

## بررسی اثر غلظت سدیم کربنات روی خواص خوردگی پوشش نیتروکربوره به روش پلاسمای الکترولیتی کاتدی

سید محمد نوری<sup>۱</sup>، چنگیز دهقانپان<sup>۲\*</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۶/۱۰، ش.ص: ۶۷-۷۶، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۰۹)

### چکیده

در این تحقیق پوشش نیتروکربوره به روش پلاسمای الکترولیتی کاتدی روی فولاد ساده کربنی Ck45 در الکترولیت حاوی اوره و سدیم کربنات اعمال گردید. به منظور بررسی اثر غلظت افزودنی سدیم کربنات روی مشخصات ساختاری و نیز خواص لایه تولیدی، از آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. در ادامه نیز رفتار خوردگی این پوششها با دو روش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و نیز امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) در محلول ۳/۵٪ سدیم کلرید بررسی گردید. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت سدیم کربنات در الکترولیت از ۱۰ به ۳۰ گرم بر لیتر، ولتاژ شروع جرقه زنی حدود ۱۵۰ ولت کاهش یافت و حفرات درشت تری در مورفولوژی سطحی این پوششها مشاهده شدند. بعلاوه در اثر این افزایش غلظت، مقدار زبری سطحی پوشش اعمالی حدود ۱/۵ برابر افزایش پیدا کرد. همچنین، فازهای نیتریدی  $\epsilon$ -Fe<sub>2.3</sub>N و  $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N، کاربیدی Fe<sub>3</sub>C و کربونیتریدی Fe[Fe(CN)<sub>6</sub>]<sub>3</sub> در الگوی پراش پرتو ایکس این پوششها شناسایی شدند. نتایج آزمونهای خوردگی از هر دو روش پلاریزاسیون و امپدانس الکتروشیمیایی نشان داد که پوشش نیتروکربوره تهیه شده در غلظت ۲۰ گرم بر لیتر سدیم کربنات، کمترین مقدار دانسیته جریان خوردگی ( $10^{-10}$  A/cm<sup>2</sup>) و بالاترین مقاومت پلاریزاسیون ( $33000 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ) را در بین بقیه نمونه‌های پوشش داده شده داشت.

**واژه‌های کلیدی:** نیتروکربوره، پلاسمای الکترولیتی، پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، امپدانس الکتروشیمیایی.

<sup>۱</sup> - فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی مواد گرایش شناسایی و انتخاب مواد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

<sup>۲</sup> - استاد رشته مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

\*- نویسنده مسئول مقاله: [Cdehghan@ut.ac.ir](mailto:Cdehghan@ut.ac.ir)

## پیشگفتار

که محصولات گازی از الکترولیت زمان کافی برای ترک سطح الکتروود فلزی را ندارند. میدان الکتریکی قوی باعث یونیزه شدن محصولات گازی شده و بنابراین یک تخلیه الکتریکی در سطح الکتروود (نمونه) به وجود می‌آورد. رادیکال‌های فعال عناصر مورد نظر و اجزاء یونی پلازما به طرف سطح شتاب گرفته و سطح نمونه را بمباران و حرارت لازم برای نفوذ بین نشینی یا جانشینی به فلز را مهیا می‌کنند. سرعت نفوذ عناصر بین‌نشینی و تشکیل لایه‌های سطحی و نفوذی در این روش نسبت به سایر روش‌ها بالاتر و زمان کل عملیات نسبت به سایر تکنیک‌های وابسته به پلازما بسیار پایین‌تر است به گونه‌ای که در حدود چند دقیقه یک لایه ضخیم سطحی - نفوذی با خواص مکانیکی و خوردگی عالی روی سطح تشکیل می‌شود [۹-۱۰].

در تحقیق حاضر به بررسی اثر غلظت سدیم کربنات روی میکروساختار و رفتار خوردگی پوشش‌های نیتروکربوره تولید شده به روش پلاسمای الکترولیتی اشباع (PES) روی فولاد Ck45 پرداخته می‌شود.

## مواد و روش‌ها

نمونه مورد استفاده در این تحقیق از جنس فولاد ساده کربنی Ck45 (با ترکیب شیمیایی مطابق جدول ۱) به ابعاد  $30 \times 20 \times 6 \text{ mm}^3$  به عنوان کاتد قرار گرفت. علت انتخاب این فولاد کاربرد فراوان در مواردی مثل اجزا با چقرمگی بالا در خودرو و هواپیما مانند شفت، بوش، میل لنگ، سگدست، اکسل شاتون، میل لنگ، چرخ‌دنده کوچک، تسمه و در صنایع نفت به عنوان مته‌های حفاری بود [۱۱]. همچنین به دلیل درصد کربن مناسب آن (۰/۴۷) امکان تشکیل فازهای کاربیدی، نیتریدی و کربونیتریدی مورد نظر در آن بیش‌تر است. کلیه نمونه‌ها پس از بریده شدن از یک ورق فولادی ابتدا توسط سنگ مغناطیسی پرداخت شدند تا فرورفتگی‌ها و برآمدگی‌های سطحی به حداقل برسد. لبه‌های تیز نمونه نیز تا حد امکان ماشین‌کاری شدند تا اثر قوسی‌سازی در لبه‌های تیز کاهش یابد. سپس جهت حصول سطحی کاملاً صاف و آینه‌ای، سطوح نمونه‌ها با کاغذ سمباده از شماره ۶۰ تا ۲۰۰۰ پرداخت شدند. به‌علاوه، درست پیش از پوشش‌دهی، عملیات چربی‌زدایی در استون به مدت ۵ دقیقه انجام گردید. آند مورد استفاده نیز یک صفحه از جنس فولاد

