

## ارزیابی قابلیت افزایش عمر باتری‌های روی-نقره به وسیله بهینه‌سازی فشار پرس به کاررفته در تولید الکترودهای نقره

مسعود سبزی<sup>۱\*</sup>، احمد منشی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> مربی باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

mas.metallurg88@gmail.com

<sup>۲</sup> استاد گروه مواد و متالورژی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

ahmad.monshi@yahoo.com

**چکیده:** در این پژوهش، اثر پارامتر فشار پرس به کاررفته در تولید الکترودهای نقره بر عمر باتری‌های روی-اکسید نقره مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، ابتدا چهار الکترودهای نقره (صفحه مثبت) با ترکیب ۹۵ درصد وزنی اکسید نقره، ۴/۹ درصد وزنی پودر کربن و ۰/۱ درصد وزنی رزین به روش متالورژی پودر و با فشار پرس ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ بار تهیه شد. سپس هر چهار الکترودهای نقره در زمان ۱۳ دقیقه و دمای ۵۰۰°C تحت عملیات سینترینگ قرار گرفتند. برای بررسی تأثیر فشار پرس به کاررفته در تولید الکترودهای نقره بر عمر باتری‌های روی-نقره از آزمایش تخلیه الکتریکی در الکترولیز ۱/۴ درصد وزنی هیدروکسید پتاسیم (KOH) استفاده شد. برای بررسی ریزساختار الکترودها و آنالیز نقطه‌ای آن‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDX) استفاده شد. نتایج آزمایش‌های تخلیه الکتریکی نشان داد که فشار پرس ۶۰ بار، بهینه‌ترین فشار پرس برای افزایش عمر باتری‌های روی-نقره است. براساس مشاهدات تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، با افزایش فشار پرس، میزان و اندازه تخلخل‌های ظاهری در الکترودهای نقره کاهش می‌یابد. همچنین نتایج آنالیز EDX دلالت بر افزایش اکسیژن الکترودهای نقره با افزایش فشار پرس داشت.

**واژه‌های کلیدی:** باتری‌های روی-نقره، فشار پرس، عمر باتری، الکترودهای نقره، محلول هیدروکسید پتاسیم.

## ۱. مقدمه

در آغاز و در آستانهٔ قرن نوزدهم، این ولتاژ بود که پیل نقره-روی را به عرصهٔ علوم و تکنولوژی الکتروشیمیایی معرفی کرد. اما کسب رسمیت و کاربرد سیستم قلبیایی روی-اکسید نقره به‌عنوان باتری‌های اولیه و ثانویه تا دههٔ پنجم قرن بیستم حاصل نشد [۱-۲]. از آن زمان به‌بعد، فناوری ساخت باتری‌های روی-اکسید نقره رشد بسیاری داشته و همین امر منجر به کاربرد آن در حوزه‌های مختلف صنعتی، نظامی و هوافضا شده است. با افزایش تقاضا برای توان الکتریکی بالاتر، از سال ۱۹۴۰ زوج‌های جدیدی در صنعت باتری توسعه یافته‌اند. یکی از این زوج‌ها، زوج روی-اکسید نقره است که در بسیاری از سیستم‌های نظامی نظیر اژدرها، موشک‌ها، ماهواره‌ها، هواپیماها و بالگردها مورد استفاده قرار گرفته است. این باتری‌ها به‌دلیل امتیازاتی چون توان و دانسیتهٔ انرژی بالا، کاربردهای گسترده‌ای به‌عنوان باتری اولیه (شارژناپذیر) و ثانویه (شارژپذیر) دارند [۳-۴].

باتری‌های روی-اکسید نقره از اجزائی نظیر الکتروود منفی (صفحات روی)، الکتروود مثبت (صفحات نقره)، جداکننده<sup>۲</sup> (سلولزی، سلوفاتی، پنبه‌ای)، الکتروولیت (هیدروکسید پتاسیم) ساخته شده‌اند. لذا چگونگی عملکرد این باتری‌ها به پارامترهای ذکر شده بستگی دارد [۵-۶].

برای مثال در تحقیقاتی که ترابی و همکاران [۷] انجام داده‌اند، گزارش شده است که جنس جداکننده تأثیر زیادی بر ظرفیت نهایی و بازده باتری روی-اکسید نقره دارد. این محققان با بررسی سه نوع جداکننده از جنس سلولزی، سلوفاتی<sup>۳</sup> و پنبه‌ای دریافتند که جداکننده‌های سلولزی دارای بیشترین توان خروجی، کمترین مقاومت داخلی و در نتیجه، کمترین افت توان بوده که در نهایت باعث تولید بیشترین توان و انرژی می‌شود. همچنین مقاومت مکانیکی جداکننده‌های سلولزی برای ساخت باتری‌های اولیه بسیار مناسب بوده و بنابراین به‌عنوان بهترین گزینه برای ساخت باتری روی-اکسید نقره ایدئال معرفی می‌شود.

