



## تأثیر دمای حمام آبکاری بر میکروساختار و رفتار خوردگی پوشش کامپوزیتی Zn-Co تقویت شده توسط ذرات $Al_2O_3$

پریسا زندی<sup>1</sup>، هادی ابراهیمفار<sup>2\*</sup>، فرهاد محسنی فر<sup>3</sup>

1- کارشناس ارشد، بخش مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان  
 2- دانشیار، بخش مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان  
 3- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، مجتمع آموزش عالی بم، بم  
 \* کرمان، صندوق پستی 76315-117، H.ebrahimifar@kgut.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله:

در تحقیق حاضر اثر دمای حمام آبکاری (30، 35 و 40°C) روی میکروساختار و رفتار خوردگی پوشش کامپوزیتی Zn-Co- $Al_2O_3$  ایجاد شده روی زیرلایه فولادی St37 بررسی شد. میکروساختار و مورفولوژی سطح نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی مقاومت به خوردگی نمونه بدون پوشش و نمونه‌های پوشش‌دار در محلول آبی 3.5 wt% NaCl، از آزمون‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) استفاده شد. بررسی میکروساختار پوشش‌ها نشان داد که پوشش تشکیل شده در دمای 40°C نسبت به سایر پوشش‌ها از انسجام و یکنواختی بیشتری برخوردار است. علاوه بر این درصد ذرات  $Al_2O_3$  در پوشش در این دما بیشترین مقدار ممکن است. اثر مثبت پوشش در افزایش مقاومت به خوردگی فولاد برای پوشش تشکیل شده در دمای 40°C نسبت به سایر پوشش‌ها چشمگیرتر است. در این حالت مقاومت پلاریزاسیون و دانسیته جریان خوردگی بدست‌آمده از آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک برای این پوشش نسبت به سایر پوشش‌ها به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار خود را دارد. ظرفیت پوشش تشکیل شده در دمای 40°C نسبت به سایر پوشش‌ها در آزمون طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی نیز مقاومت به خوردگی بالاتر این پوشش را تأیید نمود.

دریافت: 1403/10/01

پذیرش: 1403/12/13

### کلیدواژگان

پوشش کامپوزیتی Zn-Co- $Al_2O_3$ ، دما، خوردگی، پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی

## The effect of electroplating temperature on microstructure and corrosion behavior of $Al_2O_3$ particles reinforced Zn-Co composite coating

Parisa Zandi<sup>1</sup>, Hadi Ebrahimifar<sup>2\*</sup>, Farhad Mohsenifar<sup>3</sup>

1- Department of Materials Engineering and Metallurgy, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran  
 2- Department of Materials Engineering, Faculty of Mechanical and Materials Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran  
 3- Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Higher Education Complex of Bam, Bam, Kerman, Iran  
 \* P.O.B. 76315-117, Kerman, Iran, H.ebrahimifar@kgut.ac.ir

### Keywords

Zn-Co- $Al_2O_3$  composite coating,  
 Temperature,  
 Corrosion,  
 Potentiodynamic polarization,  
 Electrochemical impedance spectroscopy

### Abstract

In the present study, the effect of bath temperature (30, 35, and 40°C) on the microstructure and corrosion behavior of the Zn-Co- $Al_2O_3$  composite coating deposited on St37 steel substrate was investigated. The microstructure and corrosion behavior of the coating were studied by changing the bath temperature during electroplating. The coatings were deposited at 30, 35, and 40°C. The microstructure and surface morphology of the samples were investigated by scanning electron microscopy (SEM). Potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) tests were performed in a 3.5 wt% NaCl aqueous solution to investigate the corrosion resistance of the uncoated and coated samples. The microstructural examination of the coatings revealed that the coating formed at 40°C had more cohesion and uniformity than the other coatings. Furthermore, the percentage of  $Al_2O_3$  particles in the coating was maximum at this temperature. The positive effect of the coating on enhancing the corrosion resistance of the steel was more pronounced for the coating formed at 40°C compared to the others. In this case, the polarization resistance obtained from the potentiodynamic polarization test was the highest, while the corrosion current density was the lowest for this coating compared to the others. The lower capacitance of the coating formed at 40°C compared to the other coatings in the electrochemical impedance spectroscopy test also confirmed the higher corrosion resistance of this coating.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Zandi, P., Ebrahimifar, H., Mohsenifar, F., "The effect of electroplating temperature on microstructure of corrosion behavior of  $Al_2O_3$  particles reinforced Zn-Co composite coating," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 11, No. 3, pp.2563-2568, 2025. <https://doi.org/10.22068/jstc.2025.2048599.1908>

## 1- مقدمه

همرسوبی ذرات خنثی با پوشش‌های فلزی در حین فرآیند آبکاری منجر به توسعه پوشش‌های کامپوزیتی زمینه فلزی در دهه اخیر شده است [1-3]. خواص پوشش‌های کامپوزیتی نه تنها به اندازه، ماهیت، غلظت و توزیع ذرات در زمینه فلزی، بلکه به پارامترهای آبکاری از قبیل pH، دما و چگالی جریان نیز وابسته است [4]. از ویژگی‌های بارز روش آبکاری الکتریکی می‌توان به توزیع یکنواخت ذرات، نرخ رسوب بالا و دمای عملیاتی پایین اشاره نمود. علاوه بر این کنترل ریزساختار و ترکیب شیمیایی در این روش نسبتاً آسان است [5].