پلازما عمدتاً به‌عنوان چهارمین و فراوان‌ترین حالت ماده در جهان هستی شناخته می‌شود که در واقع یک گاز یونیزه شده و دارای انرژی کافی برای آزادسازی الکترون از اتم‌ها است. در نیمه دوم قرن نوزدهم میلادی و با رشد سریع تحقیقات فضایی، استفاده از گداخت هسته‌ای در پلاسمای داغ برای تولید انرژی، رشد چشمگیر صنایع الکترونیک و مخابرات فضایی و... باعث شدند تا تحقیق در رشته‌های مختلف پلازما وارد مرحله جدیدی از پیشرفت خود شود. فیزیک پلازما در اوایل قرن بیستم و با شروع تحقیقات لانگمویر<sup>۱</sup> در مورد تخلیه الکتریکی در گازها وارد دوره رشد و شکل‌گیری شد [۱-۲]. استفاده از پلازما در بسیاری از کاربردهای صنعتی همچون مهندسی سطح به‌طور موفقیت‌آمیزی گسترش یافت، به‌گونه‌ای که پوشش‌دهی به روش پلاسمایی شامل دسته‌های زیر است: پاشش پلاسمایی<sup>۲</sup> [۳]؛ رسوب شیمیایی بخار به وسیله پلازما<sup>۳</sup> [۴]؛ و الکترولیز پلاسمایی<sup>۴</sup> [۵].

بیش‌تر فرآیندهای شیمیایی حرارتی که توسط پلازما انجام می‌شود، در فشار پایین و در محفظه خلاء صورت می‌گیرند و روش‌های نسبتاً گران‌قیمتی هستند. برای غلبه بر این مشکل، سیستم‌های پلاسمایی که در فشار محیط عمل می‌کنند، توسعه یافته‌اند. الکترولیز پلاسمایی شاخه نسبتاً جدیدی از فرآیندهای مهندسی سطح به کمک پلازماست که در آن سطح نمونه در معرض جرقه‌های متعددی قرار گرفته و بر اساس الکترولیت مورد استفاده و حالت جریان اعمالی، پوشش‌های نانوساختاری مختلفی مانند اکسیدها، کاربیدها، نیتریدها و... تولید می‌شوند. این فرایند بر اساس پلاریته نمونه هدف غوطه‌ور به دو شاخه آندی (اکسیداسیون پلاسمای الکترولیتی-PEO) [۶] و کاتدی (پلاسمای الکترولیتی اشباع-PES) [۷-۸] تقسیم می‌شود. تفاوت عمده میان این فرایند و الکترولیز معمولی اعمال جریان یا ولتاژ نسبتاً بالا (۲۰۰-۲۰۰۰ ولت) است. این فرایند با ظهور جرقه‌هایی روی سطح شروع شده و باعث افزایش دمای سطح نمونه نسبت به فرآیندهای الکترولیتی معمول می‌شود. تحت شرایط مشخص سینتیک فرآیندهای الکترولیتی آنقدر بالاست

1-Langmuir

2-Plasma Spray

3-Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition

4-Plasma Electrolysis

زنگ نزن ۳۱۶ بود. برای کنترل دمای الکترولیت حین فرایند، با استفاده از یک پمپ و کندانسور الکترولیت مورد استفاده مدام در حال حرکت بود، به نحوی که همواره دمای الکترولیت کم تر از  $40^{\circ}\text{C}$  قرار داشت. شکل ۱ تصویر محفظه و سیستم پوشش دهی مورد استفاده و نیز اتصالات آند و کاتد را نشان می دهد.