در باتری‌های روی-اکسید نقره، نقره به‌صورت‌های مختلفی همچون  $Ag_2O$ ،  $AgO$ ،  $Ag$  و نیز مخلوطی از آن‌ها به‌کار گرفته شده است. یکی از ویژگی‌های مهم  $Ag_2O$  برای کاربرد آن به‌عنوان یک ماده فعال در باتری‌های روی-اکسید نقره، مقاومت داخلی کم و انحلال پذیری عالی در محیط‌های قلبیایی آن است. این مقاومت کم  $Ag_2O$  نشان‌دهندهٔ عدم حضور الکترون‌های غیر مستقر یا جفت‌نشده در شبکهٔ آن است [۸].

اکسیدهایی از نقره که از نظر سازندگان و استفاده‌کنندگان سلول‌های روی-اکسید نقره بیشترین اهمیت را دارند، عبارت‌اند از  $Ag_2O$  و  $AgO$  توجه به خواص این مواد در سال‌های اخیر، منجر به تحقیقاتی در زمینهٔ

ساختارهای بلوری و رفتار الکتروشیمیایی آن‌ها در محلول آبی هیدروکسید پتاسیم شده است. بررسی‌ها نشان داده است که تجزیهٔ  $Ag_2O$  به  $AgO$  به‌وسیلهٔ آزاد شدن آندی  $O_2$  کنترل می‌شود. از نظر ترمودینامیکی، اکسید یک ظرفیتی در محلول‌های قلبیایی آبی اشباع از  $Ag_2O$  و اکسیژن در  $torr$  ۷۶۰ پایدار بوده و انرژی آزاد تشکیل آن برابر با  $۲۷ Kcal/mol$  - است. بررسی ساختار بلوری اکسید نقره نشان می‌دهد که  $Ag_2O$  و  $AgO$  به‌ترتیب دارای ساختارهای کریستالی مونوکلینیک<sup>۴</sup> و مکعبی سطوح مرکزدار<sup>۵</sup> هستند. همچنین گزارش شده است که اکسید نقره در حالت  $Ag_2O$  نسبت به  $AgO$ ، حلالیت بیشتری در محلول آبی هیدروکسید پتاسیم دارد [۹].

واکنشی که در باتری‌های روی-اکسید نقره اتفاق می‌افتد و منجر به تولید انرژی الکتریکی می‌شود، به شرح زیر است [۱۰]:



در این زمینه، تحقیقات صورت گرفته حکایت از این دارد که سرعت تجزیه با افزایش غلظت  $Ag_2O$  حل شده بیشتر می‌شود [۱۱].

الکترودهای اکسید نقره برای به‌کارگیری در باتری‌های روی-اکسید نقره با سه روش پرس خشک، تفجوشی<sup>۶</sup> و روش خمیری تولید می‌شوند. با توجه به اینکه روش ساخت الکترودهای مثبت و منفی تأثیر زیادی بر عملکرد باتری‌های روی-اکسید نقره دارند، این پژوهش در نظر دارد که به بررسی تأثیر فشار پرس که در روش ساخت الکترودهای اکسید نقره به‌کار می‌رود، بر عمر باتری‌های روی-اکسید نقره بپردازد که در پژوهش‌های پیشین به آن پرداخته نشده بود.

## ۲. مواد و روش تحقیق

در این پژوهش، ابتدا پودر اکسید نقره به‌صورت مخلوطی از  $Ag_2O$  و  $AgO$  با اندازهٔ ذره ۵-۴ میکرومتر به روش رسوب الکترولیتی تهیه شد. سپس برای بررسی تأثیر فشار پرس به‌کاررفته در ساخت الکترودهای اکسید نقره بر عمر پیل‌های روی-اکسید نقره، ابتدا چهار الکتروود با ترکیب ۹۵ درصد وزنی پورد اکسید نقره، ۴/۹ درصد وزنی پودر کربن و ۰/۱ درصد وزنی رزین به روش متالورژی پودر و با فشار پرس ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ بار و زمان پرس ۵ ثانیه در ابعاد  $۴۲ \times ۹۸ \text{mm}^۲$  تولید شد. سپس هر چهار الکتروود درون کورهٔ الکتریکی قرار گرفته و در دمای  $۵۰۰^\circ\text{C}$  به‌مدت ۱۳ دقیقه تحت عملیات سینترینگ قرار گرفتند. در مرحلهٔ بعد، برای شارژ الکترودها فرامسیون<sup>۷</sup> روی آن‌ها انجام گرفت. مراحل فرامسیون در جدول (۱) گزارش داده شده است.