ذرات تقویت‌کننده در پوشش کامپوزیتی می‌توانند خواص مکانیکی، خوردگی و سایشی پوشش را بهبود دهند. بسته به نوع پوشش این ذرات می‌توانند کاربردی ( $TiC$ ,  $SiC$ , ...)، اکسیدی ( $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $TiO_2$ , ...) و .. باشند. به طور کلی کاربردها در جایی که مقاومت به سایش و سختی بالا نیاز است بکار می‌روند. اکسیدها نیز علاوه بر افزایش سختی سطح جهت افزایش مقاومت به خوردگی و مقاومت به اکسیداسیون در دمای بالا به کار می‌روند [6]. یکی از مهمترین پارامترهایی که بر روی غلظت ذرات رسوب‌کرده در پوشش، اندازه کریستالی، رفتار خوردگی و خواص مکانیکی پوشش تأثیر می‌گذارد دمای حمام آبکاری است [7, 8]. شو [9] و همکارانش با بررسی پوشش آلیاژی Ni-Co-P نشان دادند که با افزایش دما ابتدا میزان نشست ذرات افزایش و سپس کاهش پیدا می‌کند. بوچات [10] با بررسی پوشش نیکل-فسفر نشان داد که میزان فسفر موجود در پوشش بدست‌آمده با افزایش دما افزایش می‌یابد. کریشا [11] و همکارانش مطالعه‌ای در مورد تأثیر دمای رسوب‌گذاری در فرآیند آبکاری آلیاژهای روی-کبالت-آهن در حمام‌های سولفاتی انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش دمای حمام منجر به افزایش دانسیته جریان می‌شود زیرا دمای بالاتر ویسکوزیته محلول را کاهش می‌دهد و باعث ایجاد مقاومت کمتری در برابر حرکت یون‌ها و تشکیل جریان می‌شود. افزایش دانسیته جریان نیز باعث افزایش رسوب‌گذاری و در نتیجه افزایش ضخامت پوشش آلیاژی می‌شود.

مقدار ذرات سرامیکی در پوشش کامپوزیتی نیز به شدت به دمای حمام آبکاری وابسته است. شمس‌الهدایی [12] و همکارانشان و همچنین مکبر [13] و همکارانش تأثیر دمای حمام آبکاری را روی درصد ذرات  $TiO_2$  رسوب‌کرده در زمینه Zn بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که در یک دمای بهینه مقدار ذرات  $TiO_2$  رسوب‌کرده بیشینه است و پس از آن با افزایش دما مقدار این ذرات در پوشش کاهش می‌یابد. این موضوع به اثر دوگانه دما روی مقدار ذرات در پوشش مربوط است. در حقیقت در ابتدا با افزایش دما، مقدار رسوب ذرات در پوشش به دلیل افزایش فعالیت ذرات بیشتر می‌شود. کاهش مقدار ذرات در پوشش در دماهای بالاتر نیز به کاهش بازده جریان در دماهای بالاتر نسبت داده شده است.

دمای حمام آبکاری یکی از پارامترهای اثرگذار روی مقاومت به خوردگی یک پوشش کامپوزیتی است. تغییر دمای حمام آبکاری منجر به تغییر میکروساختار و ترکیب شیمیایی پوشش شده و در نتیجه پوشش کامپوزیتی در دماهای مختلف رفتار خوردگی متفاوتی خواهد داشت [14].

با توجه به مطالعات صورت گرفته و بررسی‌های انجام شده، تاکنون پوشش  $Zn-Co-Al_2O_3$  بر روی زیر لایه فولادی St37 ایجاد نشده است. انتظار می‌رود حضور اکسید آلومینیوم خواص پوشش را بهبود بخشد. هدف از تحقیق حاضر ساخت پوشش کامپوزیتی  $Zn-Co-Al_2O_3$  به روش رسوب‌دهی الکتریکی با استفاده از جریان مستقیم و بررسی تأثیر دمای حمام آبکاری بر میکروساختار و رفتار خوردگی پوشش بود.

## 2- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از فولاد St37 به عنوان زیرلایه برای پوشش‌دهی استفاده شد. ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول 1 آورده شده است. نمونه‌های آزمایش با ابعاد  $10 \times 10$  میلی‌متر از یک ورق فلزی به ضخامت 3 میلی‌متر بریده شدند. قبل از عملیات پوشش‌دهی نمونه‌ها به ترتیب توسط سنباده‌های شماره 220، 400، 600، 800 و 1200 پولیش شدند. سپس چربی‌زدایی التراسونیک نمونه‌ها در استون انجام شد و در ادامه قبل از آبکاری، نمونه‌ها به مدت 70 ثانیه در محلول اسیدسولفوریک 10٪ الکترولیز شدند. بعد از هر مرحله نمونه‌ها توسط آب مقطر دی‌یونیزه شده شستشو شدند.

آند مورد استفاده در سل آبکاری از جنس پلاتین و فاصله آن با کاتد 3 سانتی‌متر بود. ترکیب حمام آبکاری جهت ایجاد پوشش در جدول 2 ارائه شده است. 100 cc الکترولیت برای آبکاری هر نمونه استفاده شد. منبع تغذیه DC مورد استفاده جهت انجام آبکاری مدل PROVA8000 بود. جهت پوشش‌دهی دمای حمام آبکاری 30، 35 و  $40^\circ C$  انتخاب شد. جهت تنظیم pH الکترولیت از محلول سود (NaOH) و اسید سولفوریک 10٪ استفاده شد. همچنین جهت اندازه‌گیری pH قبل، حین و بعد از آبکاری از pH متر مدل Hanna-pH209 استفاده شد.

