزان افت سطح فعال واکنش در آن کمتر است. با رسم خطوط افقی در نمودار که در آن‌ها سطح فعال واکنش ثابت است، می‌توان حالت‌های مختلفی از ۲۴ حالت را جهت طراحی باتری انتخاب کرد. به عنوان مثال جهت طراحی سلولی با نسبت سطح فعال ۰/۹۲ سه انتخاب ۴ در ۳ با شکل مثلث، ۵ در ۴ با شکل لوزی و ۶ در ۵ با شکل مربع قابل انتخاب است که باید وابسته به شرایط طراحی از یکی از آن‌ها استفاده کرد.

در ادامه با رسم نمودارها و کانتورهای سرعت، میدان هیدرودینامیک در حالت‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. جهت رسم نمودارهای سرعت، خطوطی بین ردیف‌های جداکننده‌ها در نظر گرفته شده تا سرعت الکترولیت در آن‌ها بررسی شود. مکان و شماره‌گذاری این خطوط در شکل (۲-ب) نشان داده شده است. به تبع با افزایش تعداد ردیف‌های جداکننده‌ها، تعداد این خطوط نیز افزایش می‌یابد.

در دره کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال سرعت در قله‌های مکان خط ۲ بیشتر از خط ۱ و در دره‌های مکان خط ۲ کمتر از خط ۱ است. اما میزان این تغییرات (کاهش یا افزایش سرعت) کاهش یافته و ردیف جداکننده‌های انتهایی، تأثیر کمتری بر سرعت الکترولیت دارند.



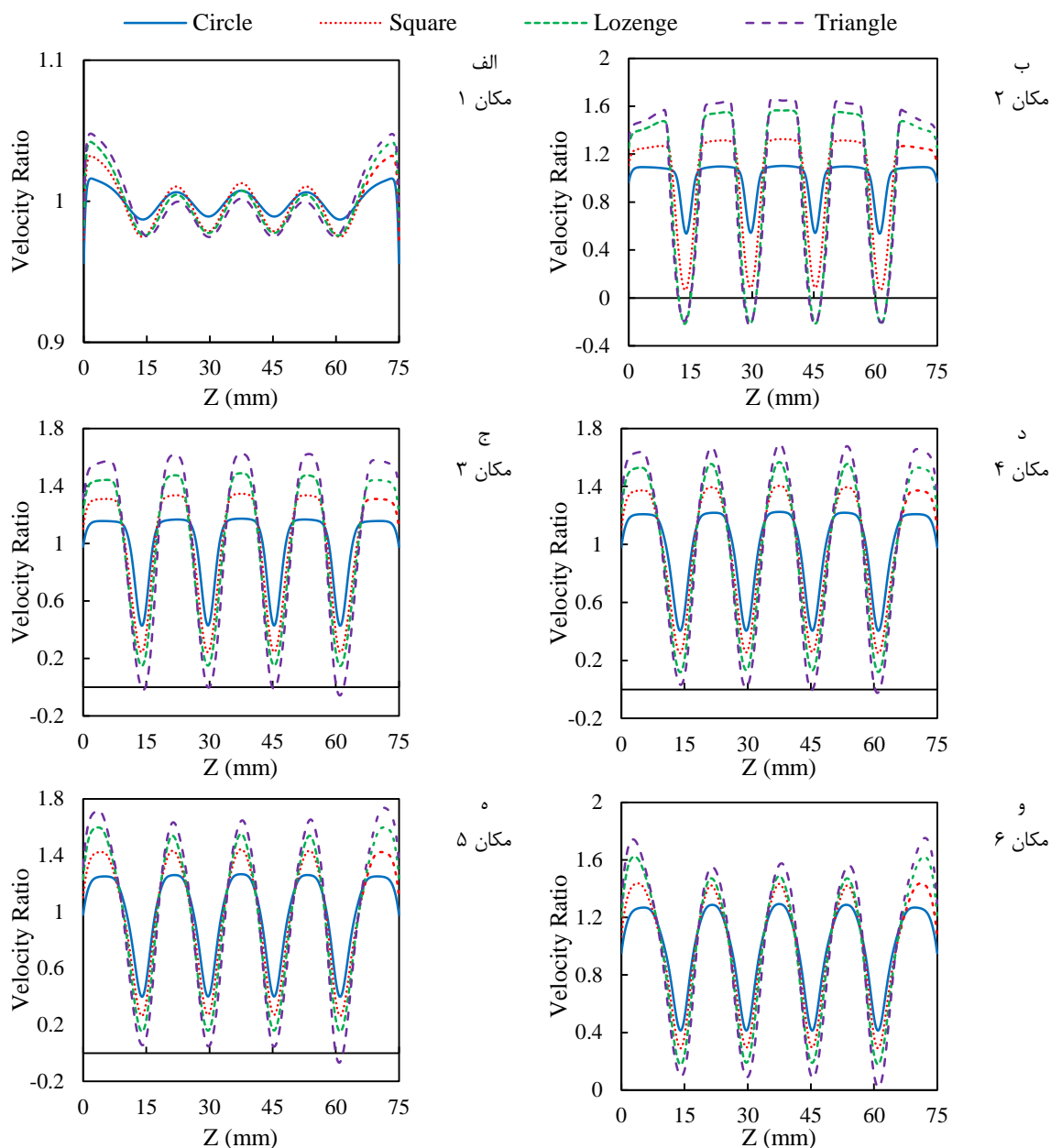
سلول باتری، به یکنواختی واکنش‌های اکسایش-احیا کمک می‌کند، لذا استفاده از جداکننده‌های دایره شکل، مناسب‌تر است. بررسی ۶ نمودار تغییرات سرعت مربوط به سطح مقطع دایره شکل نشان می‌دهد که با هر بار گذر الکترولیت از یک ردیف جداکننده، سرعت الکترولیت در قله افزایش و



