

## بررسی مورفولوژی و خواص الکتریکی و الکتروشیمیایی پوشش طلا روی صفحات دوقطبی فلزی

### پیل سوختی

محمد مهدی برزگری<sup>۱\*</sup>، عادل محمدعلی تبار خوشرودی<sup>۲</sup>، مجتبی قدیمی<sup>۳</sup>، مجید صدیقی<sup>۳</sup>

۱ استادیار، آزمایشگاه تحقیقاتی فناوری پیل سوختی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، فریدونکنار، ایران

۲ کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

۳ پژوهشگر، آزمایشگاه تحقیقاتی فناوری پیل سوختی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، فریدونکنار، ایران

تاریخ دریافت:

۹۸/۰۹/۲۳

تاریخ پذیرش:

۹۸/۱۱/۱۴

پیل‌های سوختی غشا پلیمری به دلیل مزایایی همچون دمای عملکرد پایین، چگالی توان بالا و زمان راه‌اندازی پایین، نسبت به دیگر پیل‌های سوختی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. یکی از مهم‌ترین اجزای پیل سوختی پلیمری صفحات دوقطبی می‌باشد که شامل انواع مختلفی است. صفحات دوقطبی فلزی نسبت به صفحات دو قطبی کامپوزیتی پایه گرافیتی از مزایایی همچون استحکام بالا و ضخامت و وزن پایین‌تر برخوردارند. مقاومت به خوردگی و مقاومت تماسی بین سطوح صفحات دوقطبی فلزی یکی از چالش‌های صفحات دوقطبی فلزی می‌باشد. به همین دلیل، صفحات دوقطبی فلزی برای افزایش مقاومت به خوردگی و کاهش مقاومت تماسی تحت فرآیند پوشش‌دهی قرار می‌گیرند. در این پژوهش، خواص مورفولوژی پوشش طلا روی زیرلایه مسی و فولاد زنگ‌نزن با استفاده از روش‌های آبرکاری الکتریکی و اسپاترینگ مورد مطالعه قرار گرفت. بررسی مورفولوژی سطح نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی صورت گرفت. همچنین، به منظور بررسی مقاومت تماسی نمونه‌های پوشش داده‌شده و بدون پوشش، از آزمون مقاومت تماسی بین سطوح استفاده شد. مقاومت به خوردگی پوشش‌های اعمال شده با استفاده از آزمون‌های گالوانوستاتیک و پتانسیوستاتیک مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج بدست‌آمده نشان داد که استفاده از روش آبرکاری الکتریکی باعث ایجاد حفره‌ها و تخلخل‌های زیادی در سطح نمونه می‌شود. همچنین، مشخص شد که استفاده از روش اسپاترینگ به طور قابل توجهی موجب افزایش مقاومت به خوردگی و کاهش مقاومت تماسی می‌گردد.

پیل سوختی پلیمری، صفحات دوقطبی فلزی، پوشش‌دهی،

اسپاترینگ، آبرکاری الکتریکی

واژگان کلیدی

## Investigation of Morphology, Electrical and Electrochemical Properties of Gold Coating on Metallic Bipolar Plates of Fuel Cells

M. M. Barzegari<sup>1\*</sup>, A. Mohammadalitarbar khoshrodi<sup>2</sup>, M. Ghadimi<sup>3</sup>, M. Sedighi<sup>3</sup>

1. Assistant Professor, Fuel Cell Technology Research Laboratory, Malek Ashtar University of Technology, Fereydunkenar, Iran

2. M.Sc., Department of Materials Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

3. Researcher, Fuel Cell Technology Research Laboratory, Malek Ashtar University of Technology, Fereydunkenar, Iran

### Abstract

Polymer electrolyte membrane fuel cells have received more attention than other fuel cells because of their advantages such as low operating temperature, high power density and short startup time. One of the most important components of a polymer electrolyte membrane fuel cell is bipolar plate which has various types. Metallic bipolar plates have advantages such as higher strength, lower thickness and lower weight than graphite-based composite bipolar plates. Corrosion resistance and interfacial contact resistance of metallic bipolar plates are some of the challenges of using metallic bipolar plates. For this reason, metallic bipolar plates are coated to increase corrosion resistance and reduce contact resistance. In this study, the properties and morphologies of gold coating on copper and stainless steel substrates were studied by using electroplating and sputtering methods. The surface morphologies of the specimens were investigated by scanning electron microscopy. In addition, interfacial contact resistance tests were used to evaluate contact resistance of coated and uncoated specimens. Finally, corrosion resistances of the specimens were studied using galvanostatic and potentiostatic tests. The results showed that the use of electroplating method produces many holes and pores in the specimen surface. It was also found that using sputtering method significantly resulted in an increase in corrosion resistance and decrease in contact resistance of coated specimens.

### Keywords

Fuel Cell, Metallic bipolar plate, Coating, Sputtering, Electroplating

جدول علائم اختصاری

PEM	Polymer Electrolyte Membrane	پیل سوختی پلیمری
BPP	Bipolar Plate	صفحه دوقطبی
DOE	Department of Energy	انجمن انرژی
ICR	Interfacial Contact Resistance	مقاومت تماسی سطحی
PVD	Physical Vapor Deposition	رسوب فیزیکی بخار
XPS	X-ray Photoelectron Spectroscopy	طیف‌بینی فوتوالکترون پرتو ایکس
MS	Magnetron Sputtering	اسپاترینگ مغناطیسی
FESEM	Field Emission Scanning Electron Microscopy	میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی

۱- مقدمه

با افزایش قیمت نفت و افزایش نگرانی‌های محیط زیست، فناوری پیل‌های سوختی توسعه قابل توجهی یافته است. فناوری پیل سوختی در مقایسه با موتورهای احتراق داخلی، پاک‌تر، دارای بازده بالاتر و صدای کم‌تر می‌باشد. پیل‌های سوختی پلیمری با توجه به دمای کاری پایین و راه‌اندازی سریع به عنوان یکی از مطمئن‌ترین انواع پیل‌های سوختی برای کاربردهای ثابت و حمل‌ونقل در نظر گرفته می‌شود [۱].

پیل سوختی پلیمری یک مولد انرژی است که گازهای هیدروژن و اکسیژن را بطور مستقیم به برق تبدیل می‌کند و آب و حرارت به عنوان تنها محصول جانبی آن است. پیل‌های سوختی در کشتی‌ها، اتوبوس‌ها، خودروها، هواپیماها و همچنین به عنوان منبع تامین نیروی برق کاربرد دارند [۲].

پیل سوختی پلیمری از صفحات دوقطبی، صفحات جمع‌کننده جریان، صفحات انتهایی و مجموعه غشا و الکتروود تشکیل شده است. صفحات دوقطبی از اجزای مهم پیل سوختی پلیمری به‌شمار می‌آیند و چندین وظیفه کلیدی بر عهده دارند. با توجه به نقش موثر صفحات دوقطبی بر کاهش حجم، وزن و هزینه پیل سوختی، تعیین جنس مناسب برای صفحات دوقطبی اهمیت بسزایی خواهد داشت. صفحات دوقطبی می‌توانند از جنس‌های گوناگون ساخته شوند، مانند صفحات فلزی با پوشش یا بدون پوشش، کامپوزیت کربن-پلیمر و کامپوزیت کربن-کربن [۳].

صفحات دوقطبی که جزء اصلی اجزای پیل‌های سوختی PEM هستند، بیش از ۸۰٪ از وزن و حجم و ۳۰٪ از کل هزینه پیل‌های سوختی را تشکیل می‌دهند. صفحات دوقطبی شامل وظایف متعددی از قبیل جداسازی سلول‌ها در پیل سوختی، اتصال کاتد یک پیل به سمت آند پیل دیگر با هدایت الکتریکی خوب، تغذیه واکنش دهنده گازهای جانبی به سمت آند (گاز هیدروژن) و سمت کاتد (گاز اکسیژن)

و خنک‌کاری پیل سوختی را بر عهده دارند. از این‌رو، هدایت الکتریکی بالا، استحکام مکانیکی و مقاومت در برابر خوردگی مناسب و هزینه تولید کم برای صفحات دوقطبی مورد نیاز است [۴]. براساس معیارهای دپارتمان انرژی، خصوصیات صفحات دوقطبی باید به شرح جدول ۱ باشد [۴].

