



## ارزیابی خواص مکانیکی و ضد خوردگی پوشش‌های نانوکامپوزیتی PU-SiC

داود رئیسی<sup>۱</sup>، رضا شجاع‌رضوی<sup>۲</sup>، مهرداد طاهران<sup>۳</sup>

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، اصفهان، ایران، صندوق پستی: ۸۵۱۴۱۴۳۱۳۱  
۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، اصفهان، ایران، صندوق پستی: ۸۳۱۴۵-۱۵۵  
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، صندوق پستی: ۸۱۷۴۶-۷۳۴۴۱  
تاریخ دریافت: ۹۴/۱/۱۹ تاریخ پذیرش: ۹۴/۴/۲۱ در دسترس به صورت الکترونیکی از: ۱۳۹۴/۹/۲۰

### چکیده

در این تحقیق، تاثیر نانوذرات کاربید سیلیسیم و روش آماده‌سازی سطح زیرلایه بر خواص مکانیکی و رفتار خوردگی پوشش‌های نانوکامپوزیت PU-SiC با ضخامت حدود ۴۰ میکرومتر بر روی زیرلایه فولاد کم‌کربن مورد ارزیابی قرار گرفت. نانوکامپوزیت‌ها به روش اختلاط محلولی تهیه شدند و زیرلایه با روش‌های ماسه‌پاشی و سنباده‌زنی آماده‌سازی شد. اندازه نانوذرات و پراکندگی آن‌ها با استفاده از تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی و تجزیه و تحلیل پراش پرتو ایکس بررسی گردید. خواص فیزیکی و مکانیکی پوشش‌ها با استفاده از آزمون‌های چسبندگی قدرت‌کندن، ضربه لوله‌ای و سختی سنج مدادی، مورد بررسی قرار گرفت. جهت بررسی تاثیر پوشش‌ها بر خواص خوردگی فولاد از آزمون‌های امپدانس الکتروشیمیایی و پتانسیودینامیک استفاده گردید. جهت بررسی تاثیر نانوذرات بر ساختار پلی‌یورتان از آزمون طیف‌سنجی زیر قرمز تبدیل فوریه استفاده شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد، با افزودن نانوذرات تا ۲ درصد وزنی در پوشش‌های پلی‌یورتان، استحکام چسبندگی تا ۵۰ درصد، سختی از 3H به 5H و مقاومت به ضربه پوشش‌ها حدود ۳۴ درصد افزایش یافت و تغییر چندانی در رفتار خوردگی آن‌ها نسبت به پلی‌یورتان ایجاد نشد. نتایج تجزیه و تحلیل پراش پرتو ایکس و تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی نشان داد نانوذرات تا ۲ درصد وزنی به خوبی در زمینه پلی‌یورتان پراکنده شدند. آماده‌سازی سطح زیرلایه به روش ماسه‌پاشی نسبت به روش سنباده‌زنی استحکام چسبندگی را تا ۳۵ درصد بهبود داد ولی مقاومت به ضربه کمتری در پوشش‌ها ایجاد کرد. واژه‌های کلیدی: نانوکامپوزیت، پلی‌یورتان، کاربید سیلیسیم، استحکام چسبندگی، خوردگی.

## Evaluation of the Mechanical and Anticorrosion Properties of PU-SiC Nanocomposite Coatings

D. Reisi<sup>1</sup>, R. Shojarazavi<sup>2\*</sup>, M. Taheran<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Material Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, P.O.Box:8514143131, Isfahan, Iran

<sup>2</sup> Department of Materials Engineering, Malekashtar University of Technology, P.O.Box: 83145-155, Shahinshahr, Isfahan, Iran

<sup>3</sup> Department of chemistry Engineering, Isfahan University, P.O.Box: 81746-73441, Isfahan, Iran