مورفولوژی سطح نمونه‌های پوشش داده شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Camscan MV2300 مجهز به آنالیزور EDX بررسی شد. رفتار خوردگی نمونه‌های بدون پوشش و پوشش داده شده توسط آزمون-های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی مورد ارزیابی قرار گرفت. این آزمون‌ها توسط یک سیستم سه الکترودی شامل یک الکترود پلاتینی به عنوان الکترود کمکی، نمونه‌های آزمایش (بدون پوشش و پوشش داده شده) به عنوان الکترود کاری و یک الکترود کالومل اشباع (SCE) به عنوان الکترود مرجع انجام شدند. از یک پتانسیواستات EG&G جهت جمع‌آوری داده‌های خوردگی استفاده شد. همه آزمون‌ها در محلول  $NaCl$  3.5 wt% انجام شدند. همه نمونه‌های بدون پوشش و پوشش داده شده جهت انجام آزمون‌های خوردگی مانع گرم شدند تا اطمینان حاصل شود که فقط سطح مقطعی معادل با  $10 \times 10$  میلی‌متر از آن‌ها در معرض محلول خورنده قرار گیرد. قبل از شروع آزمون‌های خوردگی جهت پایداری نمونه‌ها، آن‌ها به مدت یک ساعت در محیط خورنده غوطه‌ور شدند. جهت انجام آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، روبش پتانسیل با نرخ  $1 mVs^{-1}$  در جهت‌های کاتدی و آندی انجام شد. طیف امپدانس الکتروشیمیایی نمونه‌ها نیز با ثبت داده‌ها در پتانسیل خوردگی و در بازه فرکانسی 0.01 Hz تا 100 KHz بدست آمد. جهت جمع‌آوری داده‌ها دستگاه پتانسیواستات به یک کامپیوتر مجهز به نرم‌افزار Powersuite متصل شد. سپس داده‌های آزمون‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و امپدانس الکتروشیمیایی ثبت‌شده توسط این نرم‌افزار جهت تحلیل به ترتیب به نرم-افزارهای Corrview و Zview منتقل شدند.

جدول 1 ترکیب شیمیایی فولاد St37

Table 1 Chemical composition of AISI 430 steel

عنصر	C	Cr	Mn	Si	S	P	Fe
درصد وزنی	0.12	17.4	0.92	0.85	0.02	0.02	بالانس

همانگونه که مشاهده می‌شود مورفولوژی پوشش تشکیل شده در دمای  $30^\circ C$  دارای دانه‌های منظم کروی می‌باشد. با افزایش دما دانه‌های بلوری ریزتر می‌شوند و چینش ذرات بلوری نامنظم‌تر و مورفولوژی به حالت گل کلمی در می‌آید. جدول 3 ترکیب شیمیایی پوشش‌های تشکیل شده در حمام‌های با دمای مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش دمای حمام از  $30^\circ C$  تا  $35^\circ C$  مقدار ذرات آلومینا در پوشش افزایش می‌یابد اما در حمام با دمای بالاتر ( $40^\circ C$ ) مجدداً درصد ذرات آلومینا کاهش می‌یابد.

نتایج تحقیقات قبلی نشان می‌دهد که با افزایش دمای الکترولیت، به دلیل افزایش انرژی جنبشی یون‌ها، فعالیت ذرات در الکترولیت بیشتر می‌شود. این موضوع برای رسوب همزمان ذرات در پوشش مفید است. از طرفی افزایش بیش از حد دما منجر به کاهش پتانسیل اضافی و میدان‌های الکتریکی اطراف کاتد شده و در نتیجه کسر وزنی ذرات در پوشش کاهش می‌یابد [15]. از آنجا که هر سیستم کامپوزیتی دارای پارامترهای رسوب‌دهی خاصی است و از سوی دیگر این پارامترها خود تابع دما هستند، بنابراین هر سیستم کامپوزیتی دارای دمای بهینه خاصی برای رسوب‌دهی است. با تغییر دمای رسوب‌دهی ترکیب شیمیایی سطحی ذرات، ویسکوزیته الکترولیت و میزان رسوب فلزی نیز تغییر می‌کنند. در آبکاری پوشش‌های کامپوزیتی، یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار بر خواص پوشش، تغییرات دمای حمام آبکاری می‌باشد. تغییرات دمایی با تأثیرگذاری بر روی مکانیزم جوانه‌زنی و رشد دانه‌ها و همچنین با تأثیرگذاری بر روی سرعت واکنش‌ها و میزان تحرک ذرات در داخل سوسپانسیون باعث تغییر خواص پوشش تولید شده خواهد شد.

به طور کلی افزایش دما می‌تواند باعث بروز دو رفتار متفاوت در آبکاری شود. به گونه‌ای که با افزایش دما، نیروی محرکه ترمودینامیکی برای تبلور (جوانه‌زنی) به دلیل افزایش اندازه جوانه بحرانی کاهش می‌یابد، پس دانسیته جوانه‌ها کاهش یافته و دانه‌ها درشت می‌شوند [16, 17]، اما از طرفی با افزایش دما نیروی محرکه سینتیکی افزایش یافته و منجر به افزایش نرخ هسته‌گذاری می‌شود (به دلیل افزایش سرعت نفوذ اتمی) و در نتیجه باعث کاهش اندازه دانه می‌شود [18]. نکته دیگری که باید در نظر گرفت این است که افزایش دمای حمام باعث افزایش نفوذ شده و میزان تخلیه لایه مجاور کاتد از فلز فعال‌تر (در اینجا فلز روی) کمتر می‌شود و میزان این فلز در پوشش افزایش و میزان فلز نجیب‌تر (در اینجا کبالت) در پوشش کاهش می‌یابد، این رفتار نشان می‌دهد که آبکاری تا حدی توسط انتقال جرم کنترل می‌شود [19].