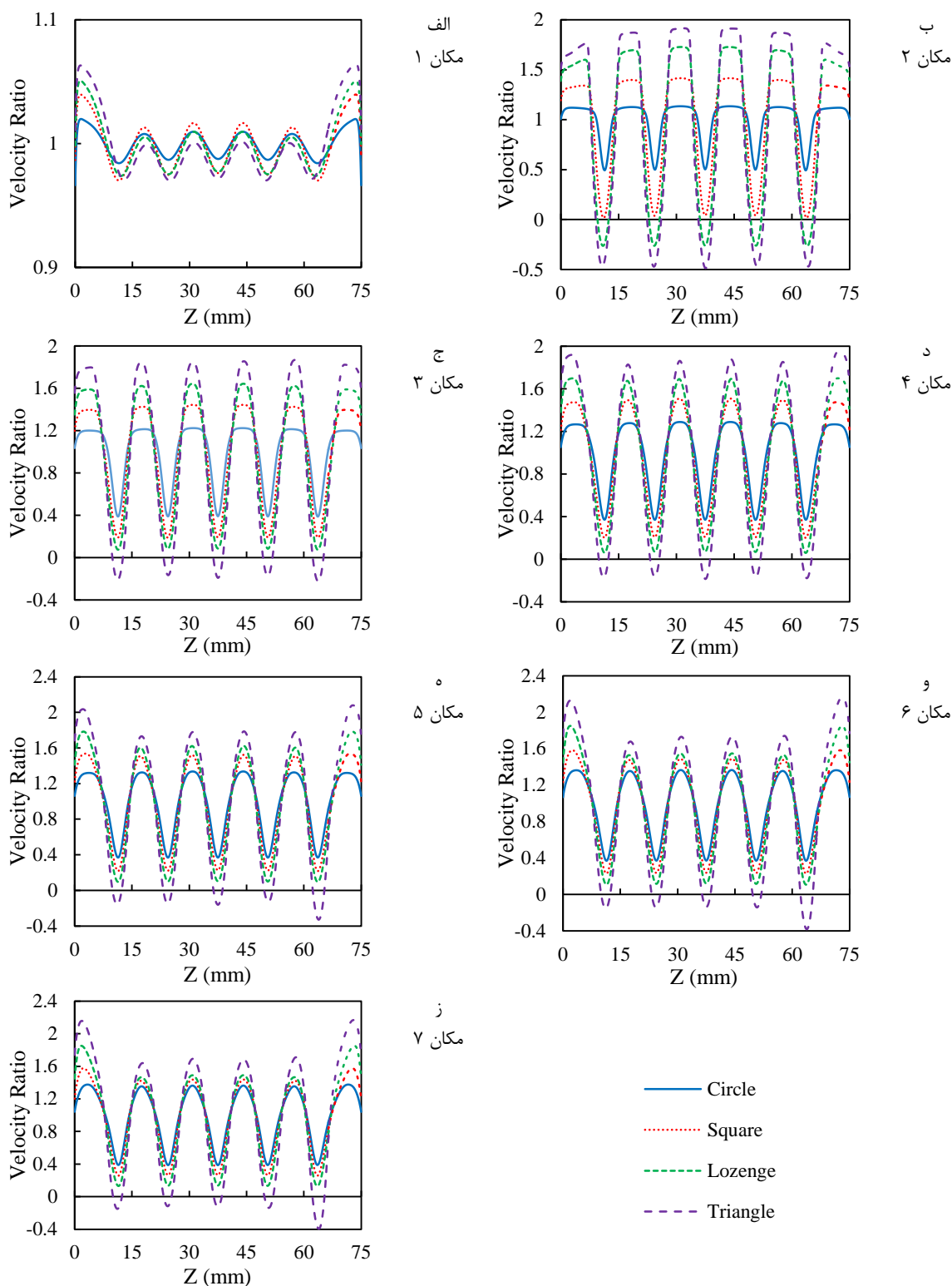
شکل (۸): تغییرات نسبت سرعت الکترولیت در راستای عرض الکتروود در خطوط مختلف الف) چینش ۴ در ۳ و ب) چینش ۷ در ۵ با شکل سطح مقطع‌های متفاوت