Received: 01-02-2015

Accepted: 14-07-2015

Available online: 11-12-2015

### Abstract

In this research the effect of silicon carbide nanoparticles and surface pretreatment on the mechanical properties and corrosion protection properties of the polyurethane coatings (40  $\mu\text{m}$  in thickness) were studied on a low carbon steel substrate. The substrates were prepared by polishing and sand blasting methods. Dispersion of the nanoparticles in the polyurethane coating was studied by field emission scanning electron microscope (FE-SEM) image and X-ray diffraction (XRD) analysis. The physical and mechanical properties of the coatings were evaluated by pull-off adhesion, Tubular impact and pencil hardness tester. The Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) and polarization tests were employed in order to investigate the corrosion resistance behavior of the coatings. The effect of nanoparticles on the chemical bonding of polyurethane were investigated using Fourier Transform Infrared Spectrometry (FT-IR) Analysis. The results of the physical and mechanical study showed that the existence of 2 wt% of nanoparticles, leads to the increase of the adhesion strength up to 50%, hardness of coating increased from 3H to 5H and impact resistance were increased about 34%. In addition, the results of electrochemical test showed that the existence of 2 wt% of nanoparticles in polyurethane did not significantly change the corrosion resistance behavior of the polyurethane. The results of field emission scanning electron microscope (FE-SEM) image and X-ray diffraction (XRD) analysis showed that nanoparticles up to 2 wt% were well dispersed in polyurethane. Sand blasting of the specimens prior to coating increased adhesion strength up to 35%, but decreased the impact resistance in compare with polishing. J. Color Sci. Tech. 9(2015), 239-250. Institute for Color Science and Technology.

**Keywords:** Nanocomposites, Polyurethane, Silicon carbide, Adhesive strength, Corrosion.

## ۱- مقدمه

ترکیبات پلی یورتانی ابتدا در اواخر دهه سی میلادی توسط اتوبایر و همکارانش کشف شد و تاکنون پیشرفت‌های زیادی داشته‌اند. به طوری که پلی یورتان‌های متنوعی از نظر نوع حلال و تعداد اجزا تولید شده و در زمینه‌های مختلف صنعتی مورد بهره‌برداری قرار گرفته است [۱]. سازه‌های مورد استفاده در تجهیزات ساحلی و دریایی همواره در معرض عوامل خوردنده نظیر یون‌های خوردنده و اندامگان دریایی قرار دارند [۲]. یکی از روش‌های افزایش طول عمر این تجهیزات در برابر محیط خوردنده دریایی استفاده از پوشش‌های محافظ پلیمری می‌باشد [۳، ۴]. عواملی نظیر مقاومت مکانیکی، استحکام چسبندگی، میزان نفوذپذیری یا تخلخل پوشش و آماده‌سازی سطح زیرلایه، بر طول عمر پوشش‌های پلیمری مورد استفاده در این تجهیزات، تاثیرگذار هستند [۵، ۶]. در این راستا صنایع رنگ و پوشش روز به روز در دنیا رو به رشد است و امروزه همه شرکت‌های بزرگ پوشش و رنگ، بسیاری از تحقیقات خود را برای فرمول‌بندی کردن پوشش‌ها اختصاص داده‌اند. ولی هیچ یک از آن‌ها قادر به رفع همه نیازها در یک فرمول‌بندی تنها نیستند [۷، ۸]. امروزه استفاده از نانوکامپوزیت‌های پایه پلیمری اهمیت بالایی پیدا کرده است [۸]. پوشش‌های پلی یورتان به دلیل پایداری شیمیایی و خواص مکانیکی مناسبی که نسبت به دیگر پوشش‌های پلیمری دارند توجه بسیاری از محققان را به خصوص در ساخت نانوکامپوزیت پایه پلی یورتان به خود جلب کرده‌است. نانوذرات به دلیل برهم‌کنش پذیری بسیار عالی که در مقایسه با حالت میکرو و ماکرو خود دارند، به طور رایج به عنوان تقویت‌کننده در زمینه‌های پلیمری استفاده می‌شود [۹-۶].