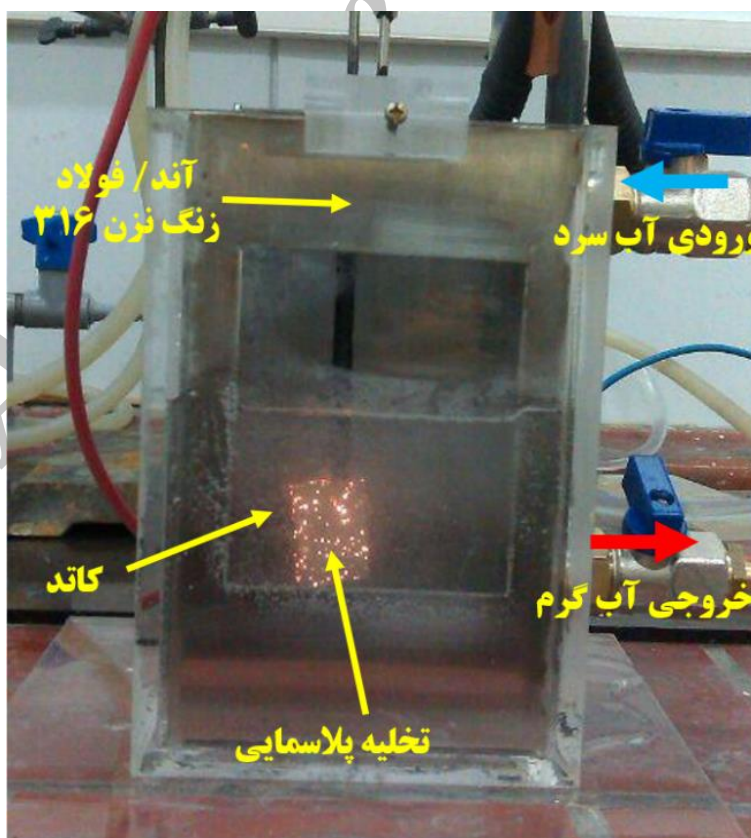
تجهیزات مورد استفاده شامل یک منبع تغذیه (ترانس) ۲۰ کیلوواتی، یکسوکننده و یک تولیدکننده پالس (رکتیفایر) برای تبدیل جریان DC به جریان پالسی بودند. ولتاژ خروجی این سیستم ۶۰۰-۰ ولت و جریان خروجی آن ۱۰۰-۰ آمپر بود. الکترولیت مورد استفاده در این تحقیق برای ایجاد لایه نیتروکربوره روی سطح محلول آبی شامل کربامید یا اوره

زنگ نزن ۳۱۶ بود. برای کنترل دمای الکترولیت حین فرایند، با استفاده از یک پمپ و کندانسور الکترولیت مورد استفاده مدام در حال حرکت بود، به نحوی که همواره دمای الکترولیت کم تر از  $40^{\circ}\text{C}$  قرار داشت. شکل ۱ تصویر محفظه و سیستم پوشش دهی مورد استفاده و نیز اتصالات آند و کاتد را نشان می دهد.

تجهیزات مورد استفاده شامل یک منبع تغذیه (ترانس) ۲۰ کیلوواتی، یکسوکننده و یک تولیدکننده پالس (رکتیفایر) برای تبدیل جریان DC به جریان پالسی بودند. ولتاژ خروجی این سیستم ۶۰۰-۰ ولت و جریان خروجی آن ۱۰۰-۰ آمپر بود. الکترولیت مورد استفاده در این تحقیق برای ایجاد لایه نیتروکربوره روی سطح محلول آبی شامل کربامید یا اوره

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد ساده کربنی مورد استفاده در این تحقیق (برحسب درصد وزنی)

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
Balance	۰/۴۷	۰/۲۱	۰/۵۷	۰/۰۲۳	۰/۰۲۸	۰/۱۱	۰/۰۵	۰/۰۵



شکل ۱- سیستم طراحی شده به منظور انجام عملیات پوشش دهی و اجزاء مربوطه

بیش از حد گرم شود و دمای آن پس از عملیات به بالای  $100^{\circ}\text{C}$  نیز برسد. با افزایش مقدار سدیم کربنات در محلول، مقدار هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد. در نتیجه در یک پتانسیل ثابت، مقدار جریان بیشتری از محلول عبور می‌کند و لذا دانسیته جریان پلازما افزایش خواهد یافت.

همچنین مشاهده شد که با افزایش غلظت سدیم کربنات از ۱۰ به ۳۰ g/l، مقدار حداکثر جریان عبوری (پیک جریان) از ۱۰ به ۱۲/۶ آمپر افزایش یافت، درحالی‌که ولتاژ شروع جرقه‌زنی از ۲۶۳ به ۱۲۶ ولت کاهش یافت. این مطلب منطقی به نظر می‌رسد چرا که با افزایش هدایت الکتریکی محلول، پدیده شکست پاکت بخار تشکیل شده پیرامون نمونه (کاتد) در ولتاژ پایین‌تر و جریان بالاتری رخ دهد [۱۳].

### آنالیز فازی پوشش

شکل ۳ الگوی پراش پرتو ایکس نمونه خام بدون پوشش و نیز یکی از نمونه‌های پوشش داده شده را نشان می‌دهد. در نمونه بدون پوشش تنها فاز  $\alpha\text{-Fe}$  شناسایی گردید. همچنین در نمونه‌های پوشش‌دهی شده، علاوه بر قله Fe که مربوط به زیرلایه بوده و در اثر نفوذ پرتو ایکس به داخل حاصل شده است، قله مربوط به فازهای  $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$ ،  $\epsilon\text{-Fe}_{2.3}\text{N}$ ،  $\text{Fe}_3\text{C}$  و  $\text{Fe}[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$  شناسایی شدند. قله مربوط به فازهای نیتریدی نسبت به مکان اصلی خود به مقدار بسیار کمی به سمت چپ جابجا شده‌اند. این جابجایی نشانه وجود یک تنش فشاری در شبکه و زیاد شدن فاصله تعادلی صفحات اتمی ناشی از نفوذ بین‌نشینی عناصر نیتروژن و کربن در کریستال است.