نشان از تأثیر مهم ردیف اول جداکننده‌ها در شکل مربع می‌دهد. به همین ترتیب بررسی ۶ نمودار مربوط به شکل لوزی و ۶ نمودار مربوط به شکل مثلث نیز نشان از افت سرعت مکان خط ۲ (در ناحیه دره‌ها) و تأثیر بیشتر ردیف اول جداکننده‌ها بر جریان الکترولیت داشته و این افت سرعت به مراتب بیشتر از جداکننده مربع شکل بوده در حتی سرعت منفی می‌شود (بازگشت جریان در ناحیه گرداب‌های دنباله جریان).

بررسی ۶ نمودار مربوط در شکل ۸ نیز نشان می‌دهد که این اتفاق برای مربع نیز به مانند دایره تکرار می‌شود با این تفاوت که تغییرات سرعت مربوط به مکان خط ۲ کمی متفاوت رفتار می‌کند. علت این امر می‌تواند طول بیشتر دنباله تشکیل شده (نسبت به دایره) پس از اولین ردیف جداکننده مربع شکل باشد. در دره‌های مربوط به تغییرات سرعت جداکننده مربع شکل، سرعت در مکان خط ۲ به‌طور چشم‌گیری نسبت به باقی مکان‌ها کاهش یافته است که



شکل (۹): نمودار تغییرات نسبت سرعت الکترولیت در راستای عرض الکتروود در ۴ شکل سطح مقطع جداکننده با چینش ۵ در ۴ در خط الف) مکان ۱، (ب) مکان ۲، (ج) مکان ۳، (د) مکان ۴، (ه) مکان ۵ و (و) مکان ۶



شکل (۱۰): تغییرات نسبت سرعت الکتروولت در راستای عرض الکتروود در ۴ شکل مقطع جداکننده با چینش ۶ در ۵ در خط (الف) مکان ۱، (ب) مکان ۲، (ج) مکان ۳، (د) مکان ۴، (ه) مکان ۵، (و) مکان ۶ و (ز) مکان ۷

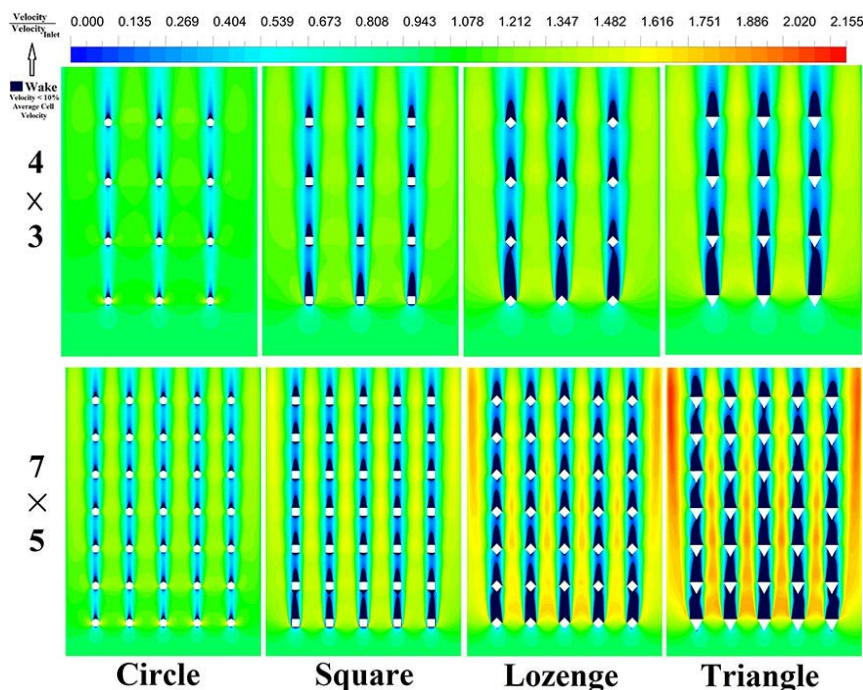
جداکننده و ردیف و ستون آن‌ها، علاوه بر افزایش تعداد قله‌ها و دره‌ها در تغییرات سرعت در راستای عرض الکتروود، اختلاف سرعت بین قله و دره نیز افزایش می‌یابد. این