تغییرات دما باعث تغییر پلاریزاسیون و نفوذ می‌شود و به علت اینکه این دو پدیده دارای اثر متضادی هستند باعث پیچیدگی بررسی اثر تغییرات دما می‌شود. اگر در یک سیستم آبکاری رسوب کمتر فلز نجیب‌تر نشانه‌ی پلاریزاسیون بالای فلز باشد پس با افزایش دما که موجب کاهش پلاریزاسیون می‌شود باید رسوب‌گذاری فلز نجیب‌تر افزایش یابد. از طرف دیگر همانگونه که در بالا توضیح داده شد افزایش دمای حمام باعث افزایش نفوذ شده و میزان تخلیه لایه مجاور کاتد از فلز فعال‌تر کمتر می‌شود پس باید میزان فلز فعال‌تر در پوشش بیش‌تر شود. بنابراین با توجه به اثر عکسی که در اثر افزایش دما توسط دو عامل گفته شده ایجاد می‌شود، پیش بینی اثر دما بر یک سیستم آبکاری بسیار مشکل است و ممکن است حالات مختلفی رخ دهد [19].

از آنجا که دما بر نرخ رسوب‌گذاری، ترکیب، ظاهر، ساختار و خواص آلیاژها اثر می‌گذارد پس یک عامل مهم است و بیشترین تأثیر را در رسوب آلیاژها دارد. به طور کلی با افزایش دما نفوذ یون‌های فلزی از الکترولیت به کاتد بهبود می‌یابد [20].

جدول 2 ترکیب شیمیایی حمام آبکاری جهت ایجاد پوشش  $Zn-Co-Al_2O_3$

Table 2 Chemical composition of the electroplating bath of Zn-Co- $Al_2O_3$  coating

ماده	غلظت (g/L)
کلرید روی ( $ZnCl_2$ )	135
کلرید کبالت ( $CoCl_2$ )	13
کلرید پتاسیم (KCl)	193
اسید بوریک ( $H_3BO_3$ )	30
آلومینا ( $\alpha-Al_2O_3$ )	70

### 3- نتایج و بحث

#### 1-1- تأثیر دمای حمام آبکاری روی میکروساختار پوشش $Zn-Co-Al_2O_3$

شکل 1 تصاویر SEM از سطح پوشش‌های ایجاد شده در حمام‌های آبکاری با دماهای مختلف (30، 35 و  $40^\circ C$ ) را نشان می‌دهد.

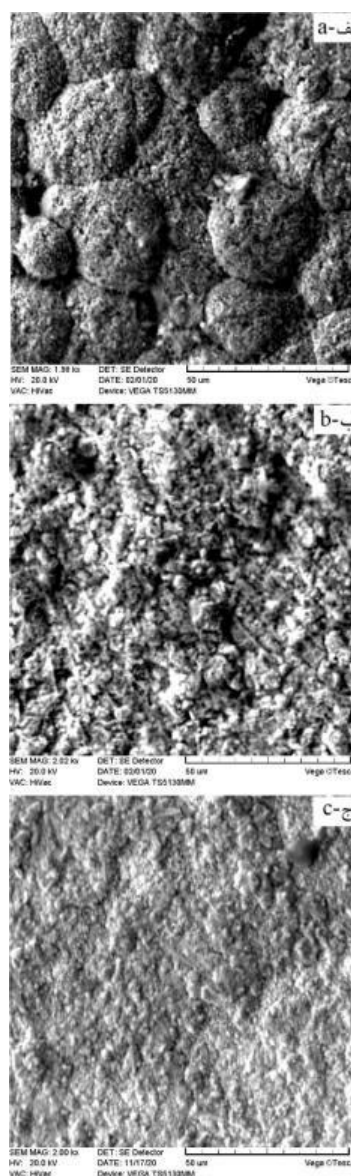


Fig. 1 Surface morphology of Zn-Co- $Al_2O_3$  coating formed at different bath temperature: a)  $30^\circ C$ , b)  $35^\circ C$  and c)  $40^\circ C$

شکل 1 مورفولوژی سطح پوشش  $Zn-Co-Al_2O_3$  تشکیل شده در حمام با دماهای مختلف: الف)  $30^\circ C$ ، ب)  $35^\circ C$  و ج)  $40^\circ C$

**جدول 4** داده‌های الکتروشیمیایی بدست آمده از منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نمونه بدون پوشش و نمونه‌های پوشش داده شده در حمام آبکاری با دماهای مختلف

**Table 4** Electrochemical data derived from potentiodynamic polarization curves of uncoated and coated samples at different bath temperature

پوشش داده شده در دمای 40°C	پوشش داده شده در دمای 35°C	پوشش داده شده در دمای 30°C	بدون پوشش	نمونه
-1088	-1110	-1160	-1351	پتانسیل خوردگی (mV)
2.52	3.06	6.075	44.078	دانشیه جریانی خوردگی ( $\mu A/cm^2$ )
78.695	149.85	95.673	190.5	ثابت تافل کاتدی (mV/decade)
53.625	31.53	51.7	71.78	ثابت تافل آندی (mV/decade)
5495.3	3696.37	2398.95	533.63	مقاومت پلاریزاسیون ( $\Omega.cm^2$ )
94.28	93.05	86.21	-	راندمان حفاظتی پوشش (%)

این موضوع می‌تواند به دلیل حضور ذرات اکسیدی  $Al_2O_3$  در پوشش باشد. بهبود مقاومت به خوردگی در حضور این ذرات ناشی از خنثی بودن این ذرات از نظر شیمیایی است. این ویژگی بیانگر توانایی این ذرات برای مقاومت در برابر اثرات شیمیایی در محیط‌های خورنده است. از میان پوشش‌های اعمال شده پوشش تشکیل شده در دمای 40°C بیشترین اثر را در کاهش چگالی جریان خوردگی نشان داد. با توجه به شکل 1 پوشش تشکیل شده در این دما نسبت به سایر پوشش‌ها میکروساختار منسجم و یکنواخت‌تری دارد. در حقیقت میکروساختار پوشش‌های تشکیل شده در دماهای 30 و 35°C به گونه‌ای است که سطح بیشتری از این پوشش‌ها نسبت به پوشش تشکیل شده در دمای 40°C در تماس با محیط خورنده قرار گرفته و منجر به افزایش چگالی جریان خوردگی پوشش تشکیل شده در این دماها شده است [21, 22].