جدول ۲ بطور خلاصه ترکیب الکترولیت، شرایط و سایر پارامترهای پوشش‌دهی را نشان می‌دهد. برای ارزیابی خواص و ساختار پوشش‌ها آزمون‌های زیر انجام گرفت: آنالیز فازی پوشش با پراش پرتو ایکس (XRD) با دستگاه مدل Philips Xpert Pro، مورفولوژی پوشش‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل Camson MV2300 Oxford model 7538، زبری سنجی با دستگاه HOMMEL-WERKE به روش پروفیلومتری، رفتار خوردگی با آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، دستگاه پتانسیواستات مدل EG&G-273A و سرعت روبش  $1\text{ mV/s}$  در محدوده  $300\text{--}$  تا  $1000\text{ mV}$  نسبت به پتانسیل مدار باز، آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) در محلول ۳/۵٪ سدیم کلرید با دستگاه Solartron SI-1260 و دامنه پتانسیل اعمالی  $10 \pm \text{mV}$  و فرکانس اعمالی در محدوده  $100\text{ KHz}$  تا  $100\text{ mHz}$ .

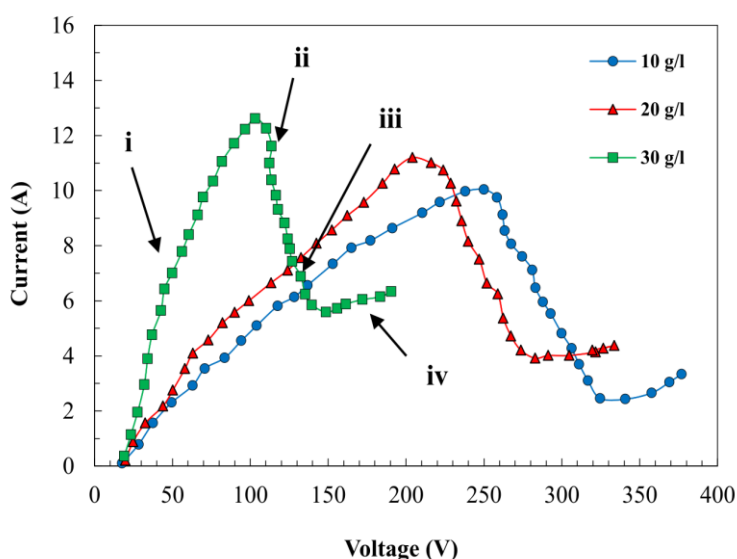
### نتایج و بحث

#### تغییرات ولتاژ-جریان در فرایند پلاسمای الکترولیتی

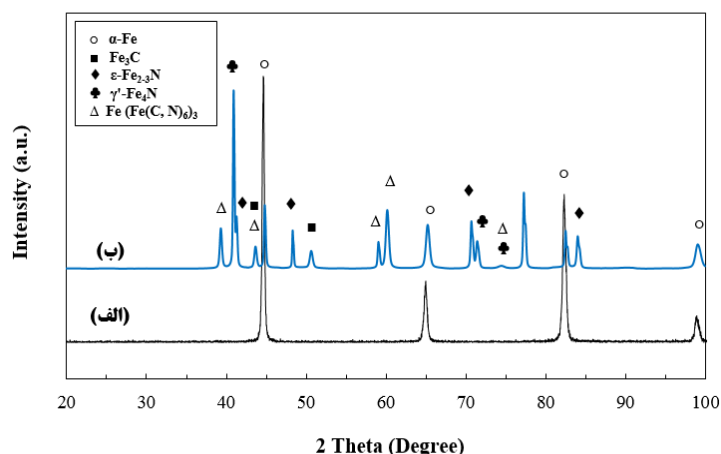
شکل ۲ منحنی‌های تغییرات ولتاژ - جریان سلول را در الکترولیت حاوی اوره و کربنات سدیم نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، این منحنی‌ها متشکل از ۴ ناحیه هستند: (i) آزادسازی گاز روی سطح کاتد، (ii) شروع جرقه زنی، (iii) شدت گرفتن جرقه زنی، (iv) جرقه زنی پایدار. با کاهش مقدار سدیم کربنات در الکترولیت، ولتاژ حدی و نیز ولتاژ لازم برای تشکیل پلازما افزایش می‌یابد. در نتیجه ممکن است الکترولیت