در ادامه با ارائه و تشریح کانتورهای سرعت، علت این موضوع روشن‌تر می‌شود. با مقایسه نمودارهای تغییر سرعت در چینش‌های مختلف مشخص است که با افزایش تعداد

۱ افزایش می‌یابد و در واقع تأثیر ردیف اول جداکننده‌ها بر جریان پشتی بیشتر می‌شود. دقت و توجه بیشتر در این نمودارها، تأثیر بیشتر تغییر چینش بر جریان الکترولیت در سلول با جداکننده‌های لوزی و مثلث شکل نسبت به دایره و مربع را نمایان می‌کند. در خط مکان ۲ تمامی چینش‌ها، مقدار سرعت در دو قله راست و چپ نمودار (کنار دیوارهای جانبی سلول)، کمتر از دیگر قله‌ها است؛ اما در ادامه، با نزدیک شدن به مرز خروجی سلول (مکان‌های ۳ به بعد)، قله‌های نزدیک به دیوارها مرتفع‌تر می‌شوند. به عبارتی دیگر بیشترین سرعت جریان الکترولیت در ابتدای جریان، مربوط به نواحی وسط سلول و در انتهای جریان مربوط به نواحی اطراف سلول است. البته در شرایط جداکننده با سطح مقطع دایره و مربع شکل این تفاوت چشم‌گیر نیست. همان‌طور که از شیب نمودارها در شکل ۷ مشخص شده است که تأثیرپذیری جریان از نحوه چینش جداکننده‌ها به ترتیب دایره، مربع، لوزی و مثلث افزایش می‌یابد، بطوریکه در نمودارهای تغییرات سرعت در راستای عرض الکتروود شکل‌های ۹ و ۱۰ نیز این امر مشهود است.

رخداد نشان از غیر یکنواخت شدن جریان با افزایش جداکننده‌ها می‌دهد. با توجه به اینکه تأثیر شکل سطح مقطع جداکننده موضوع اصلی مدنظر تحقیق حاضر است، لذا نتایج تغییرات سرعت در راستای عرض الکتروود برای چینش‌های مختلف و در هر خط مکان، تغییرات سرعت برای ۴ شکل مختلف در شکل‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده است. نمودارهای تغییرات سرعت در راستای عرض الکتروود در این دو شکل نشان می‌دهند که در تمامی نمودارها (به‌طور مشابه در تمامی خط مکان‌های هر ۶ چینش)، سرعت الکترولیت در قله به ترتیب دایره، مربع، لوزی و مثلث افزایش و در دره به همین ترتیب کاهش می‌یابد؛ بنابراین یکنواختی جریان الکترولیت به ترتیب دایره، مربعی، لوزی و مثلثی کاهش می‌یابد. از آنجا که نرخ واکنش با سرعت الکترولیت رابطه مستقیم دارد، این رخداد حایز اهمیت است.