روش امپدانس الکتروشیمیایی یک ابزار مناسب جهت ارزیابی رفتار خوردگی محسوب می‌شود زیرا این تکنیک اطلاعاتی را در خصوص فصل-مشترک زیرلایه/الکترولیت فراهم می‌کند. منحنی‌های ناپیکوئیس حاصل از امپدانس الکتروشیمیایی برای نمونه‌های آزمایش در محلول کلرید سدیم 3/5٪ در شکل 3 و همچنین منحنی‌های بد و بد- فاز برای این نمونه‌ها در شکل 4 نشان داده شده‌اند.

مدارهای معادل نشان داده شده در شکل 5 جهت فیت نمودن داده‌های امپدانس الکتروشیمیایی نمونه بدون پوشش و نمونه‌های پوشش داده شده استفاده شدند. در این مدارها  $R_s$  مقاومت محلول،  $R_{ct}$  مقاومت انتقال بار زیرلایه، CPEdl ظرفیت لایه مضاعف، W امپدانس واربورگ،  $R_{coat}$  مقاومت پوشش و CPEcoat ظرفیت پوشش است. عنصر فاز ثابت یک انحراف از رفتار دی‌الکتریک ایده‌آل نشان می‌دهد. این انحراف مرتبط با غیریکنواختی و زبری سطح است. در نمودار زاویه فاز بر حسب فرکانس نمونه بدون پوشش و نمونه‌های پوشش داده شده به ترتیب یک پیک و دو پیک مشاهده می‌شود. حضور دو پیک برای

**جدول 3** ترکیب شیمیایی پوشش تشکیل شده در حمام آبکاری با دماهای مختلف  
**Table 3** Chemical composition of the coating formed at different bath temperature

دما (°C)	40	35	30
مقدار کبالت در پوشش (%wt)	2.69	3.18	4.23
مقدار روی در پوشش (%wt)	72.98	71.3	72.66
مقدار آلومینیوم در پوشش (%wt)	2.38	2.75	0.69

### 2-3- تأثیر دمای حمام آبکاری روی رفتار خوردگی پوشش Zn-Co- $Al_2O_3$

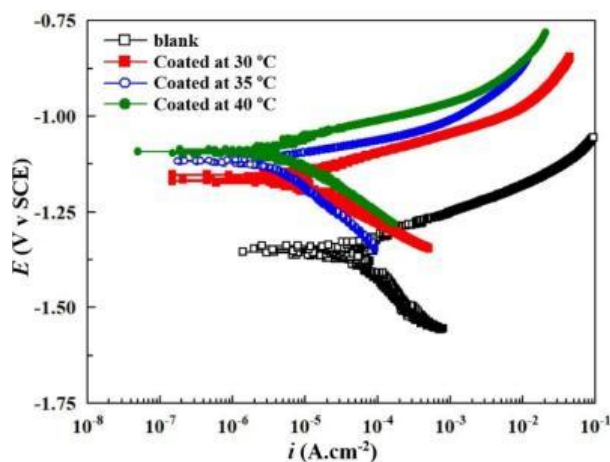
در آزمون‌های خوردگی، چگالی جریان خوردگی به عنوان معیاری از نرخ خوردگی مورد بررسی قرار می‌گیرد، از اینرو پس از رسم نمودارهای پلاریزاسیون و برون‌یابی شیب تافل آندی و کاتدی از این منحنی‌ها، می‌توان چگالی جریان خوردگی و پتانسیل خوردگی را محاسبه نمود و به بررسی رفتار خوردگی پرداخت. مقدار مقاومت پلاریزاسیون ( $R_p$ ) از رابطه 1 بدست می‌آید.

$$R_p = \frac{\beta_a \beta_c}{2.303 i_{corr} (\beta_a + \beta_c)} \quad (1)$$

که در آن  $\beta_a$  و  $\beta_c$  به ترتیب شیب ناحیه آندی و کاتدی تافل و  $i_{corr}$  چگالی جریان خوردگی نمونه است. راندمان حفاظتی ( $\eta$ ) پوشش نیز از رابطه 2 بدست می‌آید که در آن  $i_{corr}$  و  $i'_{corr}$  به ترتیب چگالی جریان خوردگی فولاد St37 بدون پوشش و با پوشش است.

$$\% \eta = \frac{i_{corr} - i'_{corr}}{i_{corr}} \times 100 \quad (2)$$

شکل 2 منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نمونه بدون پوشش و نمونه‌های پوشش داده شده را در دماهای مختلف نشان می‌دهد. داده‌های این منحنی‌ها توسط نرم‌افزار Corview تحلیل شدند و نتایج آن‌ها در جدول 4 آورده شده است. از نتایج جدول 4 مشخص است که چگالی جریان خوردگی برای نمونه‌های پوشش داده شده کمتر از نمونه بدون پوشش است. چگالی جریان خوردگی یک پارامتر مهم جهت ارزیابی سینتیک واکنش خوردگی است و با مقاومت به خوردگی نسبت عکس دارد بنابراین می‌توان گفت که اعمال پوشش Zn-Co- $Al_2O_3$  منجر به کاهش میزان خوردگی نمونه فولادی شده است.