4. Monoclinic  
5. Face Centered Cubic (FCC)  
6. Sintering  
7. Framation

1. Volta  
2. Separator  
3. Sulfate

جدول (۱): توضیح مراحل فرایند فرماسیون اعمال شده روی هر چهار الکترود.

| گام   | شرح انجام فعالیت                                     | زمان شروع | زمان پایان | ولتاژ شروع | ولتاژ پایان |
|-------|--|-----------|------------|------------|-------------|
| اول   | خیساندن الکترودها به مدت ۲ ساعت                      | ۱۶:۳۰     | ۱۸:۳۰      | -          | -           |
| دوم   | شارژ الکترودها با جریان ۱٫۲A تا رسیدن به ولتاژ ۲٫۳۴V | ۱۸:۳۰     | ۷:۳۰       | ۱٫۵۶       | ۲٫۳۴        |
| سوم   | رها سازی الکترودها به مدت ۹۰ دقیقه                   | ۷:۳۰      | ۹:۰۰       | -          | -           |
| چهارم | شارژ الکترودها با جریان ۰٫۴A تا رسیدن به ولتاژ ۲٫۳۴V | ۹:۰۰      | ۱۱:۳۰      | ۲٫۱۸       | ۲٫۳۴        |
| پنجم  | رها سازی الکترودها به مدت ۹۰ دقیقه                   | ۱۱:۳۰     | ۱۳:۰۰      | -          | -           |
| ششم   | شارژ الکترودها با جریان ۰٫۲A تا رسیدن به ولتاژ ۲٫۳۷V | ۱۳:۰۰     | ۱۵:۰۰      | ۲٫۱۸       | ۲٫۳۰        |

۱۰ آمپر انجام گرفت. همچنین کاهش ولتاژ توسط ولت متر مشاهده شده و برحسب زمان تخلیه ثبت شد.

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳.۱. مشاهدات ریزساختاری و بررسی تخلخل ها

در شکل (۱)، تصاویر تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از هر چهار الکترود، پس از عملیات فرماسیون نشان داده شده است. همان طور که در شکل (۱) دیده می شود، الکترود تولید شده با فشار پرس ۱۰۰ بار نسبت به الکترود تولید شده با فشار پرس ۴۰ بار، هم دارای اندازه تخلخل ظاهری کوچک تر و هم حاوی میزان تخلخل ظاهری کمتری است. در واقع، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی دلالت بر کاهش میزان و اندازه تخلخل های ظاهری در اثر افزایش فشار پرس دارند. دلیل این امر آن است که در اثر افزایش فشار پرس، فضای خالی بین ذرات کمتر شده و چسبندگی بین پودر نقره، پودر کربن و رزین افزایش یافته است. از طرفی دیگر، میزان زیادی (۴/۹ درصد وزنی) کربن آزاد در الکترود وجود دارد که در حین سیتترینگ، با اکسیژن آزاد شده از ترکیب اکسید نقره، ترکیب شده و گاز دی اکسید کربن را تشکیل می دهد (معادله ۵)، و همین گاز یکی دیگر از عوامل ایجاد تخلخل در الکترود اکسید نقره است (شکل ۲) [۱۳]. در واقع با اعمال دمای سیتترینگ  $500^{\circ}\text{C}$ ، اکسید نقره ( $\text{Ag}_2\text{O}$ ) و  $\text{AgO}$  تبدیل به نقره خالص به همراه اکسیژن شده که این اکسیژن آزاد شده با کربن موجود در الکترودها واکنش داده و گاز دی اکسید کربن را به وجود آورده است.



سیس برای بررسی انواع تخلخل در الکترودهای تولید شده، از روش شناوری در مایعات ارشمیدوس استفاده شد. بدین منظور ابتدا الکترودهای خشک وزن شدند ( $W_d$ )، سپس وزن الکترودها حین غوطه وری در آب ( $W_s$ ) و بلافاصله پس از خروج از آب ( $W_w$ ) اندازه گیری شدند. سپس مطابق با استاندارد ASTM B962 [۱۲]، با استفاده از معادله (۲) تخلخل ظاهری الکترودها و با استفاده از معادله (۳) تخلخل واقعی الکترودها محاسبه شد.