صفحات دوقطبی گرافیتی به دلیل مقاومت در برابر خوردگی و پایداری شیمیایی عالی، هدایت حرارتی بالا و در دسترس بودن، در پیل‌های سوختی بکار برده می‌شوند، اما به دلیل نوع ساختار مولکولی گرافیت، دارای خواص مکانیکی ضعیف و هزینه تولید بالا می‌باشند. گرافیت به عنوان ماده معیار برای ساخت صفحات دوقطبی شناخته شده است که مواد دیگر با آن مقایسه می‌شوند. با این وجود، برای کاربردهای حمل و نقل (که نیاز به استحکام کافی در برابر شوک و لرزش دارند) و یا برای تولید انبوه مناسب نمی‌باشند. با توجه به عدم امکان کاهش ضخامت صفحات گرافیتی، حجم و وزن پیل سوختی با صفحات دوقطبی گرافیتی بالا می‌باشد. در نتیجه، مطالعات اخیر در راستای توسعه و بهینه‌سازی مواد مقرون به صرفه مانند فلزات و کامپوزیت‌ها می‌باشد. مواد فلزی به دلیل استحکام مکانیکی خوب، هدایت الکتریکی بالا، عدم نفوذپذیری بالای گاز، هزینه کم و سهولت در ساخت، انتخاب دیگری برای صفحات دوقطبی است. بیشترین مزیت صفحات دوقطبی فلزی کاهش حجم و وزن پیل سوختی و کاهش هزینه برای تعداد بالا می‌باشد [۴].

تعدادی از مواد فلزی از جمله آلومینیوم، فولاد زنگ‌نزن، تیتانیوم، نیکل و آلیاژ مس به عنوان صفحات دوقطبی توسط محققان مختلف مورد بررسی قرار گرفته است [۵]. با این حال، فولاد زنگ‌نزن تنها ماده‌ای است که توجه زیادی را در شرایط پوشش داده شده و حتی بدون پوشش به خود اختصاص داده است. با این وجود، مقاومت تماسی صفحات دوقطبی مسی در حالت بدون پوشش نسبت به صفحات دوقطبی فولاد زنگ‌نزن بدون پوشش پایین‌تر می‌باشد. برخی از

جدول ۱: خصوصیات صفحات دوقطبی طبق معیار دپارتمان انرژی [۴].

مقدار مطلوب	واحد	مشخصه
<۱۰	mΩ. cm <sup>2</sup>	مقاومت تماسی در فشار ۰/۶ مگاپاسکال
<۱۶	μA. cm <sup>-2</sup>	خوردگی سمت آند
<۱۶	μA. cm <sup>-2</sup>	خوردگی سمت کاتد



صفحات دوقطبی فلزی پیل سوختی استفاده شود [۶]. طلا به عنوان ماده پوششی بر روی فولاد زنگ‌نزن به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است و برخی از محققان پیشنهاد کردند که پوشش‌دهی صفحات دوقطبی با لایه‌ای از طلا با ضخامت چند میکرون، می‌تواند راه حل مناسبی به منظور جلوگیری از خوردگی و کاهش مقاومت تماسی باشد. پوشش طلا به دلیل دارا بودن خواص منحصر به فرد و هدایت الکتریکی بالا برای استفاده به عنوان صفحات دوقطبی و صفحات جمع‌کننده جریان پیل سوختی پلیمری مناسب می‌باشد [۶].

یانگ و همکاران [۹] تاثیر پوشش‌دهی طلا روی مقاومت الکتریکی و پایداری شیمیایی صفحات دوقطبی فولاد زنگ‌نزن L316 در پیل سوختی پلیمری را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها عملیات الکتروپولیش را توسط محلول  $H_2SO_4$  و  $H_3PO_4$  در دماهای ۷۰ تا ۱۱۰ درجه سانتیگراد انجام دادند. سطح صفحه فولاد زنگ‌نزن در ابتدا الکتروپولیش شده و سپس با یک لایه طلا و یک لایه تیتانیوم و نیکل با استفاده از روش تبخیر پرتو الکترونی پوشش‌دهی گردید. صفحات فولاد زنگ‌نزن پوشش داده شده با طلا در مقایسه با سطح صفحات بدون پوشش، دارای مورفولوژی صاف و یکنواخت بوده و مقاومت الکتریکی صفحات دوقطبی پوشش داده شده به شدت کاهش می‌یابد. نتایج XPS نشان می‌دهد لایه‌های پوشش پس از قرار گرفتن در محلول  $H_2SO_4$ ، پایداری شیمیایی بسیار خوبی را نشان می‌دهند. وی و همکاران [۱۰] تخریب عملکرد صفحات دوقطبی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ بدون پوشش و فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ با پوشش طلا در پیل‌های سوختی دما بالا را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که میزان تخریب عملکردی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ بدون پوشش بیشتر از فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ با پوشش طلا است. بهرامی‌پور و همکاران [۱۱] هدایت الکتریکی و مورفولوژی پوشش طلا بر روی صفحات دوقطبی پیل سوختی با استفاده از روش اسپاترینگ را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به منظور ارزیابی میزان هدایت الکتریکی نمونه‌های پوشش داده شده، مقاومت الکتریکی قطعات پوشش داده شده را اندازه‌گیری نمودند. همچنین، مورفولوژی و ریزساختار سطحی نمونه‌ها را نیز به ترتیب با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی و میکروسکوپ نیروی اتمی مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که مورفولوژی نمونه‌های پوشش داده شده به صورت هموار روی سطح بوده و هدایت الکتریکی نمونه‌ها به طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد.

شین و همکاران [۱۲] در یک پژوهش، پلیمرهای رسانای پلی‌انیلین و پلی‌پایرول را روی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ با استفاده از روش الکتروشیمیایی پوشش‌دهی کرده و عملکرد آن را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای پلیمریزاسیون و رسوب این پلیمرها از ولتاژتری چرخه‌ای استفاده نمودند. صفحات فولاد زنگ‌نزن با پوشش پلیمر جهت بررسی خصوصیات پوشش مورد استفاده در شرایط عملکردی پیل سوختی پلیمری مورد آزمایش قرار گرفتند که نتایج حاکی از مقاومت به خوردگی و مقاومت تماسی قابل قبول بوده است. کی‌فنگ

محققان گزارش کرده‌اند که حتی در مواد فلزی مقاوم در برابر خوردگی نیز برخی یون‌های حاصل از خوردگی مواد فلزی به غشا نفوذ کرده و عملکرد غشا را تضعیف می‌نماید. علاوه بر این، هر لایه خوردگی که صورت می‌گیرد، هدایت الکتریکی صفحات دوقطبی را کاهش داده و از این طریق باعث افزایش مقاومت تماسی بین سطوح می‌شود [۵].

دمای کاری پیل سوختی (حدود ۸۰ درجه سانتی‌گراد) و pH آن (بین ۲ تا ۳) موجب می‌شود تا استفاده از صفحات دوقطبی با جنس فولاد زنگ‌نزن بدون پوشش مناسب نباشد. با توجه به شرایط کاری پیل سوختی، عناصر آلیاژی فولاد زنگ‌نزن به طور آهسته از سطح جدا شده و می‌توانند موجب تخریب کاتالیست و مسمومیت مجموعه غشا و الکتروود شوند [۶]. علاوه بر این، تحت شرایط عملکردی پیل سوختی، یک لایه غیرفعال روی سطح فولاد ضد زنگ ایجاد شده که در برابر خوردگی مقاوم می‌باشد، اما مقاومت تماسی بالایی دارد و به همین دلیل نیازمند پوشش‌دهی جهت کاهش مقاومت تماسی می‌باشد [۶].