جدول ۲- پارامترها و شرایط پوشش‌دهی

پارامتر	نوع یا مقدار
آند	فولاد زنگ نزن ۳۱۶
کاتد (زیرلایه)	ورق فولادی Ck45
الکترولیت	اوره $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$
	سدیم کربنات $\text{Na}_2\text{CO}_3$
pH	۱۲-۱۱
نوع جریان	پالسی
فرکانس	۱۰۰۰۰ هرتز
دوره کاری	۴۰ درصد
زمان فرایند	۱۰ دقیقه



شکل ۲- تغییرات ولتاژ- جریان سلول در طول فرایند



شکل ۳- الگوی پراش پرتو ایکس (الف) نمونه خام و (ب) نمونه نیتروکربوره شده

### مشاهدات ریز ساختمانی پوشش

تصویر مورفولوژی سطحی پوشش نیتروکربوره برای نمونه‌های تهیه شده در غلظت‌های مختلف سدیم کربنات در شکل ۴ نشان داده شده است. سطح تمام پوشش‌ها حاوی حفرات و میکروتُرک‌هایی است که از مشخصه اصلی پوشش‌های تولیدی در این روش است. در واقع حفرات باقیمانده کانال‌های تخلیه هستند و میکروتُرک‌ها نیز در اثر کوئنچ در الکترولیت به وجود می‌آیند.

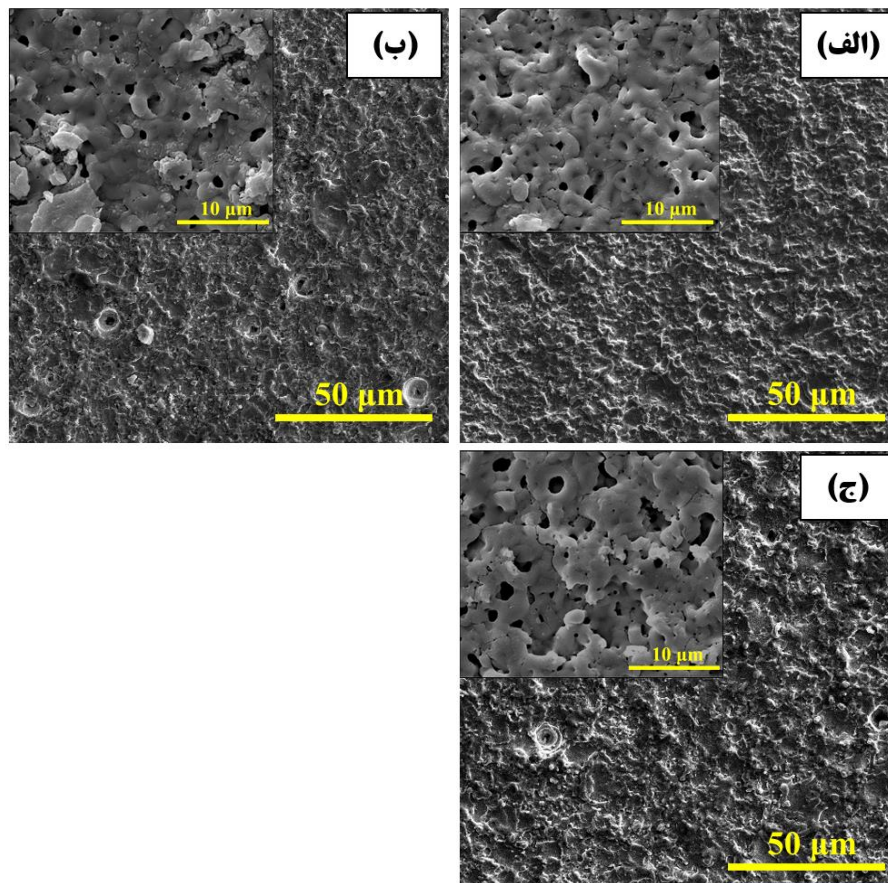
همان‌گونه که گفته شد با افزایش مقدار سدیم کربنات میزان هدایت الکتریکی محلول افزایش می‌یابد. در نتیجه این اثر، حفرات درشت‌تری روی سطح پدیدار می‌شوند. به نظر می‌رسد که با افزایش هدایت الکتریکی محلول، جرقه‌ها قوی‌تر شده و

حتی می‌تواند اثرات مخربی روی سطح ایجاد کند. از آنجایی که لبه‌های تیز نمونه تا حد زیادی ماشین‌کاری شدند، اثر تشدید جرقه‌زنی در لبه‌ها تا حد زیادی از بین رفته است و تنها می‌توان در وسط نمونه تفاوت در اندازه حفرات را با هم مقایسه نمود. در غلظت پایین ۱۰ g/l، جرقه زنی نسبتاً ریز بوده و حفرات بطور تقریباً یکنواختی روی سطح پوشش توزیع شده‌اند. با افزایش غلظت سدیم کربنات و افزایش هدایت الکتریکی محلول از ۱۰ به ۳۰ g/l، جرقه زنی تشدید شده و حفرات روی سطح نیز درشت‌تر می‌شوند، درحالی‌که بطور پراکنده و نامنظمی روی سطح پخش شده‌اند.