$$W_w - W_d = \frac{w_w - w_d}{w_w - w_s} \times 100 \quad (2)$$

تخلخل ظاهری

$$W_d = \frac{w_d}{w_w - w_s} \times 100 \quad (3)$$

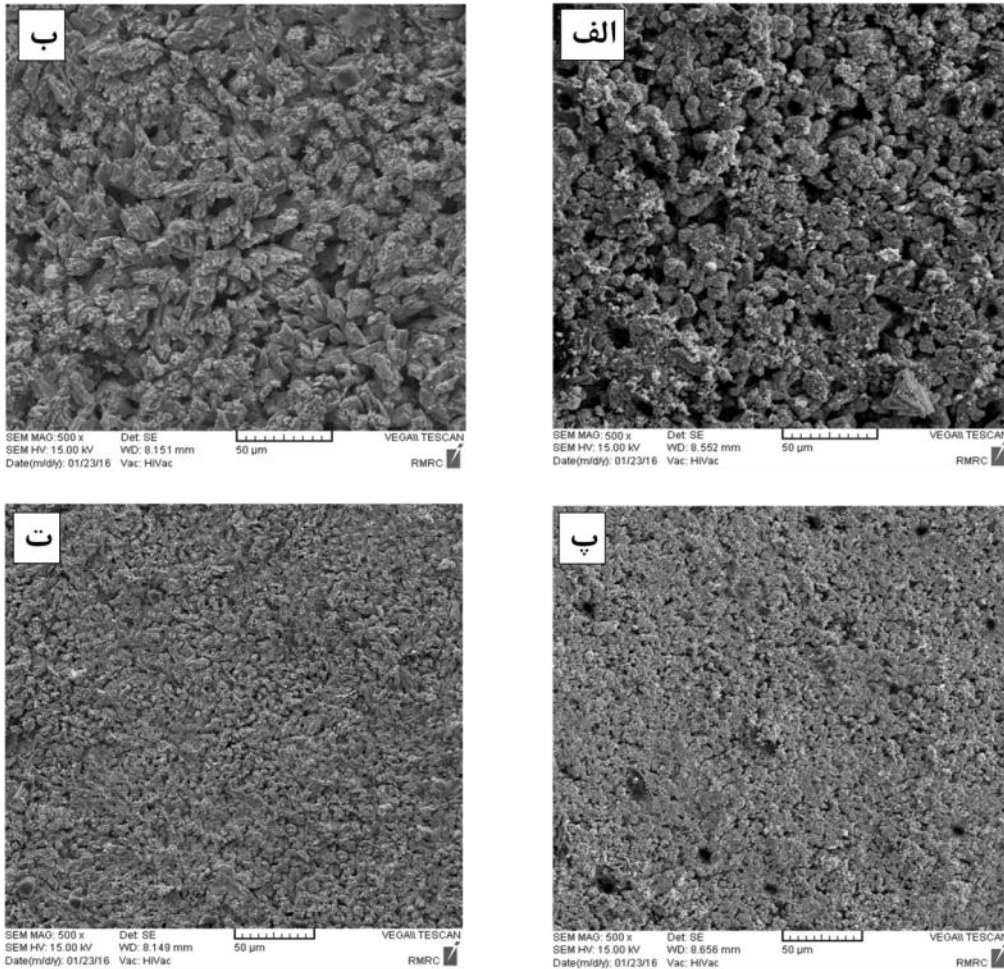
تخلخل واقعی

$$\text{تخلخل های ظاهری} - \text{تخلخل های واقعی} = \text{تخلخل های بسته} \quad (4)$$

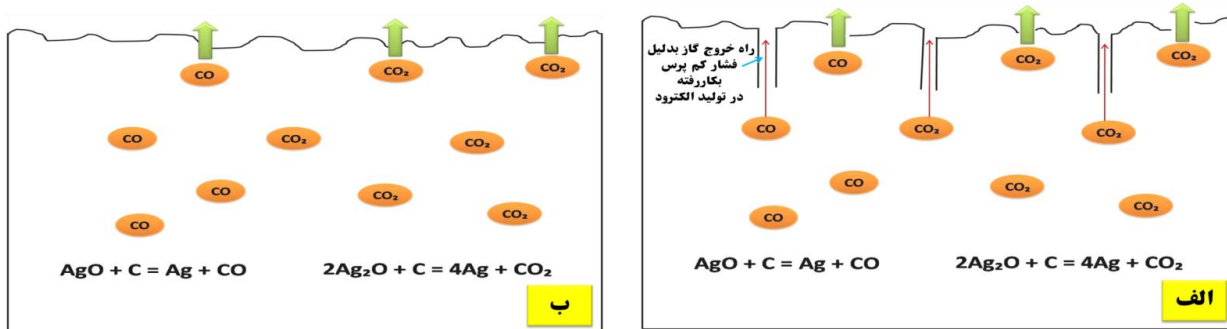
برای بررسی تأثیر فشار پرس بر ریزساختار الکترودهای اکسید نقره، از میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۱</sup> و برای بررسی آنالیز شیمیایی آن ها پس از فرایند فرماسیون از آنالیز طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس<sup>۲</sup> EDX استفاده شد. با توجه به اینکه الکترودهای اکسید نقره هادی الکتریسیته نیستند، ابتدا سطح الکترودها با طلا پوشش داده شد تا سطح آن ها هادی جریان الکتریسیته شده و از تجمع بار الکتریکی در سطح آن ها در حین تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی روبشی جلوگیری شود.