فولاد زنگ‌نزن یکی از انتخاب‌های امیدوارکننده برای استفاده به عنوان صفحات دوقطبی پیل سوختی محسوب می‌شود. فولاد زنگ‌نزن به دلیل تشکیل یک فیلم غیر متخلخل روی سطح می‌تواند از خوردگی جلوگیری نماید. ضخامت فیلم غیر متخلخل به طور معمول در محدوده ۱-۳ نانومتر است. ضخامت و ترکیب فیلم غیرمتخلخل به ترکیب فولاد زنگ‌نزن و محیط اطراف (مانند مقدار pH)، پتانسیل کاربردی و یون‌های موجود در محلول بستگی دارد. اگرچه فیلم غیرمتخلخل می‌تواند میزان خوردگی فولاد زنگ‌نزن را کاهش دهد، اما میزان ICR افزایش می‌یابد [۴]. تاثیر خوردگی صفحات دوقطبی از جنس فولاد زنگ‌نزن L316 بر عملکرد پیل سوختی پلیمری توسط میازلوا و همکاران مورد بررسی قرار گرفت [۷]. نتایج این تحقیق نشان داد که پس از ۳۰۰ ساعت به دلیل خوردگی و تشکیل لایه غیرفعال، پیل سوختی افت عملکرد قابل ملاحظه‌ای داشته است.

یکی از پارامترهای مهم در طراحی پیل سوختی پلیمری مقاومت تماسی بین سطوح می‌باشد که باعث اتلاف مقدار زیادی انرژی در پیل‌های سوختی پلیمری می‌شود. مقاومت تماسی به پارامترهای متعددی از قبیل خواص مواد، توپولوژی سطح، فشار مهار و شرایط کاری پیل سوختی پلیمری وابسته می‌باشد. فشار مهار زیاد منجر به افزایش سطح تماس بین صفحات دوقطبی و لایه نفوذ گاز می‌شود که این امر باعث کاهش مقاومت تماسی می‌گردد. همچنین، فشار مهار بیش از حد مجاز نیز باعث فشردگی زیاد و کاهش تخلخل لایه نفوذ گاز می‌شود که این امر منجر به افزایش مقاومت جریان انتقال سیال می‌شود. بنابراین، مطالعه رفتار تماسی بین اجزای پیل سوختی پلیمری از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد [۸].

برای بهبود مقاومت در برابر خوردگی و هدایت الکتریکی فلز پایه، چندین نوع پوشش و فرآیند پوشش‌دهی پیشنهاد شده است. یکی از این مواد طلا (Au) می‌باشد که به علت هدایت الکتریکی بالا و مقاومت در برابر خوردگی، می‌تواند به‌عنوان یک پوشش مناسب برای

برابر خوردگی و هدایت الکتریکی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که خوردگی SS304/Ti<sub>2</sub>N/TiN عمدتاً از مرزخانه آغاز می‌شود و پوشش چندلایه Ti<sub>2</sub>N/TiN لایه محافظ خوبی در برابر خوردگی فولاد زنگ‌نزن را فراهم می‌کند.

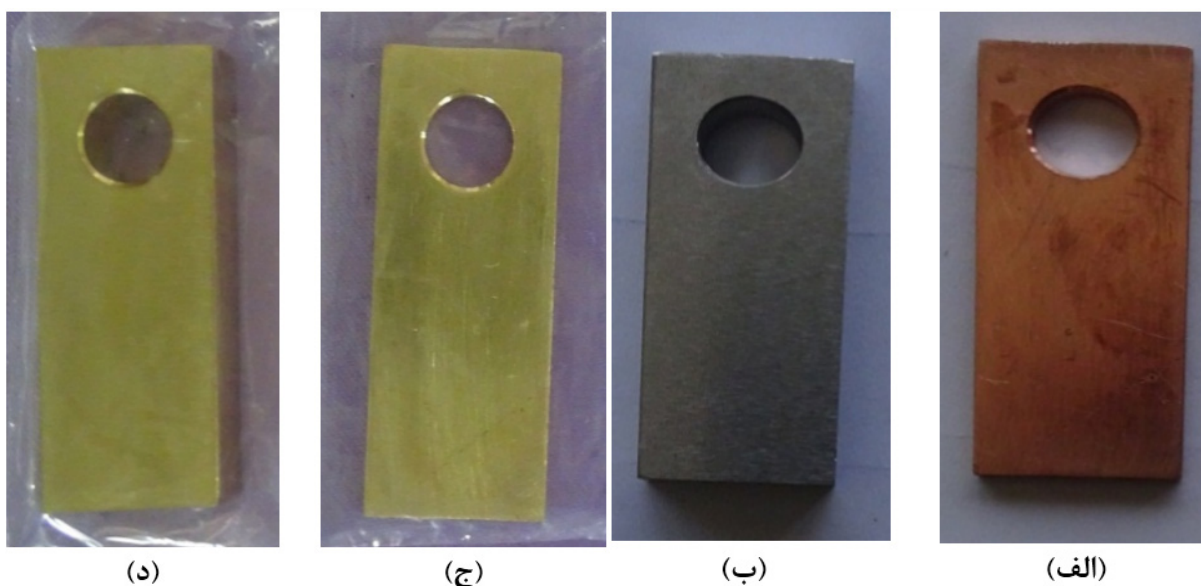
یان‌وانگ و همکاران [۳] فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ با پوشش TiN با استفاده از روش رسوب فیزیکی بخار را به عنوان صفحات دوقطبی برای پیل سوختی پلیمری مورد مطالعه قرار دادند. نتایج بدست‌آمده از آزمون‌های پتانسیودینامیک و امپدانس الکتروشیمیایی برای این پوشش نشان داد که مقاومت به خوردگی فولاد زنگ‌نزن در محلول H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> و در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. پارک و همکاران [۱۶] به بررسی مقاومت الکتریکی تماسی و مقاومت به خوردگی فولاد زنگ‌نزن L316 با پوشش قلع-روی دوپه شده با فلئور پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که مقاومت الکتریکی تمامی نمونه‌ها با افزایش فشار اعمالی در فشارهای کم به سرعت کاهش و در فشارهای بالا به تدریج به حالت پایدار رسیدند. همچنین، نتایج آزمون خوردگی پتانسیودینامیک در محیط شبیه‌سازی شده پیل سوختی نشان داد که این پوشش دارای کمترین چگالی جریان خوردگی می‌باشد. شو و همکاران [۱۷] در یک پژوهش عملکرد آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲ و فولاد زنگ‌نزن L316 را در مقایسه با گرافیت مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، جهت پوشش‌دهی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲ با روش رسوب بخار فیزیکی از پوشش فیلم الماس YZU001 استفاده گردید. نتایج نشان داد که صفحات دوقطبی آلومینیوم ۵۰۵۲ و فولاد زنگ‌نزن L316 با پوشش PVD بهتر از ماده گرافیتی در ولتاژ پایین بوده ولی طول عمر کمتری دارند.

یی و همکاران [۱۸] مقاومت به خوردگی و مقاومت تماسی نانو لایه TiC/a-C را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این بررسی نشان داد که

و همکاران [۱۳] در تحقیقی پوشش‌های چند لایه C/CrN روی نمونه‌های فولادی زنگ‌نزن L316 را توسط روش آبکاری یونی و اسپاترینگ مغناطیسی ایجاد کرده و مورفولوژی سطحی و خواص خوردگی و الکتریکی آن را بررسی نمودند. نتایج SEM پیوسته و متراکم بودن پوشش‌های C/CrN روی سطح را نشان می‌داد. همچنین، فیلم پوشش داده شده با ضخامت ۸۰۰ نانومتر دارای مقاومت در برابر خوردگی بسیار مناسبی بوده است.

اویارک و همکاران [۱۴] در تحقیقی به بررسی عملکرد پیل سوختی در شرایط شبیه‌سازی شده و شرایط عملیاتی پیل سوختی با استفاده از صفحات دوقطبی فولاد زنگ‌نزن L316 بدون پوشش و پوشش داده شده با طلا پرداختند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که مقاومت الکتریکی صفحه دوقطبی پوشش داده شده با طلا و همچنین صفحه گرافیتی در طول زمان با تغییر فشار اعمالی تقریباً ثابت بوده است، در حالی که مقاومت الکتریکی صفحه بدون پوشش بسیار بیشتر از صفحات با پوشش است. همچنین، به علت هدایت الکتریکی کمتر فولاد زنگ‌نزن بدون پوشش، با افزایش فشار اعمالی، مقاومت سطحی کاهش می‌یابد. بررسی عملکرد پیل سوختی توسط آزمون پلاریزاسیون نیز نشان داد که پیل حاوی صفحه دوقطبی فولاد زنگ‌نزن L316، دارای بیشترین افت ولتاژ و کمترین بازده توان است، در حالی که پیل حاوی صفحه دوقطبی فولاد زنگ‌نزن پوشش داده شده با طلا دارای عملکرد مطلوب است. در تحقیقی دیگر کومار و همکاران [۶] به بررسی خواص خوردگی و هدایت الکتریکی فولاد زنگ‌نزن L316 با پوشش نانومتری طلا پرداختند.