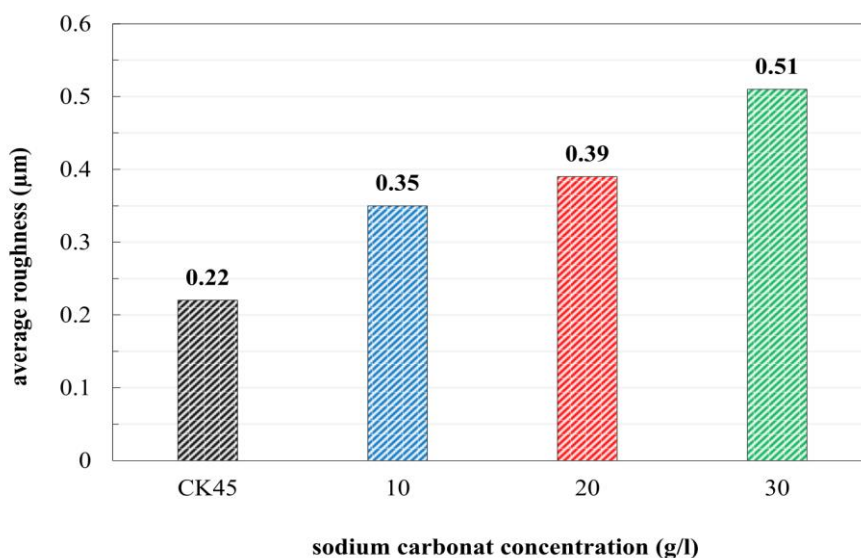
شکل ۵ میانگین زبری سطحی (Ra) نمونه خام و نیز نمونه‌های پوشش‌دهی شده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که

غلظت سدیم کربنات از ۱۰ به ۳۰ g/l، مقدار زبری سطحی نمونه‌های نیتروکربوره شده از ۰/۳۵ به ۰/۵۱  $\mu\text{m}$  افزایش یافت.

مشاهده می‌شود، مقدار زبری سطحی برای نمونه فولادی Ck45 (بدون پوشش) ۰/۲۲  $\mu\text{m}$  بود و این مقدار برای تمام نمونه‌های پوشش‌دهی شده بیش‌تر از نمونه خام بود که مربوط به ماهیت جرقه‌زنی و وجود حفرات روی سطح است. همچنین با افزایش



شکل ۴- تصویر SEM مورفولوژی سطحی پوشش نیتروکربوره به روش پلاسمای الکترولیتی در غلظتهای مختلف سدیم کربنات؛ (الف) ۱۰ g/l، (ب) ۲۰ g/l و (ج) ۳۰ g/l



شکل ۵- متوسط زبری سطحی نمونه خام و نمونه‌های نیتروکربوره در غلظتهای مختلف سدیم کربنات

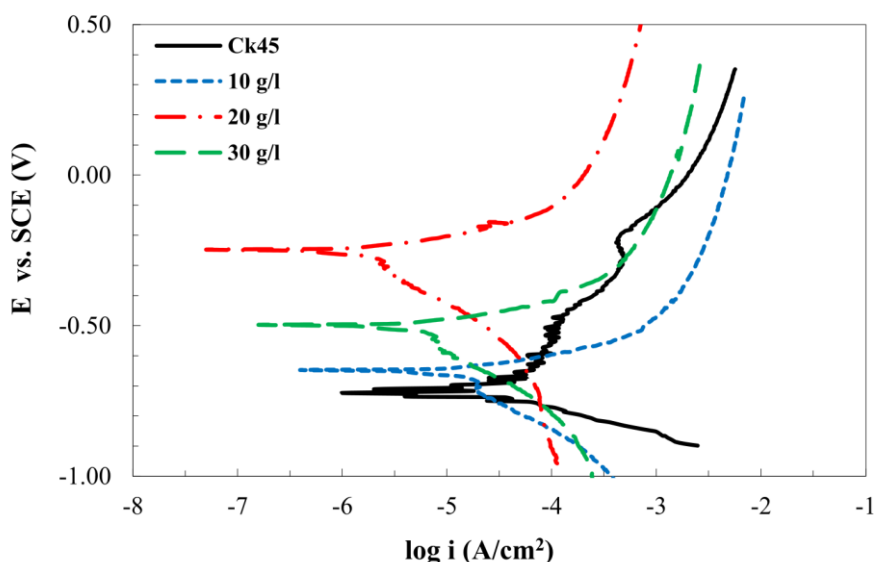
## ارزیابی مقاومت به خوردگی پوشش

رسوب نشانی تا حد زیادی با اختلال مواجه می‌شود و پوشش یکنواختی روی سطح تشکیل نمی‌شود (در غلظت ۳۰ g/l). لذا مقاومت به خوردگی این نمونه کاهش خواهد یافت. در نمونه با غلظت ۱۰ g/l چون ولتاژ جرقه زنی بالاتر از دو نمونه دیگر است، برای تشکیل پلاسمای اولیه، جرقه‌های قوی‌تری باید تشکیل شوند که سبب تخریب پوشش می‌شود. در نهایت می‌توان گفت که در غلظت ۲۰ g/l، تعادلی بین اثر جرقه‌ها و نیز اندازه حفرات سطحی وجود خواهد داشت که سبب افزایش مقاومت به خوردگی این نمونه می‌گردد.