به منظور بررسی تأثیر فشار پرس به کاررفته در تولید الکترودهای اکسید نقره بر ظرفیت نهایی پیل های روی-اکسید نقره، ابتدا یک الکترود اکسید نقره (مثبت) را در بین دو الکترود روی (منفی) قرار داده و سپس برای جلوگیری از ایجاد اتصال کوتاه بین آن ها، از جداکننده سلولزی استفاده شد. در مرحله بعد، الکترودهای تهیه شده به درون محلول ۱/۴ درصد وزنی هیدروکسید پتاسیم فرو برده شده و بدین ترتیب یک سلول باتری روی-اکسید نقره تهیه شد. سپس باتری به یک دستگاه گیرنده جریان متصل شد و عمل تخلیه تحت جریان

1. Scanning Electron Microscopy (SEM)  
2. Energy Dispersive X-ray (EDX)



شکل (۱): تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از الکترود تولیدشده با فشار پرس: الف. ۴۰ بار، ب. ۶۰ بار، پ. ۸۰ بار، ت. ۱۰۰ بار



شکل (۲): نحوه تشکیل گاز در الکترودهای اکسید نقره در حین سینترینگ<sup>۱</sup> و تأثیر این گازها بر میزان تخلخل الکترود اکسید نقره تولیدشده با فشار پرس: الف. ۴۰ بار، ب. ۱۰۰ بار

جدول (۲): میزان تخلخل در الکترودهای مختلف براساس ASTM B962

| فشار پرس (بار) | تخلخل‌های ظاهری (%) | تخلخل‌های واقعی (%) | تخلخل‌های بسته (%) | * اندازه متوسط تخلخل‌های ظاهری (میکرومتر) |
|----------------|---------------------|---------------------|--------------------|---|
| ۴۰             | ۶۳ ± ۰/۵            | ۶۴ ± ۰/۵            | ۱ ± ۰/۵            | ۳/۲۱ ± ۰/۰۲                               |
| ۶۰             | ۴۲ ± ۰/۵            | ۴۴ ± ۰/۵            | ۲ ± ۰/۵            | ۲/۹۷ ± ۰/۰۲                               |
| ۸۰             | ۳۸ ± ۰/۵            | ۴۲ ± ۰/۵            | ۴ ± ۰/۵            | ۲/۲۴ ± ۰/۰۲                               |
| ۱۰۰            | ۲۶ ± ۰/۵            | ۳۱ ± ۰/۵            | ۵ ± ۰/۵            | ۱/۷۳ ± ۰/۰۲                               |

\* برای اندازه‌گیری اندازه تخلخل‌ها، اندازه چند تخلخل توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی اندازه‌گیری و میانگین آن‌ها به‌همراه انحراف معیار آن گزارش شده است.

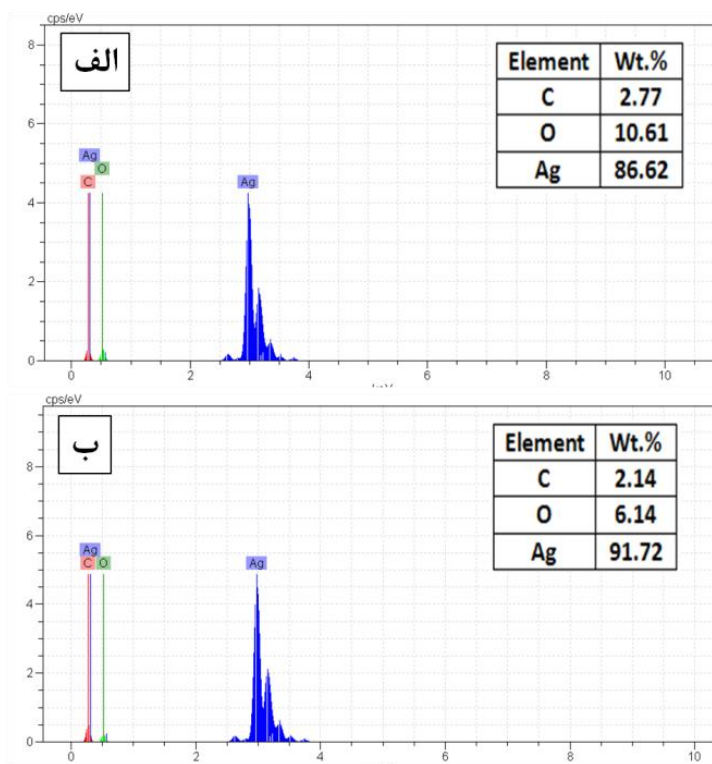
## 1. Sintering

الکترودهای اکسید نقره تولیدشده با فشار پرس ۴۰ و ۱۰۰ بار، نشان داده شده است. آنچه در نمودارهای این بررسی به وضوح دیده می شود، کاهش میزان اکسیژن و کربن در اثر کاهش فشار پرس است. درحقیقت با افزایش فشار پرس، فضای کمتری برای حضور اکسیژن داده شده و در نتیجه میزان تخلخل ظاهری کمتری در الکترودهای اکسید نقره تشکیل شده است (شکل ۲) [۱۴]. نتایج آنالیز نقطه‌ای مشاهدات میکروسکوپ الکترونی روبشی و اندازه‌گیری تخلخل‌های ظاهری را اثبات می‌کند. همان‌طورکه در جدول (۲) دیده شد، افزایش فشار پرس منجر به کاهش میزان تخلخل‌های ظاهری و افزایش تخلخل‌های واقعی و بسته می‌شود. به طوری‌که میزان تخلخل‌های بسته در الکترودهای اکسید نقره تولیدشده با فشار پرس ۱۰۰ بار نسبت به الکترودهای اکسید نقره تولیدشده با فشار پرس ۴۰ بار به پنج برابر رسیده است که همین موضوع (کاهش اکسیژن و کربن) به وضوح در نمودارهای آنالیز نقطه‌ای نمایان شده است.