**Fig. 2** Potentiodynamic polarization curves of the tested samples in 3.5 wt% NaCl

شکل 2 منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نمونه‌های آزمایش در محلول 3.5 wt% NaCl

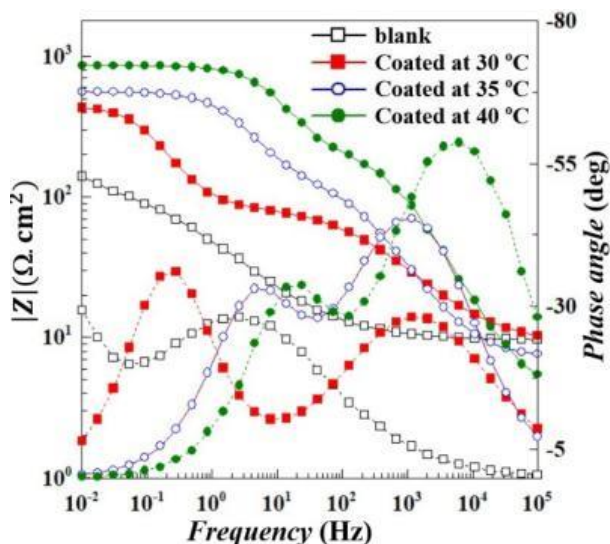


Fig. 4 Bode and Bode-phase curves of the tested samples in 3.5 wt% NaCl

شکل 4 منحنی‌های بد و بد-فاز نمونه‌های آزمایش در محلول 3.5 wt% NaCl

حضور مقادیر بیشتری از ذرات  $Al_2O_3$  در پوشش تشکیل شده در دمای  $40^\circ C$  نسبت به سایر دماها نیز می‌تواند دلیلی بر مقاومت به خوردگی بالاتر این پوشش باشد. در حقیقت در پوشش کامپوزیتی حاوی ذرات اکسیدی  $Al_2O_3$  باید محلول خورنده یک مسیر نیم‌دایره‌ای در اطراف این ذرات را طی نماید تا به سطح زیرلایه برسد، بنابراین با افزایش مقدار این ذرات در پوشش باید محلول خورنده مسافت بیشتری را طی کند و در نتیجه نرخ خوردگی کاهش می‌یابد [25, 26]. علاوه بر این کاهش سطح مؤثر پوشش تشکیل شده در دمای  $40^\circ C$  نسبت به سایر دماها منجر به کاهش سطح در دسترس محیط خورنده و در نتیجه افزایش مقاومت به خوردگی شده است.

جدول 5 داده‌های الکتروشیمیایی بدست آمده از منحنی‌های امپدانس الکتروشیمیایی نمونه بدون پوشش و نمونه‌های پوشش داده شده در حمام آبکاری با دماهای مختلف

Table 5 Electrochemical data derived from electrochemical impedance of uncoated and coated samples at different bath temperature

نمونه	بدون پوشش	پوشش داده شده در دمای $30^\circ C$	پوشش داده شده در دمای $35^\circ C$	پوشش داده شده در دمای $40^\circ C$
W ( $\Omega^{-1}.S^{-0.5}.cm^2$ )	9.64E-3	-	-	-
$R_s$ ( $\Omega.cm^2$ )	9.55	8.99	7.12	4.06
$R_{ct}$ ( $\Omega.cm^2$ )	126	359	446.5	682
CPE- $T_{dl}$ ( $\Omega^{-1}.cm^{-2}.S^n$ )	7.24E-3	4.69E-3	2.98E-4	6.46E-5
CPE- $P_{dl}$ ( $\Omega^{-1}.cm^{-2}.S^n$ )	0.517	0.879	0.828	0.842
$R_{coat}$ ( $\Omega.cm^2$ )	-	75.7	112.6	175.8
CPE- $T_{coat}$ ( $\Omega^{-1}.cm^{-2}.S^n$ )	-	2.08E-4	5.43E-5	7.31E-6
CPE- $P_{coat}$ ( $\Omega^{-1}.cm^{-2}.S^n$ )	-	0.582	0.736	0.818

نمونه‌های پوشش داده شده بیانگر این است که دو پیل الکتروشیمیایی فعال روی سطح این نمونه‌ها تشکیل می‌شود. یک پیل مربوط به خوردگی پوشش است و پیل دیگر مرتبط با خوردگی زیرلایه از طریق ناپیوستگی‌های پوشش است. وجود دو ثابت زمانی در مدار معادل مربوط به این نمونه‌ها نیز این موضوع را تأیید می‌کند. ثابت زمانی اول در فرکانس بالا بیانگر خوردگی پوشش و ثابت زمانی دوم در فرکانس پایین نشان‌دهنده خوردگی از طریق عیوب موجود در پوشش است [23].

نتایج فیت نمودن مدارهای معادل با استفاده از نرم‌افزار Zview در جدول 5 آورده شده است. همانطور که مشخص است نتایج آزمون امپدانس در توافق با نتایج آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک است. شعاع بزرگتر منحنی نایکوئیست برای نمونه پوشش داده شده در دمای  $40^\circ C$  نسبت به سایر نمونه‌ها بیانگر این موضوع است که ساختار پایدار این پوشش از نفوذ الکترولیت به داخل این پوشش جلوگیری می‌کند. ظرفیت پوشش تشکیل شده در دمای  $40^\circ C$  ( $6.46E-5 \Omega^{-1}.cm^{-2}.S^n$ ) نسبت به دماهای  $30^\circ C$  ( $4.69E-3 \Omega^{-1}.cm^{-2}.S^n$ ) و  $35^\circ C$  ( $2.98E-4 \Omega^{-1}.cm^{-2}.S^n$ ) کمتر است. بالاتر بودن ظرفیت پوشش در دماهای  $30^\circ C$  و  $35^\circ C$  نشان‌دهنده جذب بیشتر الکترولیت توسط پوشش در این دماها به دلیل عیوب موجود در این پوشش‌ها است [24].