لی یو<sup>۱</sup> و همکارانش، با بررسی خواص ساختاری، حرارتی و الکتروشیمیایی پوشش نانوکامپوزیت پلی یورتان-اکسید آهن سیاه، با استفاده از روش‌ها SEM, TEM, EIS نشان دادند، کاهش اندازه نانوذرات مورد استفاده از ۱۵۰ نانومتر به ۶۰ نانومتر، خواص این پوشش‌ها را به طور قابل توجهی بهبود داد [۹].

نانوکامپوزیت‌ها با ایجاد پوشش‌های مقاوم به ضربه و خراش [۱۰-۱۴]، با استحکام چسبندگی مناسب به زیرلایه [۱۵، ۱۶]، رفتار خوردگی بالا [۱۷-۱۹] و خواص الکتریکی مناسب [۲۰، ۹]، در تجهیزات مهم کاربرد فراوانی یافته‌اند [۱۹].

سجادی و همکارانش در تحقیقی نشان دادند حضور نانوذرات الماس اصلاح شده در زمینه پلی‌اکریلیک، سختی و مقاومت به خراش این پوشش‌ها را افزایش داد [۱۰]، رنجبر و رستگار نیز با افزودن نانوذرات سیلیکا با ابعاد ۱۲ نانومتر در پوشش‌های شفاف اتومبیل نیز به همین نتیجه رسیدند [۱۲].

کیومرثی و شجاع رضوی نشان دادند رنگ‌دانه‌های اکسید آهن و اکسید مس، مقاومت به ضربه پوشش‌های کنترل حرارتی سیلیکاتی را بهبود داده‌است [۲۱]. ژای<sup>۲</sup> و همکارانش تاثیر نانوذرات آلومینا، کربنات کلسیم (با ابعاد ۸۰ نانومتر) و سیلیکا با ابعاد ۱۵ نانومتر را بر استحکام چسبندگی چسب‌های اپوکسی مورد ارزیابی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که حضور این نانوذرات، استحکام چسبندگی چسب اپوکسی را افزایش داده و بیشترین افزایش مربوط به نانوکامپوزیت حاوی ۲ درصد وزنی آلومینا است [۱۶].

پلیمی و همکارانش، تاثیر نانوذرات اکسید کرم (III) ( $Cr_2O_3$ ) اصلاح شده با ۳-آمینو پروپیل تری‌متوکسی سیلان<sup>۳</sup> بر رفتار خوردگی پوشش‌های پلی یورتان را با استفاده از آزمون‌های الکتروشیمیایی امپدانس و پلاریزاسیون، مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند حضور ۱ درصد وزنی از این نانوذرات باعث بهبود رفتار خوردگی این پوشش‌ها شده است [۱۹] در تحقیقی مشابه درویش و همکاران، نشان دادند افزودن مقدار مشخصی از رنگ‌دانه‌های ضد خوردگی در این پوشش‌ها، رفتار خوردگی پوشش‌ها به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد [۱۵].