روست و همکاران [۱۵] رفتار صفحات دوقطبی فولاد زنگ‌نزن با پوشش TiN را برای پیل سوختی پلیمری مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی، مقاومت زیرلایه پوشش داده شده به روش اسپاترینگ در



شکل ۱: نمونه فولاد زنگ‌نزن نمونه بدون پوشش و پوشش داده شده با طلا جهت انجام آزمون خوردگی؛ (الف) نمونه مسی (ب) نمونه فولاد زنگ‌نزن L316 (ج) نمونه مسی پوشش داده شده (د) نمونه فولاد زنگ‌نزن L316 پوشش داده شده

شکل مکعب مستطیل با ابعاد  $2 \times 5$  سانتی متر مربع و با ضخامت‌های ۵ میلی‌متر برای نمونه مسی و ۱۰ میلی‌متر برای نمونه فولاد زنگ‌نزن ساخته شد (شکل ۱ الف) و شکل ۱ ب)). همچنین، نمونه آزمون مقاومت تماسی به ابعاد  $4 \times 4$  سانتیمتر مربع و با ضخامت‌های ۵ میلی‌متر برای مس و ۱۰ میلی‌متر برای فولاد زنگ‌نزن ساخته شد. سپس عملیات متالوگرافی با استفاده از کاغذ سمباده از مش ۳۲۰ تا ۶۰۰ و در نهایت با استفاده از اتانول و آب مقطر انجام شد.

## ۲-۲- پوشش‌دهی زیرلایه

به منظور پوشش‌دهی طلا روی زیرلایه‌ها از دوروش آبرکاری الکتریکی و اسپاترینگ استفاده شد. در روش آبرکاری، برای افزایش چسبندگی پوشش به زیرلایه، ابتدا از پوشش نیکل استفاده شد. ضخامت پوشش طلا و نیکل به ترتیب  $100 \text{ nm}$  و  $7/5 \mu\text{m}$  است. برای آبرکاری الکتریکی طلا قطب منفی منبع تغذیه (کاتد) را به نمونه مورد نظر برای آبرکاری و قطب مثبت منبع تغذیه (آند) را به قطعه‌ای از طلای ۲۴ عیار متصل کرده و در حمام سولفیدی قرار داده می‌شود. سپس ولتاژ  $2/5$  ولت به کمک منبع تغذیه به نمونه اعمال گردید. همچنین، مدت زمان پوشش‌دهی ۱ دقیقه در چگالی جریان  $0/3 \text{ A/dm}^2$  و در دمای  $60$  درجه سانتی‌گراد انتخاب شد. علاوه بر این، پوشش طلا با ضخامت  $100$  نانومتر روی نمونه‌های مورد نظر با استفاده از روش اسپاترینگ مغناطیسی نیز ایجاد شد. به منظور افزایش چسبندگی پوشش به زیرلایه و همچنین به منظور مقاومت به خوردگی در برابر اسید سولفوریک، پوشش Ti به عنوان اولین لایه انتخاب گردید. نمونه‌ها پیش از پوشش‌دهی توسط استون و اتانول تمیزکاری شده و در دستگاه اسپاترینگ قرار داده شدند. سپس، نمونه‌ها با وارد کردن گاز آرگون به محفظه تحت ولتاژ  $320 \text{ V}$  برای پوشش Ti و  $335 \text{ V}$  برای پوشش طلا و جریان  $108 \text{ mA}$  به مدت زمان  $300$  ثانیه برای Ti و  $420$  ثانیه برای طلا در خلا به میزان  $2 \times 10^{-6} \text{ torr}$  تحت عملیات پوشش‌دهی قرار گرفتند. نمونه‌های پوشش‌دهی شده دارای لایه‌هایی از پوشش تیتانیوم و طلا با ضخامت‌های به ترتیب برابر با  $400 \text{ nm}$  و  $100 \text{ nm}$  می‌باشد. نمونه‌های پوشش‌دهی شده در شکل ۱ ج) و شکل

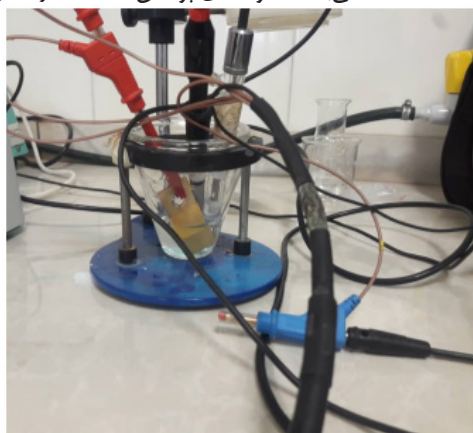
مقاومت به خوردگی و هدایت سطحی پوشش‌های TiC/a-C دارای افزایش چشمگیری می‌باشد. یی و همکاران [۱۹] در پژوهش دیگری پوشش‌های TiN و ZrN را با استفاده از روش اسپاترینگ روی سطح فولاد زنگ‌نزن L316 نشانده و مقاومت به خوردگی و مقاومت تماسی آن را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که پوشش TiN و ZrN می‌تواند مقاومت به خوردگی فولاد زنگ‌نزن L316 را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. همچنین، منحنی‌های پلاریزاسیون نشان می‌دهد که پوشش TiN مقاومت به خوردگی بهتری نسبت به پوشش ZrN دارد.

در این پژوهش، بررسی مورفولوژی سطح نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی صورت گرفت. همچنین، به منظور بررسی مقاومت تماسی بین سطوح نمونه‌های پوشش داده‌شده و بدون پوشش، از آزمون مقاومت تماسی بین سطوح استفاده شد. مقاومت به خوردگی پوشش‌های اعمال شده نیز با استفاده از آزمون‌های الکتروشیمیایی تافل و کرنوآمپرومتری مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین، مقایسه جامعی بین این روش‌ها از نقطه نظر مقاومت به خوردگی، مقاومت الکتریکی و نیز مورفولوژی پوشش در شرایط کاری پیل سوختی صورت گرفته است. برای نوآوری این پژوهش نسبت به پژوهش‌های پیشین می‌توان به سه مورد اشاره نمود: ۱) استفاده از صفحات مسی به عنوان زیرلایه صفحات دوقطبی پیل سوختی، ۲) مقایسه پوشش‌دهی طلا روی زیرلایه‌های فولاد زنگ‌نزن و مس از نقطه‌نظر مورفولوژی سطح، خواص الکتریکی و خواص خوردگی و ۳) مقایسه روش‌های پوشش‌دهی آبرکاری الکتریکی و اسپاترینگ روی زیرلایه‌های فولاد زنگ‌نزن و مس از نقطه‌نظر مورفولوژی سطح، خواص الکتریکی و خواص خوردگی که تا کنون در هیچ پژوهشی مورد بررسی قرار نگرفته است.

## ۲- مواد و روش تحقیق

### ۲-۱- آماده‌سازی زیرلایه

در این پژوهش، زیرلایه‌های فولاد زنگ‌نزن L316 و آلیاژ مس مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌های بدون پوشش جهت آزمون خوردگی به



شکل ۲: تصویر ستاپ تست خوردگی شرکت اتولب



(د) نمایش داده شده است.