برای بررسی تخلخل‌ها از روش شناوری در مایعات ارشمیدوس استفاده شده و نتایج آن در جدول (۲) گزارش داده شده است. همان‌طورکه در جدول (۲) ملاحظه می‌شود، با افزایش فشار پرس، میزان تخلخل‌های ظاهری کاهش یافته ولی میزان تخلخل‌های واقعی و بسته افزایش یافته است. این نتایج، مشاهدات میکروسکوپ الکترونی روبشی را در خصوص تخلخل‌های ظاهری اثبات می‌کند. با توجه به اینکه در باتری‌های روی-اکسید نقره نیاز است که هر دو الکتروود موجود در باتری با الکتروولیز در تماس مستقیم باشند، افزایش فشار پرس با کاهش میزان تخلخل‌های ظاهری منجر به کاهش نفوذپذیری الکتروولیز در الکتروود اکسید نقره شده و در نهایت منجر به کاهش راندمان باتری خواهد شد. لذا تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی بیانگر این موضوع است که فشار پرس ۴۰ بار نسبت به فشار پرس ۱۰۰ بار برای تولید الکترودهای اکسید نقره متخلخل مناسب‌تر است.

### ۲.۳. آنالیز EDX الکترودها

در شکل (۳) الگوهای حاصل از آنالیز نقطه‌ای (EDX) برای



شکل (۳): نمودارهای مربوط به آنالیز EDX برای الکترودهای تولیدشده با فشار پرس: الف. ۱۰۰ بار، ب. ۴۰ بار

برسد. در کاربرد موردنظر در این پژوهش، این ولتاژ برابر با ۱/۱ ولت بوده است. پارامتر مهم دیگر شیب نمودار است. مسلماً کاهش تدریجی ولتاژ مطلوب‌تر است. چنان‌که مشاهده می‌شود شیب تغییر ولتاژ در نمودارهای مربوط به پیل‌های حاوی الکترودهای اکسید نقره ساخته شده با فشار پرس ۶۰ بار ملایم است [۱۵].

### ۳.۳. آزمایش تخلیه الکتریکی

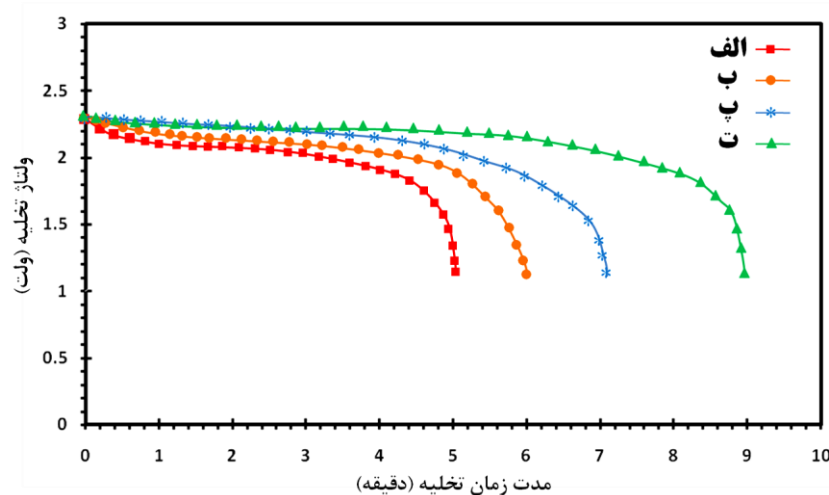
نمودارهای ولتاژ-زمان تخلیه، برای هر چهار الکتروود تولیدشده در شکل (۴) نشان داده شده است. یک پارامتر مهم در نمودارهای ولتاژ-زمان تخلیه، مقدار زمانی است که طول می‌کشد تا ولتاژ به مقدار مشخصی



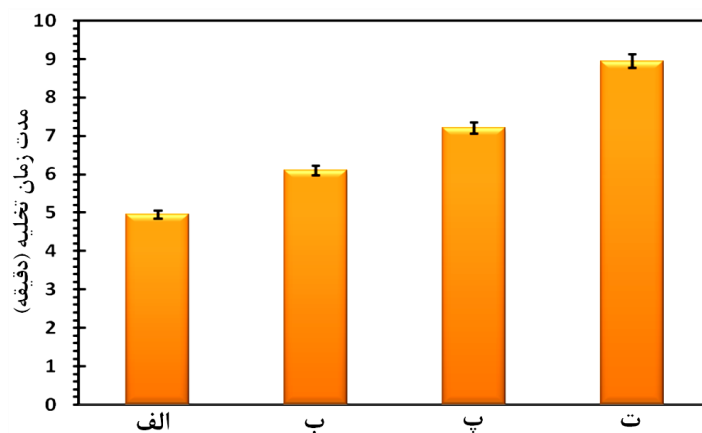
تخلخل ظاهری می‌شود. بهترین زمان تخلیه پیش از رسیدن به حداقل ولتاژ تعیین شده ۱/۱ ولت، ۸/۹۸ دقیقه بوده است. این زمان از الکتروکسید نقره تولید شده با فشار پرس ۶۰ بار به دست آمده است.

نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج حاصل از پژوهش دیگر محققان شباهت دارد. پیش از این هم تعدادی از محققان گزارش داده بودند که افزایش تخلخل باعث افزایش فعل و انفعالات و کاهش مقاومت پلاریزاسیون در مواد مختلف می‌شود [۱۷]. در تحقیقاتی که کاظمی و همکاران درباره تأثیر فشار پرس بر میزان تخلخل و مقاومت پلاریزاسیون سرامیک‌های اکسیدی زیرکونیوم-کربن صورت گرفته، گزارش شده که افزایش فشار پرس در فرایند تولید این سرامیک‌ها منجر به افزایش مقاومت پلاریزاسیون و کاهش توان خروجی آن‌ها خواهد شد که همین امر منجر به کاهش راندمان پیل‌های سوختی می‌شود [۱۸].

پارامتر مهم دیگر زمان است. تغییرات زمان تخلیه بر حسب فشار پرس به کاررفته در تولید الکترودهای اکسید نقره در شکل (۵) ترسیم شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش فشار پرس از ۴۰ به ۱۰۰ بار، زمان تخلیه افزایش یافته ولی در فشارهای پرس ۸۰ و ۱۰۰ بار نسبت به فشار پرس ۶۰ بار، زمان تخلیه کاهش یافته است. این امر به دلیل آن است که در فشارهای پرس بالا (۸۰ و ۱۰۰ بار)، میزان تخلخل‌های ظاهری الکترودها کاهش یافته و در نتیجه فعل و انفعالات بین الکتروکسید نقره، الکترولیز و الکتروکسید روی به درستی اتفاق نمی‌افتد. در فشار پرس بسیار پایین هم (۴۰ بار)، میزان تخلخل‌های ظاهری بسیار افزایش یافته و همین امر منجر به کاهش وزن الکترودها شده بود [۱۶]. در شکل (۵) دیده می‌شود که فشار پرس ۶۰ بار بهینه‌ترین فشار پرس برای تولید الکترودهای اکسید نقره بمنظور افزایش عمر پیل‌های روی-اکسید نقره است. یعنی فشار پرسی که منجر به ایجاد ۴۲ درصد



شکل (۴): نتایج آزمایش تخلیه الکتریکی برای باتری‌های حاوی الکتروکسید نقره تولید شده با فشار پرس: الف. ۴۰ بار، ب. ۶۰ بار، پ. ۸۰ بار، ت. ۱۰۰ بار.



شکل (۵): متوسط حداقل سه بار تکرارپذیری در آزمایش تعیین زمان تخلیه الکتریکی برای باتری‌های حاوی الکتروکسید نقره تولید شده با فشار پرس:

الف. ۴۰ بار، ب. ۶۰ بار، پ. ۸۰ بار، ت. ۱۰۰ بار.

## ۴. نتیجه گیری

افزایش میزان تخلخل واقعی و بسته در اثر افزایش فشار، کم بودن منافذ خروجی جهت خارج شدن این گازها از الکترودهای تولیدشده بود.

ت. آزمایش‌های تخلیه الکتریکی دلالت بر افزایش عمر (زمان تخلیه الکتریکی) پیل‌های روی-اکسید نقره در اثر افزایش فشار پرس به کاررفته در تولید الکترودهای اکسید نقره از ۴۰ به ۱۰۰ بار داشتند. همچنین نتایج آزمایش‌های تخلیه الکتریکی نشان داد که در بین فشارهای پرس ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ بار، بهینه‌ترین فشار پرس برای تولید الکترودهای اکسید نقره در روش تفجوشی، فشار ۶۰ بار است و در این فشار پرس، پیل‌های روی-اکسید نقره بالاترین زمان تخلیه الکتریکی را از خود نشان دادند.

الف. فشار پرس تأثیر بسزایی در ریزساختار و میزان تخلخل الکترودها دارد. مشاهدات میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که افزایش فشار پرس از ۴۰ به ۱۰۰ بار، اندازه و میزان تخلخل‌های ظاهری (راه به در) را در الکترودهای اکسید نقره کاهش می‌دهد.

ب. باتوجه به نتایج به دست آمده از آنالیز EDX، مشخص شد که هرچقدر میزان تخلخل ظاهری در الکترودهای اکسید نقره در اثر کاهش فشار پرس افزایش یافته، در عوض میزان کربن و اکسیژن آن کاهش می‌یابد.