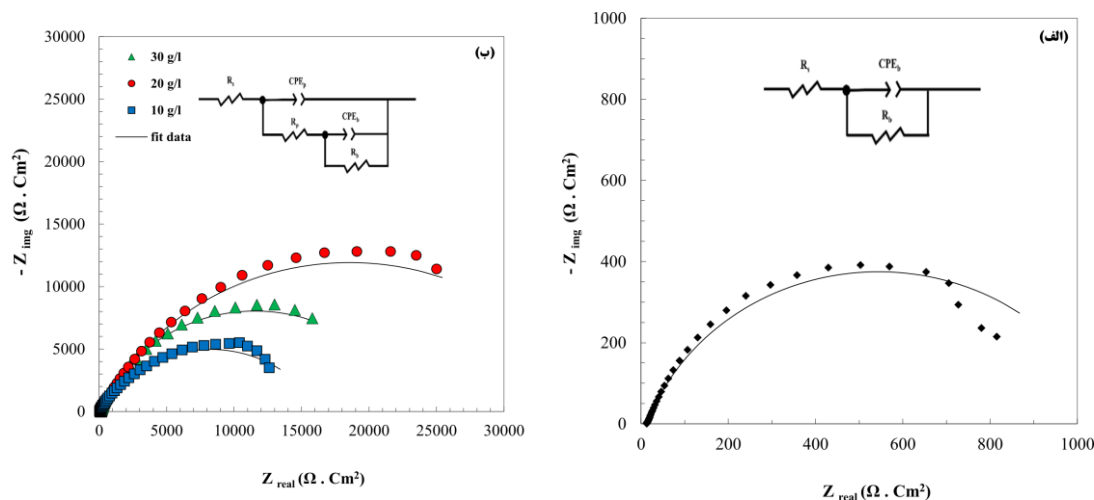
برای بررسی‌های بیشتر و دقیق‌تر رفتار خوردگی پوشش‌های اعمالی، منحنی نایکوئیست به‌دست آمده از آزمون امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) در شکل ۷ آورده شده است. مشاهده می‌شود که مقاومت به خوردگی نمونه‌های نیتروکربوره ۳۳-۱۶ برابر نمونه فولادی بدون پوشش بود. به‌علاوه در بین نمونه‌های نیتروکربوره، مقاومت به خوردگی نمونه تهیه شده در الکترولیت با غلظت افزودنی سدیم کربنات ۲۰ g/l در حدود  $23000 \Omega \cdot \text{cm}^2$  به‌دست آمد که به ترتیب در حدود ۲ و ۱/۴ برابر نمونه‌های در غلظت‌های ۱۰ و ۳۰ بود. در نهایت می‌توان گفت که نتایج به دست آمده از آزمون EIS با نتایج حاصل از نمودارهای پلاریزاسیون کاملاً هم‌خوانی دارد.

شکل ۶ منحنی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک برای نمونه خام و نمونه‌های نیتروکربوره شده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد با تشکیل پوشش نیتروکربوره منحنی‌های پلاریزاسیون به سمت پتانسیل‌های نجیب‌تر و دانسیته جریان‌های کم‌تر جابجا شدند. مقدار پتانسیل خوردگی ( $E_{\text{corr}}$ ) صرفاً یک پارامتر ترمودینامیکی است و مقادیر مثبت‌تر آن بیانگر پایداری شیمیایی بالاتر ترکیب مورد نظر است.

مقدار دانسیته جریان خوردگی برای نمونه خام بدون پوشش،  $2/12 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$  بود. دانسیته جریان خوردگی ( $i_{\text{corr}}$ ) برای تمام نمونه‌های پوشش‌دهی شده کم‌تر از نمونه خام فولادی است که بیانگر بهبود رفتار خوردگی در اثر اعمال پوشش نیتروکربوره روی سطح است. بر این اساس مقدار  $i_{\text{corr}}$  برای نمونه‌های نیتروکربوره شده در غلظت‌های ۱۰ تا ۳۰ g/l سدیم کربنات به ترتیب  $1/39 \times 10^{-5}$ ،  $2/25 \times 10^{-6}$  و  $7/67 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$  به‌دست آمد که به معنی مقاومت پلاریزاسیون بالاتر است؛ یعنی ایجاد پوشش نیتروکربوره مقاومت به خوردگی زیرلایه فولادی Ck45 را بهبود بخشیده است. با افزایش غلظت سدیم کربنات، دمای الکترولیت تا حد زیادی افزایش یافته و میزان تلاطم بسیار شدید می‌شود تا حدی که رنگ الکترولیت به قرمز نزدیک می‌شود. لذا می‌توان گفت: فرایند