### ۳-۲- بررسی خواص سطحی

در این پژوهش، به منظور مشاهده و ارزیابی مورفولوژی و ریز ساختار سطح، نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل MIRA3TESCAN-XMU مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین، رفتار خوردگی پوشش‌های اعمال شده توسط آزمون پلاریزاسیون Tafel و آزمون کرومپرومتری با استفاده از دستگاه پتانسیوستات اتولب مدل PGSTAT12 در محلول شبیه‌سازی شده پیل سوختی (اسید سولفوریک ۱ مولار ۱ ppm HF) مورد بررسی قرار گرفتند که در شکل ۲ نشان داده شده است. الکترومد مرجع از نوع کالومل اشباع، الکترومد کمکی از جنس پلاتین و نمونه پوشش داده شده به عنوان الکترومد کاری، یک سیستم الکتروشیمیایی سه الکترومد را جهت انجام آزمون Tafel تشکیل دادند. نمونه‌ها ابتدا در پتانسیل مدار باز جهت رسیدن به حالت پایدار به مدت ۱۵ دقیقه قرار گرفتند. سپس، پتانسیل از مقدار ۰/۴۵- تا ۰/۳ ولت نسبت به پتانسیل مدار باز با نرخ ۱۰ میلی‌ولت بر ثانیه اسکن شد.

به منظور اندازه‌گیری مقاومت تماسی بین سطوح نیز از میلی‌اهم‌تر دقیق GW INSTEK مدل GOM-801H با دقت ۰/۰۱ میلی‌اهم و از دستگاه کشش و فشار سنتام با ظرفیت ۲۰ کیلونیوتن استفاده گردید که در شکل ۳ نشان داده شده است. ستاپ تست مقاومت تماسی نیز شامل یک جفت پلکسی‌گلس، یک جفت صفحات جمع‌کننده جریان از جنس طلا، لایه نفوذ گاز و نمونه مورد نظر می‌باشد. برای محاسبه مقاومت تماسی از دو ستاپ مجزا استفاده شد. در ستاپ اول (شکل ۴الف)) بین دو صفحه جمع‌کننده جریان یک لایه نفوذ گاز قرار می‌گیرد و در ستاپ دوم (شکل ۴ب)) بین دو صفحه جمع‌کننده جریان دو لایه نفوذ گاز و مابین آن‌ها نمونه مورد نظر قرار می‌گیرد. مقاومت تماسی بین نمونه و لایه نفوذ گاز با استفاده از روابط زیر به دست می‌آید [۲۰].

$$R_1 = 2R_{ct} + 2R_{GDL-G} \quad (1)$$

$$R_2 = 2R_{GDL-G} \quad (2)$$

$$R_{ct} = \frac{R_1 - R_2}{2} \quad (3)$$

که در این رابطه  $R_{ct}$  مقاومت تماسی بین نمونه و لایه نفوذ گاز،  $R_1$  مقاومت مجموعه اول،  $R_2$  مقاومت مجموعه دوم و همچنین  $R_{GDL-G}$  مقاومت تماسی بین لایه نفوذ گاز و صفحه طلا می‌باشد. در رابطه ۱ از نصف مقاومت داخلی لایه نفوذ گاز و نصف مقاومت داخلی نمونه صرف‌نظر شده است.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی مورفولوژی توسط SEM

شکل ۵الف) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مورفولوژی سطحی نمونه فولاد زنگ‌نزن بعد از اعمال پوشش به روش آبکاری الکتریکی را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است، پوشش‌ها دارای تخلخل‌هایی در نقاط مختلف می‌باشند. شکل ۵ب) تصویر FESEM از نمونه فولاد زنگ‌نزن پوشش داده شده به روش اسپاترینگ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است که میزان حفره و تخلخل در این روش تا حد زیادی کاهش یافته است. شکل ۵ج) و شکل ۵د) نیز به ترتیب مربوط به مورفولوژی سطحی نمونه مسی پوشش داده شده به روش آبکاری و روش اسپاترینگ می‌باشد. بر اساس شکل ۵ج)، پوشش دارای حفره‌ها و تخلخل‌های فراوانی در سطح خود می‌باشد. همچنین، تعداد تخلخل‌ها در نمونه مسی نسبت به نمونه فولاد زنگ‌نزن بیشتر است. همان‌طور که در شکل ۵د) مشخص است، در این روش تخلخل روی سطح به مراتب کمتر از روش پوشش‌دهی آبکاری می‌باشد.

#### ۳-۲- بررسی مقاومت تماسی

به منظور بررسی تاثیر روش‌های اعمال پوشش طلا بر روی صفحات دوقطبی، مقاومت تماسی نمونه‌های پوشش داده شده اندازه‌گیری شده و با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج این آزمون در شکل ۶ برای نمونه‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، مقاومت تماسی در تمامی نمونه‌ها با افزایش فشار اعمالی به دلیل ایجاد نقاط تماسی بیشتر کاهش می‌یابد. در بین نمونه‌ها، کمترین مقاومت تماسی مربوط به فولاد زنگ‌نزن با پوشش اسپاترینگ طلا می‌باشد. همچنین، بیشترین کاهش مقاومت تماسی با افزایش فشار اعمالی مربوط به فولاد زنگ‌نزن بدون پوشش است، در حالی که برای نمونه‌های پوشش داده شده، تغییر مقاومت تماسی با افزایش فشار اعمالی با شیب بسیار ملایمی اتفاق می‌افتد که این امر حاکی از اثر قابل توجه پوشش طلا در کاهش میزان مقاومت تماسی می‌باشد.

جدول ۲ مقاومت تماسی نمونه‌های مختلف در فشار ۰/۶ و ۱/۴ مگاپاسکال را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج اخذ شده، مقاومت تماسی نمونه‌های پوشش داده شده توسط روش اسپاترینگ و آبکاری الکتریکی کمتر از  $10 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$  بوده که طبق معیار انجمن انرژی آمریکا می‌تواند پوشش مناسبی جهت استفاده در صفحات دوقطبی فلزی باشد. با مقایسه نمونه‌های مختلف مشاهده می‌شود در فشار ۱/۴ مگاپاسکال، فولاد زنگ‌نزن پوشش داده شده

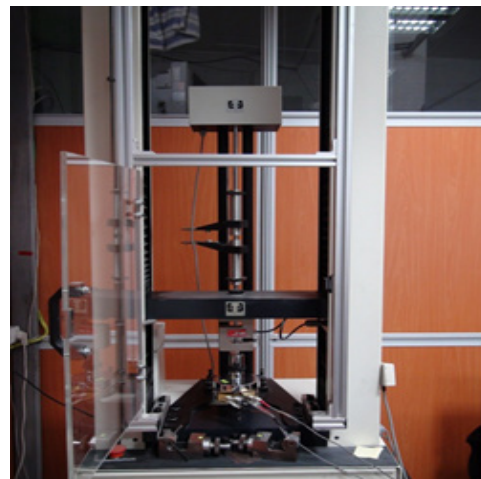
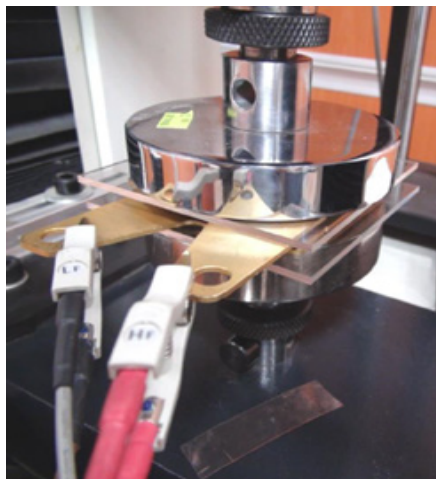
می‌شود. تخلخل یکی از مهم‌ترین منابع ناپیوستگی در سطح است. ترک‌های ناشی از تنش بالای داخلی یا تنش‌های حرارتی فرآیند تولید، دیگر منابع به‌وجود آمدن ناپیوستگی بر روی سطح می‌باشند. تخلخل‌ها می‌تواند موجب نفوذ عوامل خوردنده به زیرلایه و کاهش خواص مکانیکی و الکتریکی قطعه شوند. در پوشش‌دهی فلزات نجیب مانند طلا، تخلخل نقش مهمی در خواص فیزیکی پوشش دارد. در این پوشش‌ها تخلخل اجازه تشکیل لکه‌ها و محصولات خوردگی در مرز پوشش و زیرلایه را می‌دهد.