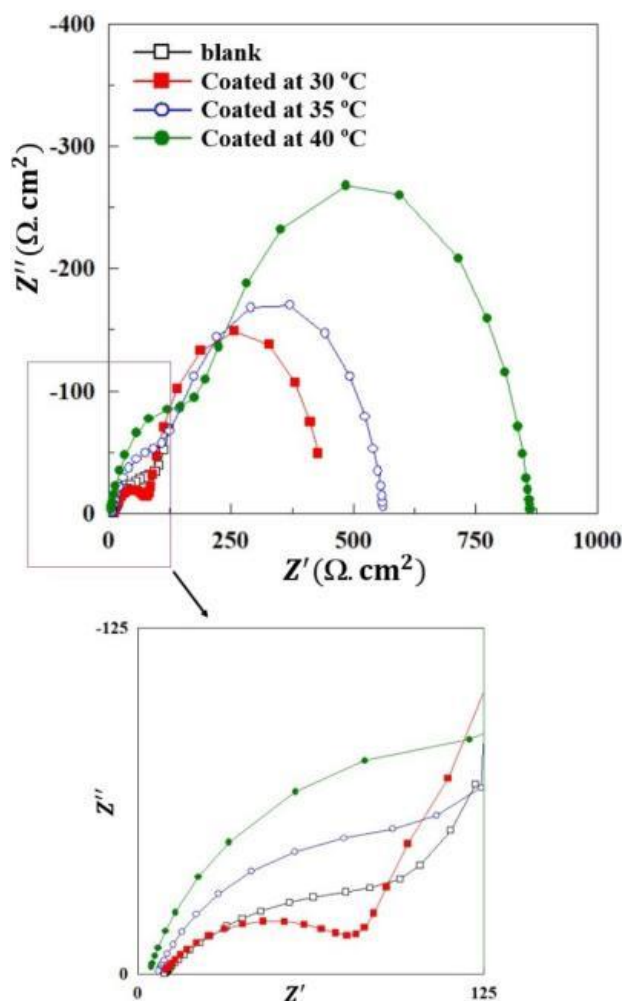


Fig. 3 Nyquist curves of the tested samples in 3.5 wt% NaCl

شکل 3 منحنی‌های نایکوئیست نمونه‌های آزمایش در محلول 3.5 wt% NaCl

- [9] Sheu, H.H., Huang, P.C., Tsai, L.C., Hou, K.H., "Effects of plating parameters on the Ni-P- $Al_2O_3$  composite coatings prepared by pulse and direct current plating," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 235, No. 2, pp. 529-535, 2013.
- [10] Burchardt, T., "The effect of deposition temperature on the catalytic activity of Ni-P alloys toward the hydrogen reaction," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 27, No. 3, pp. 323-328, 2002.
- [11] Al-Duaij, O.K., Abou-Krishna, M.M., Attia, M.I., "Influence of the deposition temperature on the electrodeposition mechanism of Zn-Co-Fe alloy," *International Journal of Electrochemical Science*, Vol. 12, No. 12, pp. 11972-11986, 2017.
- [12] Shamsolhodaei, A., Rahmani, H., Rastegari, S., "Effects of electrodeposition parameters on morphology and properties of Zn- $TiO_2$  composite coating," *Surface Engineering*, Vol. 29, No. 9, pp. 695-699, 2013.
- [13] Mokabber, T., Rastegari, S., Razavizadeh, H., "Effect of electroplating parameters on properties of Zn-nano- $TiO_2$  composite coatings," *Surface Engineering*, Vol. 29, No. 1, pp. 41-45, 2013.
- [14] Taherimanesh, A., Rashidi, A.M., Zangeneh, S., "The effect of bath pH and temperature on the corrosion behavior of Co-electrodeposited Ni-Cu/ $Cr_2O_3$  nanocomposite coatings," *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 29, No. 12, pp. 7863-7871, 2020.
- [15] Kasturibai, S., Kalaigan, G.P., "Pulse electrodeposition and corrosion properties of Ni- $Si_3N_4$  nanocomposite coatings," *Bulletin of Materials Science*, Vol. 37, No. 3, pp. 721-728, 2014.
- [16] Natter, H., Hempelmann, R., "Nanocrystalline metals prepared by electrodeposition," *International journal of research in physical chemistry and chemical physics*, Vol. 222, No. 2-3, pp. 319-354, 2008.
- [17] Turner, D.R., "The effect of temperature on the cathode potential during nickel plating," *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 100, No. 1, pp. 15-21, 1953.
- [18] Rashidi, A., Amadeh, A., "The effect of saccharin addition and bath temperature on the grain size of nanocrystalline nickel coatings," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 204, No. 3, pp. 353-358, 2009.
- [19] Abou-Krishna, M.M., "Electrochemical studies of zinc-nickel codeposition in sulphate bath," *Applied Surface Science*, Vol. 225, No. 4, pp. 1035-1048, 2005.
- [20] Mouanga, M., Ricq, L., Berçot, P., "Electrodeposition and characterization of zinc-cobalt alloy from chloride bath; influence of coumarin as additive," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 202, No. 9, pp. 1645-1651, 2008.
- [21] Belhamra, N., Boulebtina, A.R., Belassadi, K., Chala, A., Diafi, M., "Effect of doping of nanoparticles on the properties of Zn-Ni composite coatings," *Diffusion Foundations*, Vol. 18, pp. 19-26, 2018.
- [22] Vlasa, A., Varsara, S., Pop, A., Bulea, C., Muresan, L.M., "Electrodeposited Zn- $TiO_2$  nanocomposite coatings and their corrosion behavior," *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol. 40, No. 8, pp. 1519-1527, 2010.
- [23] Zhang, X., Wang, F., Du, Y., "Effect of nano-sized titanium powder addition on corrosion performance of epoxy coatings," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 201, No. 16-17, pp. 7241-7245, 2007.
- [24] Srekanth, D., Rameshbabu, N., Venkateswarlu, K., Subrahmanyam, C., Rama Krishna, L., Prasad Rao, K., "Effect of  $K_2TiF_6$  and  $Na_2B_4O_7$  as electrolyte additives on pore morphology and corrosion properties of plasma electrolytic oxidation coatings on ZM21 magnesium alloy," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 222, pp. 31-37, 2013.
- [25] Wang, H., Zhang, R., Yuan, Z., Shu, X., Liu, E., Han, Z., "A comparative study of the corrosion performance of titanium (Ti), titanium nitride (TiN), titanium dioxide ( $TiO_2$ ) and nitrogen-doped titanium oxides (N- $TiO_2$ ), as coatings for biomedical applications," *Ceramics International*, Vol. 41, No. 9, pp. 11844-11851, 2015.
- [26] Mohajeri, S., Dolati, A., Ghorbani, M., "The influence of pulse plating parameters on the electrocodeposition of Ni- $TiO_2$  nanocomposite single layer and multilayer structures on copper substrates," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 262, pp. 173-183, 2015.