شکل ۶- منحنی پلاریزاسیون مربوط به نمونه خام و نمونه‌های نیتروکربوره در غلظت‌های مختلف سدیم کربنات



شکل ۷- منحنی نایکوئیست (الف) نمونه خام و (ب) نمونه‌های نیتروکربوره شده در غلظت‌های مختلف سدیم کربنات

### نتیجه‌گیری

غلظت سدیم کربنات مقدار زبری سطحی پوشش اعمالی از  $0.35 \mu\text{m}$  برای غلظت  $10 \text{ g/l}$  به  $0.51 \mu\text{m}$  برای غلظت  $30 \text{ g/l}$  افزایش یافت که نشان‌دهنده افزایش حدود  $1/5$  برابری آن است. همچنین نمونه پوشش داده شده در الکترولیت با غلظت افزودنی سدیم کربنات  $20 \text{ g/l}$ ، پایین‌ترین مقدار دانسیته جریان خوردگی (در حدود  $10^{-6} \times 2/25 \text{ A/cm}^2$ ) و بالاترین مقاومت پلاریزاسیون  $33000 \Omega \cdot \text{cm}^2$  را داشت که حدود  $33$  برابر نمونه فولادی بدون پوشش بود.

پوشش نیتروکربوره به روش پلاسمای الکترولیتی بر روی فولاد ساده کربنی Ck45 اعمال شد و مقاومت به خوردگی این پوشش‌ها توسط دو روش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و اسپکتروسکوپی امپدانس الکتروشیمیایی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان گفت که غلظت افزودنی سدیم کربنات روی خواص پوشش‌های اعمالی تأثیر به‌سزایی دارد چرا که با تغییر ولتاژ جرقه‌زنی، ماهیت و مورفولوژی پوشش نهایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با افزایش

### References:

- 1- L. Tonks & I. Langmuir, "A general theory of the plasma of an arc", Physical review, Vol. 34(6), pp. 876-877, 1927.
- 2- M. Aliofkhaezrai & A.S. Rouhaghdam, Fabrication of nanostructures by plasma electrolysis, John Wiley & Sons, 2010.
- 3- R.B. Heimann, Plasma-spray coating: principles and applications. John Wiley & Sons, 2008.
- 4- Z. Bo, Y. Yang, J. Chen, K. Yu, J. Yan, & K. Cen, "Plasma-enhanced chemical vapor deposition synthesis of vertically oriented graphene nanosheets", Nanoscale, Vol. 5(12), pp. 5180-5204, 2013.
- 5- X. Yang, X. Ding, G. Hao, Y. Liang, & J. Lin, "Cathodic Plasma Electrolysis Processing for Metal Coating Deposition", Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol. 37(1), pp. 177-187, 2017.
- 6- R.O. Hussein, X. Nie, & D.O. Northwood. "Plasma electrolytic oxidation coatings on Mg-alloys for improved wear and corrosion resistance." Corrosion: Material Performance and Cathodic Protection, Vol. 99, pp. 133-134, 2017.
- 7- N. Lin, R. Xie, P. Zhou, J. Zou, Y. Ma, Z. Wang, & W. Tian, "Review on improving



wear and corrosion resistance of steels via plasma electrolytic saturation technology”, Surface Review and Letters, Vol. 23(04), pp. 163-165, 2016.

۸- ف. مومنی، س. م. موسوی خوئی، بررسی خواص پوشش فلزی روی ایجاد شده بر روی فولاد کم کربن در دو الکترولیت سولفات و قلیایی توسط روش پلاسمای الکترولیتی اشباع، مجله علمی پژوهشی مواد نوین، دوره ۶، شماره ۲۳، بهار ۱۳۹۶، صفحه ۱۸-۱.

9- X.Z. Hua, L. Zhou, X. Cui, A.H. Zou, W.B. Xu, and X.L. Zhou, "The Effect of Ammonia Water on the Microstructure and Performance of Plasma Electrolytic Saturation Nitriding Layer of 38CrMoAl Steel", Physics Procedia, Vol. 50, pp. 304-314, 2013.

10- S.A. Kusmanov, Y.V. Kusmanova, A.R. Naumov, & P.N. Belkin, "Features of anode plasma electrolytic nitrocarburising of low

carbon steel”, Surface and Coatings Technology, Vol. 272, pp. 149-157, 2015.

11- B. Bhushan, Modern tribology handbook. 2. Materials, coatings, and industrial applications: CRC Press, 2001.

12- P. Taheri, M. Aliofkhaezrai, C. Dehghanian, & A. Sabour Rouhaghdam, "Corrosion properties of plasma electrolytic coated samples”, Anti-Corrosion Methods and Materials, Vol. 54(3), pp. 148-154, 2007.

13- J.H. Kong, M. Okumiya, Y. Tsunekawa, T. Takeda, K.Y. Yun, M. Yoshida, and S.G. Kim, "Surface modification of SCM420 steel by plasma electrolytic treatment", Surface and Coatings Technology, Vol. 232, pp.275-282, 2013.