پوشش طلا نسبت به زیرلایه‌های فولاد زنگ‌نزن و مسی از لحاظ الکتروشیمیایی نجیب‌تر است و در تماس با محیط خوردنده بعنوان فداشونده عمل نمی‌کند، بلکه همانند سدی است که بین زیرلایه و محیط خوردنده قرار می‌گیرد و اجازه نفوذ محلول خوردنده را نمی‌دهد. بنابراین، تخلخل‌های موجود در پوشش‌های طلا نقش اساسی در رفتار خوردگی آن‌ها دارند. چرا که آن دسته از نواحی زیرلایه مسی که در اثر وجود تخلخل در تماس با محیط خوردنده قرار می‌گیرند به عنوان نواحی آندی کوچک موجود در کوپل گالوانیک ایجاد شده عمل کرده و در اثر وجود نواحی کاتدی بزرگ پوشش طلا به شدت خورده می‌شود. خوردگی و اکسیداسیون زیر لایه مسی باعث جدایش و عدم اتصال بین پوشش اعمالی و زیرلایه گردیده که به دنبال آن پوشش از زیرلایه جدا می‌شود. رفتار خوردگی پوشش طلا به دو عامل میزان تخلخل و همچنین ضخامت پوشش وابسته

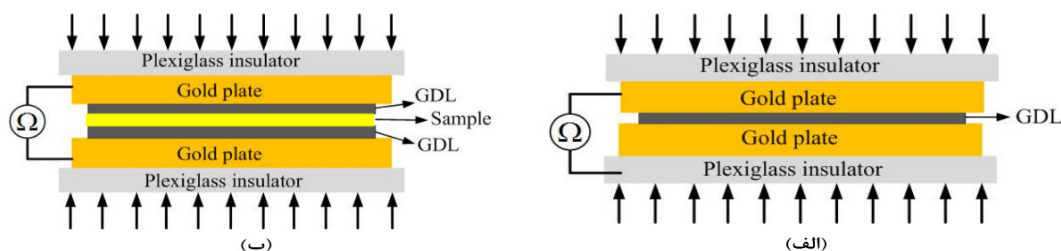
با طلا به روش اسپاترینگ با مقدار  $2/15 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$  از کمترین مقاومت تماسی برخوردار است که علت این پدیده تخلخل کم‌تر نسبت به روش آبرکاری الکتریکی می‌باشد. علاوه بر این، فولاد زنگ‌نزن بدون پوشش به علت تشکیل فیلم غیر فعال روی سطح از مقاومت تماسی بیشتری ( $52/35 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ ) نسبت به سایر نمونه‌ها برخوردار است.

### ۳-۳- آزمون‌های الکتروشیمیایی

شکل ۷ منحنی‌های پلاریزاسیون تافل صفحات مسی و فولاد زنگ‌نزن پوشش داده شده با روش‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۷ ملاحظه می‌شود تمامی پوشش‌ها دارای رفتار خوردگی فعال می‌باشند. با اعمال پوشش طلا با روش‌های آبرکاری الکتریکی و اسپاترینگ، مقاومت به خوردگی زیرلایه مسی به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. داده‌های مرتبط با چگالی جریان خوردگی و پتانسیل خوردگی نمونه‌های مختلف در جدول ۳ ارائه شده است، برای نمونه فولاد زنگ‌نزن پوشش داده شده با روش آبرکاری الکتریکی، چگالی جریان خوردگی اندکی افزایش می‌یابد. علاوه بر این، پوشش طلا به روش اسپاترینگ دارای چگالی جریان خوردگی کمتری نسبت به پوشش طلا به روش آبرکاری است. دلیل این امر را می‌توان اینگونه توجیه کرد که وجود تخلخل بیشتر در روش آبرکاری باعث افزایش چگالی جریان خوردگی



شکل ۳: ستاپ آزمایشگاهی آزمون مقاومت تماسی

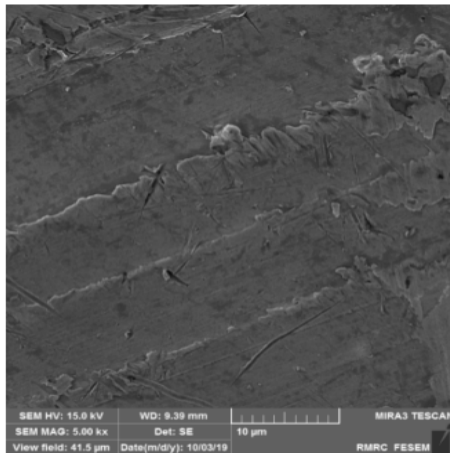


شکل ۴: شماتیک ستاپ آزمون مقاومت تماسی (الف) مجموعه اول و (ب) مجموعه دوم

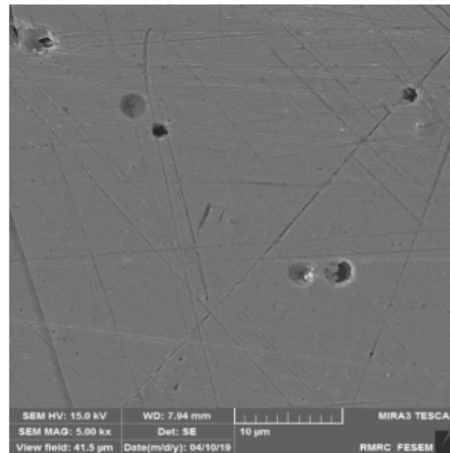


در جدول ۴ مقایسه داده‌های آزمون خوردگی و مقاومت تماسی نمونه‌های مختلف پوشش داده شده با طلا با معیار DOE نشان داده شده است. همانطور که در این جدول ارائه شده است، چگالی جریان خوردگی تمامی نمونه‌ها از معیار DOE پیروی کرده ولی مقاومت تماسی نمونه‌های آبکاری شده از این معیار تبعیت نمی‌کند. نتایج حاصل از آزمون کرنوآمپرومتری تحت ولتاژ ۰/۸ ولت در شکل

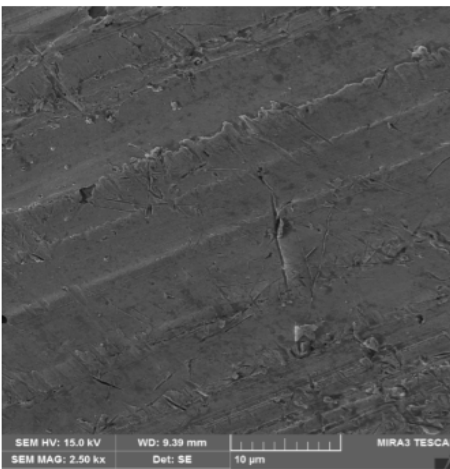
می‌باشد. با کاهش تخلخل و افزایش ضخامت پوشش طلا مقاومت به خوردگی زیرلایه مسی و فولاد زنگ‌نزن به طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۵ ملاحظه می‌شود پوشش به روش اسپاترینگ دارای تخلخل کمتری نسبت به پوشش آبکاری طلا است، در نتیجه تمایل به خوردگی پوشش اسپاترینگ طلا کمتر از پوشش آبکاری طلا است.