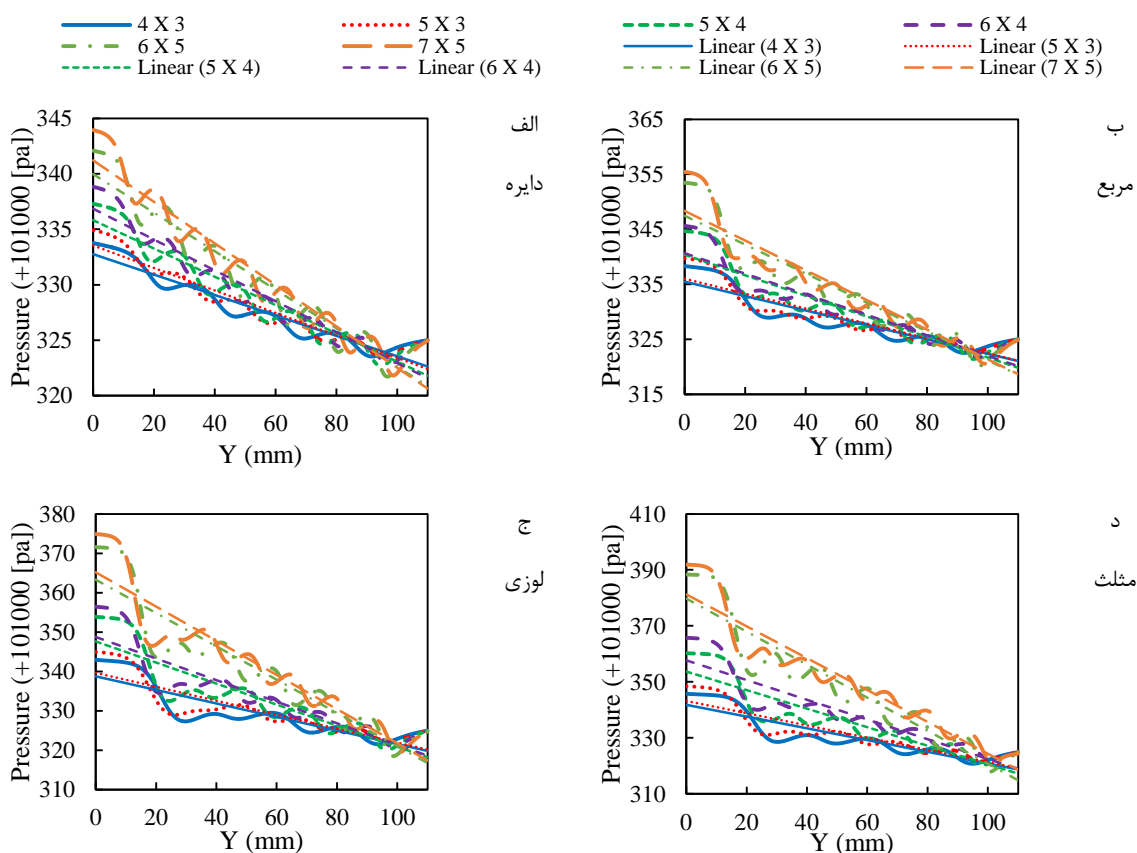
با مقایسه نمودار مکان ۱ در تمام چینش‌ها (مطابق شکل ۹ و ۱۰) می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش تعداد ردیف‌های جداکننده‌ها و نزدیک‌تر شدن ردیف اول به محل ورود جریان، اختلاف بین قله و دره نمودارها در مکان



شکل (۱۱): کانتور توزیع نسبت سرعت همراه با دنباله جریان (سطوح آبی تیره) در ۴ شکل سطح مقطع برای چینش‌های ۴ در ۳ (ردیف اول) و ۵ در ۷ (ردیف دوم)

مربع، لوزی و مثلث افزایش می‌یابد؛ لذا بیشترین سطح فعال واکنش را جداکننده دایره شکل دارد. کانتورها نشان می‌دهند که افزایش دنباله‌های جریان افزایش سرعت در دیگر نواحی سلول را به همراه دارد. این دو عامل تأثیر متفاوت و معکوس بر نرخ واکنش دارند؛ چرا که دنباله جریان باعث کاهش نرخ واکنش شده در حالی که افزایش سرعت بر نرخ واکنش می‌افزاید.

کانتور توزیع نسبت سرعت همراه با دنباله جریان برای چند حالت از ۲۴ حالت در شکل ۱۱ رسم شده است. این کانتورها می‌توانند توضیحات ذکر شده در پاراگراف‌های قبل در تشریح نمودارهای سرعت را تأیید کنند. در این کانتورها مکان و طول دنباله جریان با رنگ آبی تیره مشخص شده است. افزایش طول و تعداد دنباله‌های جریان، کاهش سطح فعال و نرخ واکنش را به همراه دارد. با توجه به کانتورها در هر چینش، سطح مربوط به دنباله جریان به ترتیب دایره،