کاربید سیلیسیم یکی از سخت‌ترین مواد شناخته شده در جهان است. با توجه به این موضوع، افزودن نانوذرات کاربید سیلیسیم در پوشش‌های پلیمری (در صورت پراکندگی مناسب و ایجاد برهم‌کنش با پلیمر) می‌تواند تاثیر مثبتی بر خواص مکانیکی و فیزیکی آنها داشته باشد. ژو<sup>۴</sup> و همکارانش نشان دادند افزودن نانوذرات کاربید سیلیسیم در پلی یورتان (تولید شده به روش آغاز پلیمریزاسیون از سطح<sup>۵</sup>) و بررسی نمودار تنش-کرنش این پوشش‌ها نشان دادند، خواص مکانیکی این پوشش‌ها به طور قابل توجهی بهبود یافت و همچنین با بررسی سطح پوشش‌ها با استفاده از تصاویر میکروسکوپی نشان دادند پوشش‌ها از نظر ریخت‌شناسی به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد [۲۲] جی<sup>۶</sup> و همکاران نشان دادند حضور نانوذرات کاربید سیلیسیم در پوشش‌های اپوکسی خواص سایشی این پوشش‌ها را بهبود می‌دهد [۲۳]. چیشلم<sup>۷</sup> و همکارانش با بررسی نمودار تنش-کرنش پوشش‌های اپوکسی-نانوکاربید سیلیسیم نشان دادند، حضور این نانوذرات تنش تسلیم و مدول پوشش‌ها را افزایش می‌دهد [۲۴]. ولی تاکنون در مورد تاثیر این نانوذرات نیمه‌هادی بر رفتار خوردگی پوشش‌های پلی یورتان مطالعه‌ای انجام نشده است. به طور کلی، تغییر رفتار خوردگی این پوشش‌ها می‌تواند به میزان افزایش هدایت الکتریکی پوشش‌ها در حضور نانوذرات نیمه‌هادی [۲۰، ۹] کاربید

2- Zhai

3- 3-amino propyl trimethoxy silane

4- Guo

5- Surface-initiated polymerization

6- Ji

7- Chisholm

1- Liu

جدول ۲: مشخصات اجزاء پوشش مورد استفاده.

رزین	نسبت حجمی	نوع رزین	چگالی مخلوط (g/cm <sup>3</sup> )	درصد حجمی جامد مخلوط
پلی‌ال	۲	اکریلیک	۱,۲	۶۰
ایزوسیانات	۱	هگزامتیل دی‌ایزوسیانات		

از محلول کوپلیمری BYK@110 محصول شرکت BYK، کشور آلمان، جهت توزیع نانوذرات استفاده شد، زنجیره پلیمری این محلول دارای دو سر قطبی و غیرقطبی می‌باشد که سمت غیرقطبی با قرار گرفتن در خلل و فرج نانوذرات باعث درگیر شدن با ذرات می‌شوند و سمت قطبی آن جذب زنجیره‌های پلیمری می‌شود و از تجمع نانوذرات جلوگیری می‌شود. زیرلایه نیز فولاد کم کربن ST12 (جدول ۳)، با ضخامت ۱ میلی‌متر و ابعاد ۱۰ cm × ۱۰ cm ساخت شرکت فولاد مبارکه اصفهان انتخاب شد. از مخلوط بوتیل استات و زایلین (به نسبت برابر) ساخت شرکت Merck، به عنوان حلال در رزین و از استون و زایلین نیز جهت چربی‌زدایی و شست‌وشوی تجهیزات استفاده گردید.

جدول ۳: درصد عناصر در زیرلایه فولادی.

عناصر تشکیل‌دهنده	Fe	C	Si	Mn	P	S	Al
درصد	۷۶,۷۸	۰,۱۵	۰,۱۶	۰,۴۱	۰,۰۳۵	۰,۰۱۴	۰,۰۳۴

## ۲-۲- روش کار

### ۲-۲-۱- آماده‌سازی سطح زیرلایه

در این تحقیق سطح زیرلایه به دو روش سنباده‌زنی و ماسه‌پاشی آماده‌سازی شد و سپس با آب گرم، محلول شوینده و در نهایت با حلال استن و زایلین چربی‌زدایی گردید. در روش سنباده‌زنی، نمونه‌ها با سنباده‌های ۲۰۰ تا ۶۰۰ در دو جهت عمود بر هم آماده‌سازی شد. در روش ماسه‌پاشی، درجه آماده‌سازی سطح Sa 2 1/2 ایجاد گردید، به این صورت که ابتدا سطح فولاد مورد استفاده با محلول شوینده و استن چربی‌زدایی شد، سپس تحت پاشش گلوله‌های ماسه با ابعاد کمتر از ۰,۶ میلی‌متر، با فشار ثابت قرار گرفت [۲۹]. مشخصات سطوح آماده‌سازی شده در جدول ۴ نشان داده شده است.