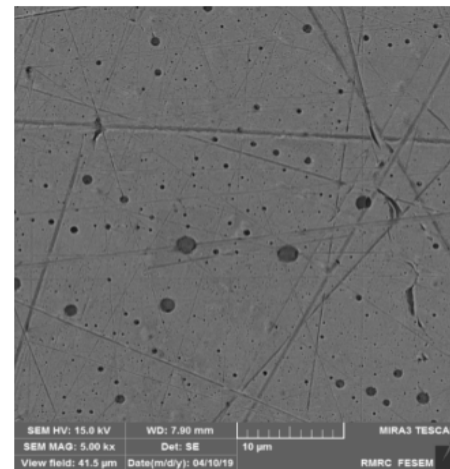
(ب)



(الف)

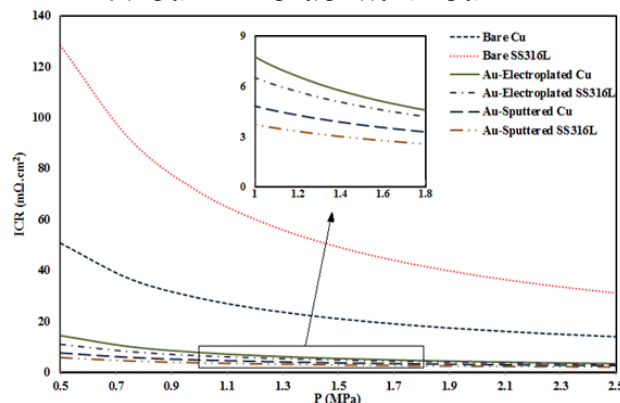


(د)



(ج)

شکل ۵: تصاویر FESEM از مورفولوژی پوشش طلا: (الف) فولاد زنگ‌نزن پوشش داده شده به روش آبکاری، (ب) فولاد زنگ‌نزن پوشش داده شده به روش اسپاترینگ، (ج) مس پوشش داده شده به روش آبکاری و (د) مس پوشش داده شده به روش اسپاترینگ



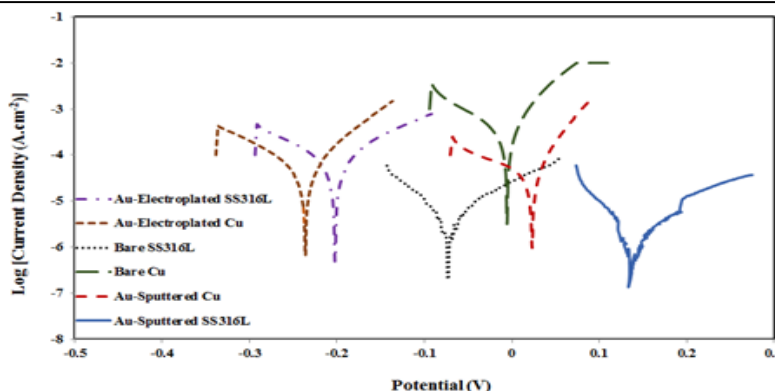
شکل ۶: مقاومت تماسی نمونه‌های مختلف پوشش داده شده با طلا

محللول شبیه‌سازی به زیر لایه نفوذ کرده و منجر به تخریب زیر لایه می‌شود و پوشش از سطح جدا می‌گردد. با تخریب پوشش طلا، رسوب ذرات مس بر روی الکتروود پلاتین مشاهده می‌شود که در شکل ۹ نشان داده شده است. از این‌رو، از ادامه این تست صرف‌نظر گردید. نتایج آزمون کرنوآمپرومتری نمونه پوشش داده شده با روش اسپاترینگ در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، تخریب پوشش در زمان طولانی‌تری رخ داده است. همچنین، در هر دو روش مشاهده می‌گردد که نمونه

۸ و شکل ۱۰ نشان می‌دهد که چگالی جریان همه نمونه‌ها در زمان کوتاهی به حالت پایدار می‌رسد. در بین این نمونه‌ها کمترین زمان رسیدن به حالت پایدار مربوط به نمونه فولاد زنگ‌نزن اسپاترینگ شده بوده که این نمونه از کمترین جریان خوردگی برخوردار است. علاوه بر این، بیشترین زمان رسیدن به حالت پایدار مربوط به نمونه مسی آبکاری شده می‌باشد که تخریب پوشش در زمان کوتاهی (کمتر از ۲۰۰ ثانیه) رخ می‌دهد. علت این پدیده وجود تخلخل در روش آبکاری الکتریکی می‌باشد که یون‌های خورنده

جدول ۲: مقاومت تماسی نمونه‌های مختلف مس و فولاد زنگ‌نزن پوشش داده شده و بدون پوشش

در فشار (۱/۴ MPa)	در فشار (۰/۶ MPa)	مقاومت تماسی ( $m\Omega \cdot cm^2$ )
۲۲/۳۸	۴۹/۴۶	مس خام
۵/۷۶	۱۳/۸۶	مس پوشش داده شده با طلا توسط آبکاری
۳/۳۳	۷/۲۶	مس پوشش داده شده با طلا توسط اسپاترینگ
۵۲/۳۵	۱۲۰/۳۴	فولاد زنگ‌نزن خام
۴/۱۲	۱۰/۱۲	فولاد زنگ‌نزن پوشش داده شده با طلا توسط آبکاری
۲/۱۵	۵/۶۸	فولاد زنگ‌نزن پوشش داده شده با طلا توسط اسپاترینگ



شکل ۷: نمودار پلاریزاسیون نمونه‌های مختلف پوشش داده شده با طلا

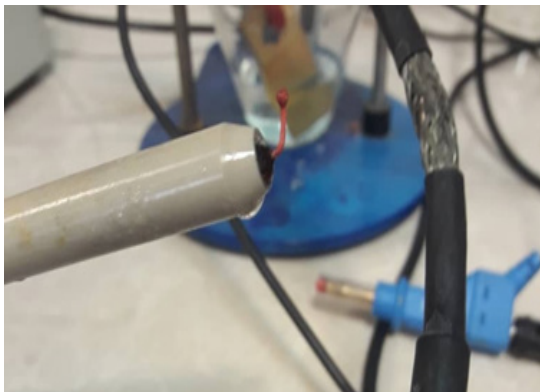
جدول ۳: نتایج نمودار پلاریزاسیون نمونه‌های مختلف پوشش داده شده با طلا

نمونه	چگالی جریان خوردگی ( $\mu A \cdot cm^{-2}$ )	پتانسیل خوردگی (V)
مس بدون پوشش	۳۵۵/۸۴	-۰/۰۱۲۷۸۲
فولاد زنگ‌نزن بدون پوشش	۵/۲۸	-۰/۰۷۴۲۹۷
مس آبکاری شده	۴/۴۷	-۰/۲۳۸۶
مس اسپاترینگ	۳/۷۸	۰/۰۲۳۰۸۲
فولاد زنگ‌نزن آبکاری شده	۷/۰۰	-۰/۲۰۳۹۲
فولاد زنگ‌نزن اسپاترینگ شده	۰/۱۹	۰/۱۳۷۴۴

جدول ۴: مقایسه داده‌های آزمون خوردگی و مقاومت تماسی با معیار DOE

معیار DOE	مس اسپاترینگ شده	فولاد زنگ‌نزن اسپاترینگ شده	مس آبکاری شده	فولاد زنگ‌نزن آبکاری شده	پارامتر
	۳/۷۸	۰/۱۹	۴/۴۷	۷/۰۰	چگالی جریان خوردگی ( $\mu A \cdot cm^{-2}$ )
	۷/۲۶	۵/۶۸	۱۳/۸۶	۱۰/۱۲	مقاومت تماسی ( $m\Omega \cdot cm^2$ )

شده با روش اسپاترینگ بوده است. کمترین مقاومت تماسی در فشار ۱/۴ مگاپاسگال مربوط به نمونه‌ی مسی و فولاد زنگ‌نزن پوشش داده شده به روش اسپاترینگ بوده که مقدار آن به ترتیب  $3/33 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$  و  $2/15 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$  می‌باشد. همچنین، بیشترین مقاومت تماسی مربوط به نمونه فولاد زنگ‌نزن بدون پوشش با مقاومت تماسی  $52/35 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$  است. در نهایت، آزمون‌های الکتروشیمیایی با هدف بررسی مقاومت به خوردگی نمونه‌ها انجام شد که نتایج بدست‌آمده نشان داد که فولاد زنگ‌نزن اسپاترینگ شده با طلا از بین سایر نمونه‌ها دارای کمترین چگالی جریان خوردگی با مقدار  $0/19$  میکروآمپر بر سانتیمتر مربع و نمونه مس بدون پوشش دارای بیشترین چگالی جریان خوردگی با مقدار  $355/84$  میکروآمپر بر سانتیمتر مربع می‌باشد. منحنی‌های پلاریزاسیون تافل صفحات مسی و فولاد زنگ‌نزن پوشش داده شده نشان می‌دهد که تمامی پوشش‌ها دارای رفتار خوردگی فعال می‌باشند.