شکل (۱۲): نمودار تغییرات فشار الکترولیت (همراه با خط روند) در راستای حرکت الکترولیت در جداکننده با شکل سطح مقطع (الف) دایره، (ب) مربع، (ج) لوزی و (د) مثلث

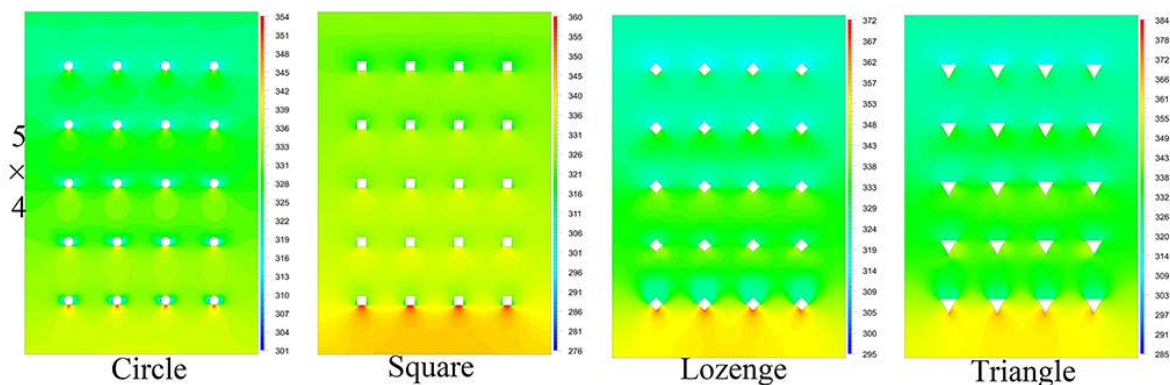
خارج می‌گردد. در ادامه جهت بررسی تغییرات فشار در راستای حرکت الکترولیت در ۲۴ حالت سلول در نظر گرفته شده، نمودارهای فشار به مانند نمودارهای سرعت در خطوطی بین جداکننده‌ها رسم شده‌اند. این خطوط در نمودارهای فشار طبق شکل (۲-ج) به صورت خط چین عمودی در نظر گرفته شده‌اند. نمودارهای توزیع فشار در راستای جهت جریان الکترولیت در هر شش چینش در شکل ۱۲ نشان داده شده است. بررسی و مطالعه این

همان‌طور که در مقدمه اشاره شد، توزیع فشار و مقدار آن از دیگر عوامل مهم در سلول باتری است. جهت جریان از فشار بیشتر به سمت فشار کمتر است؛ لذا در مرز ورودی که الکترولیت با دبی ۸۰ لیتر بر ساعت وارد می‌شود، فشار نسبت به خروج بیشتر است. افزایش این میزان فشار برای جریان یافتن الکترولیت در باتری بر عهده پمپ بیرون از باتری است. الکترولیت با فشاری بیشتر وارد باتری شده و پس از تولید توان و افت فشار در سلول‌های باتری، از آن

همچنین افزایش فشار با فشار بیشینه، پشت ردیف جداکننده‌های اول است. مقدار فشار بیشینه پشت ردیف جداکننده‌های اول، به ترتیب برای جداکننده‌های با سطح مقطع دایره، مربع، لوزی و مثلث افزایش می‌یابد. در هر ۴ شکل سطح مقطع، با افزایش تعداد و ردیف جداکننده‌ها و نزدیک شدن ردیف اول به محل ورود الکتروولت، مقدار فشار بیشینه نیز افزایش می‌یابد. توجه به کانتورهای توزیع فشار نشان می‌دهد که ناحیه شامل افزایش فشار در پشت ردیف اول جداکننده‌های مربع شکل بزرگ‌تر و در پشت ردیف اول جداکننده‌های مثلث شکل کوچک‌تر است. فشار کمینه در کانتورهای توزیع فشار در حالات جداکننده با سطح مقطع دایره، در دو قسمت جانبی جداکننده‌های ردیف اول دیده می‌شود؛ در حالی که ناحیه افت فشار در جداکننده‌های لوزی و مثلث شکل، مقابل آن‌ها و در محل دنباله جریان قرار دارد. دیگر نکته قابل ذکر از کانتورهای توزیع فشار یکنواخت‌تر بودن فشار در حالات جداکننده با سطح مقطع دایره‌ای شکل است که تغییرات ناگهانی فشار در این کانتورها کمتر دیده می‌شود.