پ. عامل افزایش میزان تخلخل‌های ظاهری در الکترودهای اکسید نقره در اثر کاهش فشار پرس، زیاد بودن منافذ خروجی برای خارج شدن گازهای منواکسید کربن و دی‌اکسید کربن بود. همچنین عامل

## مراجع

- [1] Habekost, A., "Experimental Investigations of Alkaline Silver-zinc and Copper-zinc Batteries", World Journal of Chemical Education, World Journal of Chemical Education, Vol. 4, No. 1, pp 4-12, 2016.
- [2] Marino, M., Misuri, L., Carati, A. and Brogioli, D., "Proof-of-Concept of a Zinc-Silver Battery for the Extraction of Energy from a Concentration Difference", Energies 2014, Vol. 7, pp. 3664-3683, 2014.
- [3] Ubelhor, R., Ellison, D., Pierce, C., "Enhanced Thermal Property Measurement of a Silver Zinc Battery Cell using Isothermal Calorimetry", Thermochemica Acta, Vol. 606, pp. 77-83, 2015.
- [4] Salkind, A. J., Karpinski, A. P., Serenyi, J. R., "Secondary batteries – zinc systems, Zinc-Silver", Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering, Vol. 14, pp. 513-523, 2009.
- [5] Senthilkumar, M., Satyavani, T. V. S. L., Srinivas Kumar, A., "Effect of Temperature and Charge Stand on Electrochemical Performance of Silver Oxide-Zinc Cell", Journal of Energy Storage, Volume 6, pp. 50-58, 2016.
- [6] Venkatraman, M., Van Zee, J. W., "A Model for the Silver-Zinc Battery During High Rates of Discharge", Journal of Power Sources, Vol. 166, No. 2, pp. 537-548, 2007.
- [7] ترابی، ف.، طباطبایی، ش.، روزبه عراقی، ا.، طباطبایی، س. م.، «تأثیر جنس سپراتور در عملکرد باتری‌های روی-اکسید نقره مورد استفاده در اژدرها»، دهمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران، تهران، ۱۳۸۹.
- [8] Kwak, W. J., Jung, H. G., Lee, S. H., Park, J. B., "Aurbach D., Suna Y.K., "Silver Nanowires as Catalytic Cathodes for Stabilizing Lithium-Oxygen Batteries", J. Power Sources, Vol. 311, pp. 49-56, 2016.
- [9] Braam, K. T., Volkman, S. K., Subramanian, V., "Characterization and Optimization of a Printed, Primary Silver-Zinc Battery", Journal of Power Sources, Vol. 199, No. 1, pp. 367-372, 2012.
- [10] Yan, Ch., Wang, X., Cui, M., Wang, J., Kang, W., Foo, C. Y., Lee, P. S., "Stretchable Silver-Zinc Batteries Based on Embedded Nanowire Elastic Conductors", Advanced Energy Materials, Vol. 4, No. 5, pp. 54-62, 2014.
- [11] Smith, D. F., Brown, C., "Aging in Chemically Prepared Divalent Silver Oxide Electrodes for Silver/Zinc Reserve Batteries", Journal of Power Sources, Vol. 96, No. 1, pp. 121-127, 2001.
- [12] ASTM B962-14, "Standard Test Methods for Density of Compacted or Sintered Powder Metallurgy (PM) Products Using Archimedes' Principle", ASTM International, West Conshohocken, PA, pp. 1-7, 2014.
- [13] Haghi, A. K., Oluwafemim O. S., Josem J. P., Mariam H. J., "Composites and Nanocomposites", Advances in Materials Science, Vol. 4, pp. 119-147, 2013.
- [14] Keller, K. A., Jefferson, G., Kerans, R. J., "Handbook of Ceramic Composites", Kluwer Academic Publishers, Vol. 4, pp. 377-421, 2005.
- [15] Karpinski, A. P., Russell, S. J., Serenyi, J. R., Murphy, J. P., "Silver Based Batteries for High Power Applications", Vol. 91, No. 1, pp. 77-82, 2000.
- [16] Suresh, P., Nagaraju, D. H., Shukla, A. K., Munichandraiah, N., "Analysis of Ac Impedance of AgO-Zn Cells: Effects of State-of-Charge, Temperature and Cycle-Life", Electrochimica Acta, Vol. 50, No. 16-17, pp. 3262-3272, 2005.
- [17] Roberge, P. A., "Handbook of Corrosion Engineering", 2<sup>th</sup> Edition, pp. 751 - 643, 2012.

## ارزیابی قابلیت افزایش عمر باتری‌های روی-نقره به‌وسیلهٔ بهینه‌سازی فشار پرس... ۵۱

کرین مورد استفاده در پیل‌های سوختی»، شانزدهمین کنگره ملی [۱۸] کاظمی، فرهاد، ممبینی، سارا، معظمی، هادی، «بررسی تأثیر فشار پرس خوردگی، تهران، آذر ۱۳۹۴. بر میزان تخلخل و مقاومت پلاریزاسیون سرامیک‌های زیرکونیوم-