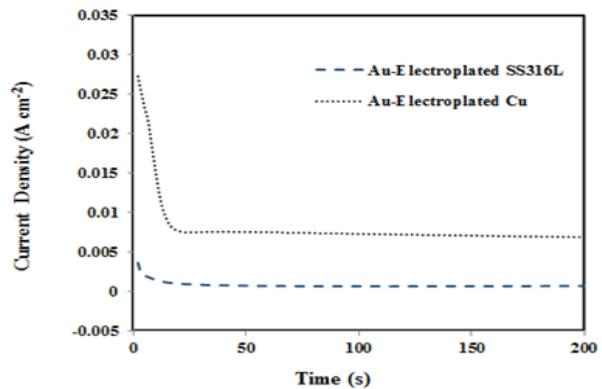


شکل ۹: رسوب ذرات مس بر روی الکتروود پلاتینی

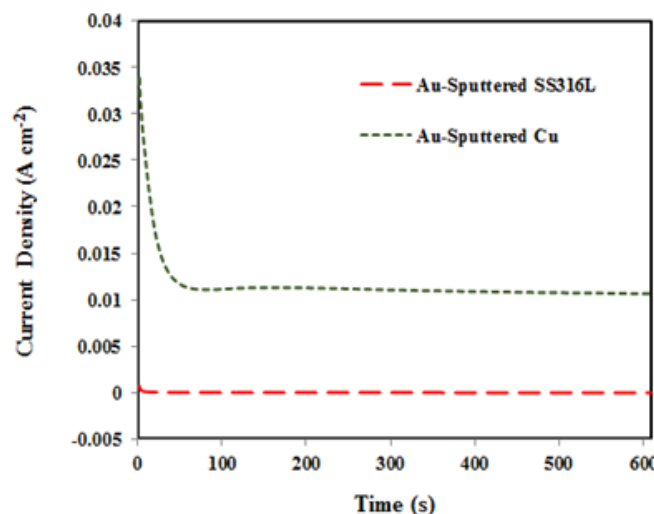
فولاد زنگ نزن دارای چگالی جریان خوردگی کمتری در مقایسه با نمونه مسی می‌باشد. علت این امر غیرفعال شدن زیر لایه فولاد زنگ نزن تحت این شرایط است که دارای مقاومت به خوردگی بالایی است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مشخصات عملکردی پوشش طلا روی زیرلایه مسی و فولاد زنگ‌نزن با روش‌های اسپاترینگ و آبکاری الکتریکی مورد بررسی قرار گرفته است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داده است که استفاده از روش آبکاری الکتریکی جهت پوشش‌دهی طلا موجب ایجاد تخلخل و حفره‌هایی روی سطح پوشش شده که در پی آن باعث افت خواص خوردگی و هدایت الکتریکی آن می‌گردد. نتایج بدست‌آمده همچنین نشان داد که حجم تخلخل‌های روی زیرلایه مسی بسیار بیشتر از زیر لایه فولاد زنگ‌نزن است. مقاومت تماسی الکتریکی نمونه‌های فولاد زنگ‌نزن و مسی در فشار اعمالی مختلف نیز مورد ارزیابی قرار گرفتند که نتایج حاکی از عملکرد مناسب نمونه‌های پوشش‌داده



شکل ۸: نمودار کرنوآمپرومتری نمونه پوشش داده شده با طلا به روش آبکاری الکتریکی



شکل ۱۰: نمودار کرنوآمپرومتری نمونه پوشش داده شده با طلا به روش اسپاترینگ



## ۵- مراجع

- [1] Wang, Y. and D.O. Northwood, An investigation into polypyrrole-coated 316L stainless steel as a bipolar plate material for PEM fuel cells. *Journal of Power Sources*, 2006. 163(1): p. 500-508.
- [2] Wang, H. and J. Turner, Reviewing metallic PEMFC bipolar plates. *Fuel Cells*, 2010. 10(4): p. 510-519.
- [3] Wang, Y. and D.O. Northwood, An investigation into TiN-coated 316L stainless steel as a bipolar plate material for PEM fuel cells. *Journal of Power Sources*, 2007. 165(1): p. 293-298.
- [4] Taherian, R., A review of composite and metallic bipolar plates in proton exchange membrane fuel cell: Materials, fabrication, and material selection. *Journal of Power Sources*, 2014. 265: p. 370-390.
- [5] Wind, J., R. Späh, W. Kaiser, and G. Böhm, Metallic bipolar plates for PEM fuel cells. *Journal of Power Sources*, 2002. 105(2): p. 256-260.
- [6] Kumar, A., M. Ricketts, and S. Hirano, Ex situ evaluation of nanometer range gold coating on stainless steel substrate for automotive polymer electrolyte membrane fuel cell bipolar plate. *Journal of Power Sources*, 2010. 195(5): p. 1401-1407.
- [7] Miyazawa, A., E. Tada, and A. Nishikata, Influence of corrosion of SS316L bipolar plate on PEFC performance. *Journal of Power Sources*, 2013. 231: p. 226-233.
- [8] Davies, D., P. Adcock, M. Turpin, and S. Rowen, Bipolar plate materials for solid polymer fuel cells. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2000. 30(1): p. 101-105.
- [9] Yun, Y.-H., Deposition of gold-titanium and gold-nickel coatings on electropolished 316L stainless steel bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells. *international journal of hydrogen energy*, 2010. 35(4): p. 1713-1718.
- [10] Yan, W.-M., C.-Y. Chen, and C.-H. Liang, Comparison of performance degradation of high temperature PEM fuel cells with different bipolar plates. *Energy*, 2019. 186: p. 115836.
- [۱۱] بهرامی پور، م.، س.م. ربیعی و م. جعفریان، بررسی خواص و مورفولوژی پوشش نانولایه طلا ایجاد شده بر روی صفحات دوقطبی در پیل سوختی به روش اسپاترینگ، *نانومواد*، ۲۰۱۴، ۴(۱۲): p. ۲۵۹-۲۶۷.
- [12] Joseph, S., J.C. McClure, R. Chianelli, P. Pich, and P. Sebastian, Conducting polymer-coated stain-

- less steel bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells (PEMFC). *International Journal of Hydrogen Energy*, 2005. 30(12): p. 1339-1344.
- [13] Feng, K., Z. Li, H. Sun, L. Yu, X. Cai, Y. Wu, and P.K. Chu, C/CrN multilayer coating for polymer electrolyte membrane fuel cell metallic bipolar plates. *Journal of Power Sources*, 2013. 222: p. 351-358.
- [14] Oyarce, A., N. Holmström, A. Bodén, S. Randström, and G. Lindbergh, In-situ Measurements of Contact Resistance and In-situ Durability studies of Steels and Coatings to be used as Bipolar Plates in PEMFCs. *ECS Transactions*, 2009. 25(1): p. 1791-1801.
- [15] Ruset, C., E. Grigore, G. Collins, K. Short, F. Rossi, N. Gibson, H. Dong, and T. Bell, Characteristics of the Ti<sub>2</sub>N layer produced by an ion assisted deposition method. *Surface and Coatings Technology*, 2003. 174: p. 698-703.
- [16] Park, J.H., D. Byun, and J.K. Lee, Employment of fluorine doped zinc tin oxide (ZnSnOx: F) coating layer on stainless steel 316 for a bipolar plate for PEMFC. *Materials Chemistry and Physics*, 2011. 128(1-2): p. 39-43.
- [17] Lee, S.-J., C.-H. Huang, and Y.-P. Chen, Investigation of PVD coating on corrosion resistance of metallic bipolar plates in PEM fuel cell. *Journal of materials processing technology*, 2003. 140(1-3): p. 688-693.
- [18] Yi, P., W. Zhang, F. Bi, L. Peng, and X. Lai, Enhanced corrosion resistance and interfacial conductivity of TiC x/aC nanolayered coatings via synergy of substrate bias voltage for bipolar plates applications in PEMFCs. *ACS applied materials & interfaces*, 2018. 10(22): p. 19087-19096.
- [19] Yi, P., L. Zhu, C. Dong, and K. Xiao, Corrosion and interfacial contact resistance of 316L stainless steel coated with magnetron sputtered ZrN and TiN in the simulated cathodic environment of a proton-exchange membrane fuel cell. *Surface and Coatings Technology*, 2019. 363: p. 198-202.
- [20] Yoon, W., X. Huang, P. Fazzino, K.L. Reifsnider, and M.A. Akkaoui, Evaluation of coated metallic bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, 2008. 179(1): p. 265-273.