نمودارها نشان از افت فشار الکتروولت در راستای جریان می‌دهد. در هریک از این نمودارها که هرکدام مربوط به یک چینش است، چهار نمودار همراه با خط روند رسم شده که تفاوت آن‌ها در شکل سطح مقطع جداکننده است. مطالعه تک‌تک این نمودارها نشان می‌دهد که در تمام چینش‌ها، فشار ورودی سلول و شیب افت فشار به ترتیب دایره، مربع، لوزی و مثلث افزایش می‌یابد. همچنین بررسی این نمودارها نیز نشان می‌دهد که در تمام اشکال، فشار ورودی سلول و شیب افت فشار به ترتیب ۴ در ۳، ۳ در ۵، ۴ در ۶، ۴ در ۶ در ۵ و ۷ در ۵ افزایش یابد. بنابراین به بیان دیگر با افزایش تعداد جداکننده‌ها اختلاف فشار ورود و خروج و شیب افت فشار در باتری افزایش می‌یابد.

جهت بررسی بهتر توزیع فشار در ۲۴ حالت سلول در نظر گرفته شده، در شکل ۱۳، کانتور توزیع فشار در ۴ شکل سطح مقطع برای چینش ۴ در ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که ذکر شد، تمامی کانتورهای توزیع فشار نشان می‌دهند که فشار در مرز ورود بیشتر از خروج است.



شکل (۱۳): کانتور توزیع فشار در ۴ شکل سطح مقطع برای یک چینش مشخص جداکننده‌ها در فاصله بین دو الکتروود

مشترک الکتروودهای آند/ کاتد و الکتروولت، بررسی و بر اساس آن، عملکرد الکتروولت در حالت‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که اگرچه با افزایش تعداد جداکننده‌ها (برای همه جداکننده‌ها با سطح مقطع‌های دایره‌ای، مربعی، لوزی و مثلثی) در فاصله بین دو الکتروود، سطح فعال واکنش الکتروودی کاهش اما با این وجود، به ترتیب با در نظر گرفتن سطح مقطع‌های دایره‌ای، مربعی، لوزی و مثلثی برای جداکننده‌ها، سطح فعال واکنش مورد نظر کاهش بیشتری می‌یابد. در این مطالعه با بررسی

۶- جمع‌بندی

در این مقاله، عملکرد هیدرودینامیکی جریان الکتروولت در باتری جریانی Al-AgO در اثر حضور جداکننده‌های بین آند و کاتد مورد توجه قرار گرفته است. به همین منظور چینش‌های مختلف برای جداکننده‌ها همراه با چهار سطح مقطع متفاوت در نظر گرفته شده و مدل‌سازی عددی برای هر حالت انجام شده است. در این مطالعه، طول دنباله جریان ناشی از حضور جداکننده‌ها در مسیر جریان به‌عنوان عامل مؤثر بر کاهش سطح فعال الکتروشیمیایی در فصل

10. Maurya, S., Nguyen, P.T., Seung Kim, Y., and Kang, Q. "Effect of Flow Field Geometry on Operating Current Density, Capacity and Performance of Vanadium Redox Flow Battery", *Journal of Power Sources*, Vol. 404, pp. 20–27, 2018.
11. Zhang, B.W., Lei, Y., Bai, B.F., Xu, A., and Zhao, T.S. "A Two-Dimensional Mathematical Model for Vanadium Redox Flow Battery Stacks Incorporating Nonuniform Electrolyte Distribution in the Flow Frame", *Applied Thermal Engineering*, 2019.
12. Zhang, B.W., Lei, Y., Bai, B.F., and Zhao, T.S. "A Two-Dimensional Model for the Design of Flow Fields in Vanadium Redox Flow Batteries", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 135 pp. 460–469, 2019.
13. Gundlapalli, R. and Jayanti, S. "Effect of Channel Dimensions of Serpentine Flow Fields on the Performance of a Vanadium Redox Flow Battery", *Journal of Energy Storage*, Vol. 23, pp. 148–158, 2019.
14. Knudsen, E., Albertus, P., Cho, K.T., Weber, A.Z., and Kojic, A. "Flow Simulation and Analysis of High-Power Flow Batteries", *Journal of Power Sources*, Vol. 299, pp. 617–628, 2015.
15. Messaggi, M., Canzi, P., Mereu, R., Baricci, A., Inzoli, F., Casalegno, A., and Zago, M. "Analysis of Flow Field Design on Vanadium Redox Flow Battery Performance: Development of 3D Computational Fluid Dynamic Model and Experimental Validation", *Applied Energy*, Vol. 228, pp. 1057–1070, 2018.
16. Oh, K., Kang, T.J., Park, S., Tucker, M.C., Weber, A.Z., and Ju, H. "Effect of Flow-Field Structure on Discharging and Charging Behavior of Hydrogen/Bromine Redox Flow Batteries", *Electrochimica Acta*, Vol. 230, pp. 160-173, 2017.
17. Ishitobi, H., Saito, J., Sugawara, S., Oba, K., and Nakagawa, N., "Visualized Cell Characteristics by a Two-Dimensional Model of Vanadium Redox Flow Battery with Interdigitated Channel and Thin Active Electrode", *Electrochimica Acta*, Vol. 313, pp. 513-522, 2019.
18. Kumar, S. and Jayanti, S. "Effect of Electrode Intrusion on Pressure Drop and Electrochemical Performance of an All-Vanadium Redox Flow Battery", *Journal of Power Sources*, Vol. 360, pp. 548-558, 2017.
19. Escudero-Gonzalez, J. and Amparo Lopez-