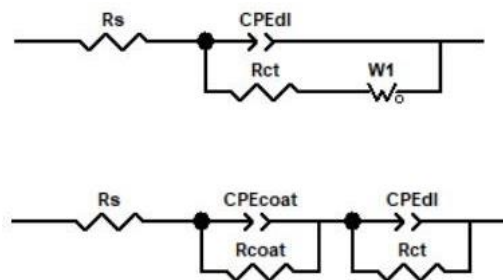


Fig. 5 Equivalent circuit used for the a) uncoated and b) coated samples

شکل 5 مدار الکتریکی مورد استفاده برای الف) نمونه بدون پوشش و ب) نمونه‌های پوشش داده شده

#### 4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر دمای حمام آبکاری (30، 35 و  $40^{\circ}C$ ) روی مورفولوژی و رفتار خوردگی پوشش کامپوزیتی Zn-Co- $Al_2O_3$  تشکیل شده روی فولاد St37 بررسی شد و نتایج زیر بدست آمد:

- 1- با افزایش دمای حمام آبکاری مورفولوژی پوشش کامپوزیتی Zn-Co- $Al_2O_3$  ریزتر و یکنواخت‌تر می‌شود.
- 2- چگالی جریان خوردگی بدست‌آمده از آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در محلول کلرید سدیم 3.5 wt% برای نمونه‌های پوشش داده‌شده در دماهای 30، 35 و  $40^{\circ}C$  کمتر از چگالی جریان خوردگی نمونه بدون پوشش ( $44.078\mu A/cm^2$ ) و به ترتیب برابر با 3.06، 6.075 و  $3.06\mu A/cm^2$  بود.
- 3- نتایج طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) در محلول کلرید سدیم 3.5 wt% نشان داد که پوشش تشکیل شده در دمای  $40^{\circ}C$  نسبت به سایر پوشش‌ها کمترین ظرفیت پوشش و بیشترین مقاومت انتقال بار را دارد.

#### 5- مراجع

- [1] Mirzamohammadi, S., Khorsand, H., Aliofkhaezraei, M., "Mechanical behavior of Ni- $Al_2O_3$  nanocomposite coatings electroplated in the presence of organic compounds," In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 3, pp. 245-254, 2017.
- [2] Gül, H., Kılıç, F., Uysal, M., Aslan, S., Alp, A., Akbulut, H., "Effect of particle concentration on the structure and tribological properties of submicron particle SiC reinforced Ni metal matrix composite (MMC) coatings produced by electrodeposition," *Applied Surface Science*, Vol. 258, No. 10, pp. 4260-4267, 2012.
- [3] Soltani, H., Tavoosi, M., "The comparison in corrosion behavior of Fe-Ni-Cr composite coatings reinforced by SiC nanoparticles and carbon nanotubes," In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 5, pp. 369-376, 2018.
- [4] Akhondzadeh Rahimi, F., Zandrahimi, M., Ebrahimifard, H., "Influence of electroplating parameters on the microstructure and deposition of ceramic particles in Ni-Co- $CeO_2$ - $ZrO_2$  composite coating," In Persian, *Iranian Journal of Ceramic Science & Engineering*, Vol. 9, No. 2, pp. 21-42, 2020.
- [5] Badarulzaman, N.A., Purwadaria, S., Mohamad, A.A., Ahmad, Z.A., "The production of nickel-alumina composite coating via electroplating," *Ionics*, Vol. 15, No. 5, pp. 603-607, 2009.
- [6] Chou, M.C., Ger, M.D., Ke, S.T., Huang, Y.R., Wu, S.T., "The Ni-P-SiC composite produced by electro-codeposition," *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 92, No. 1, pp. 146-151, 2005.
- [7] Rahimi, A., Vaezi, M.R., Yari, M., "Effect of temperature on properties and corrosion behavior of electroplated nickel-graphene composite coating," In Persian, *Journal of Advanced Materials and Technologies*, Vol. 4, No. 4, pp. 19-26, 2016.
- [8] Yu, H., Li, X.J., Zheng, S.J., Xu, W., "Photocatalytic activity of  $TiO_2$  thin film non-uniformly doped by Ni," *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 97, No. 1, pp. 59-63, 2006.