تغییرات سرعت در راستای عرض الکترولیت مشخص گردید که با افزایش تعداد جداکننده، علی‌رغم افزایش تغییرات سرعت از ورودی سل باتری تا خروجی آن از مخزن، در حالت سطح مقطع دایروی جداکننده‌ها، یکنواختی جریان در عرض سل باتری بیشتر بوده و می‌تواند اثر مناسب‌تری بر یکنواختی نرخ انجام واکنش‌های الکتروشیمیایی در همه سطوح الکترودی بگذارد.

۷- مراجع

1. Chen, R., Kim, S., and Chang, Z., "Redox Flow Batteries: Fundamentals and Application", Chapter: 5, Publisher: InTech, 2017.
2. Thaller, L.H., and Ohio, S. "Electrically Rechargeable Redox Flow Cell", United States Patent, 1975.
3. Anderson, G.E., Middletown, R.I. "Al-AgO Primary Battery", United States Patent, 1975.
4. Weber, A.Z., Mench, M.M., Meyers, J.P., Ross, P.N., Gostick, J.T., Liu, Q. "Redox flow Batteries: a Review", *J. Appl. Electrochem*, Vol. 41, pp.1137–1164, 2011.
5. Arenas, L.F., de León, P., Frank, C. and Walsh, C. "Redox Flow Batteries for Energy Storage: Their Promise, Achievements and Challenges, Current Opinion in Electrochemistry", Vol. 16, pp. 117–126, 2019.
6. Choi, C., Kim, S., Kim, R., Choi, Y., Kim, S., Jung, H., Hoon Yang, J., and Kim, H. "A Review of Vanadium Electrolytes for Vanadium Redox Flow Batteries", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 69, pp. 263–274, 2017.
7. Khazaeli, A., Vatani, A., Tahouni, N., and Panjeshahi, M. H., "Numerical Investigation and Thermodynamic Analysis of the Effect of Electrolyte Flow Rate on Performance of All Vanadium Redox Flow Batteries", *Journal of Power Sources*, Vol. 293, pp. 599-612, 2015.
8. Wang, T., Fu, J., Zheng, M., and Yu, Z. "Dynamic Control Strategy for the Electrolyte Flow Rate of Vanadium Redox Flow Batteries", *Applied Energy*, Vol. 227, pp. 613-623, 2017.
9. Yang, H.S., Park, J.H., Ra, H.W., Jin, C.S., and Yang, J.H. "Critical Rate of Electrolyte Circulation for Preventing Zinc Dendrite Formation in a Zinc-bromine Redox Flow Battery", *Journal of Power Sources*, Vol. 325, pp. 446-452, 2016.

- MPa”, *Journal of Chemical Engineering Data*, Vol. 62, pp. 2959–2972, 2016.
21. Jiang, H. and Cheng, L. “Strouhal–Reynolds Number Relationship for Flow Past a Circular Cylinder”, *Journal of Fluid Mech.*, Vol. 832, pp. 170–188, 2017.
- Jimenez, P. “Methodology to Optimize Fluid-Dynamic Design in a Redox Cell”, *Journal of Power Sources*, Vol. 251, pp. 243-253, 2014.
20. Hnedkovsky, L., Bochmann, S., May, P.M., and Hefter, G., “Molar Volumes and Heat Capacities of Aqueous Solutions of Potassium Hydroxide and for Water Ionization up to 573 K at 10