سیلیسیم، ساخت واژه ایجاد شده در سطح پوشش‌ها، تغییرات در استحکام چسبندگی پوشش، اتصالات عرضی زنجیره‌های پلیمری در نانوکامپوزیت‌ها و آماده‌سازی سطح زیرلایه، بستگی داشته باشد [۲۵].

ماویناکولی<sup>۱</sup> و همکارانش، نشان دادند افزودن نانوذرات کاربید سیلیسیم در پوشش‌های پلی‌پیرول<sup>۲</sup> هدایت الکتریکی این پوشش‌ها را در دماهای متفاوت، به مقادیر مختلف افزایش داد [۲۶]. ژن‌یو<sup>۳</sup> و همکارانش، با ساخت نانوکامپوزیت پلی‌یورتان-اکسید روی و بررسی رفتار خوردگی و ساختار این پوشش‌ها، نشان دادند با کاهش تخلخل‌های سطحی در حضور نانوذرات، رفتار خوردگی پوشش‌ها بهبود یافت [۲۷]. فاتح‌الحسینی و منیعی با بررسی تاثیر آماده‌سازی سطح زیرلایه فولاد ضد زنگ ۳۱۶ کم کربن بر خواص خوردگی آن، نشان دادند افزایش زبری سطح فولاد باعث کاهش مقاومت به خوردگی آن می‌گردد [۲۸].

با توجه به مطالب ذکر شده و بررسی مشکلات تحقیقات انجام شده، هدف از انجام این تحقیق عبارت است از: بهبود استحکام چسبندگی، مقاومت در برابر ضربه و سختی پوشش‌های پلی‌یورتان، با افزودن نانوذرات کاربید سیلیسیم به این پوشش‌ها، بررسی تاثیر آماده‌سازی سطح زیرلایه بر این خواص و همچنین بررسی تاثیر نانوذرات کاربید سیلیسیم و آماده‌سازی سطح زیرلایه بر رفتار خوردگی پوشش‌ها.

## ۲- بخش تجربی

### ۲-۱- مواد

در این تحقیق از نانوذرات کاربید سیلیسیم با ابعاد ۴۰-۶۰ نانومتر محصول شرکت US Research کشور آمریکا با مشخصات جدول ۱، به عنوان فاز تقویت‌کننده و از پوشش پلی‌یورتان شفاف دو جزئی پایه حلال محصول شرکت Mipa، کشور آلمان، به عنوان زمینه نانوکامپوزیت استفاده گردید. این پوشش‌ها شامل رزین اکریلیک با نام تجاری Mipa C 210 و عامل پخت هگزامتیل دی‌ایزوسیانات با نام تجاری Hardener mipa 2k MS10 و مشخصات جدول ۲ استفاده گردید.

جدول ۱: مشخصات نانوذرات کاربید سیلیسیم مورد استفاده.

نانوذره	خلوص (درصد)	سطح ویژه (m <sup>2</sup> /g)	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	شکل ظاهری
SiC	>۹۹	۹۰	۳,۲۲	تقریباً کروی

- 1- Mavinakuli
- 2- Polypyrrrole
- 3- Zhen Yu

±۴۰ میکرومتر اندازه‌گیری شد. مشخصات نمونه‌های تهیه شده در جدول ۵ نشان داده شده است.

### ۲-۲-۳- تجهیزات ارزیابی و مشخصه یابی

در این پژوهش ضخامت پوشش‌های اعمال شده بر روی زیرلایه‌های فولادی به روش غیرمخرب و با استفاده از دستگاه ضخامت‌سنج مدل الکومتر ۴۵۶<sup>۴</sup> ساخت کشور انگلستان و طبق استاندارد ASTM D1186، اندازه‌گیری شد [۳۰]. مشخصات سطوح آماده‌سازی شده با استفاده از دستگاه مدل PS1 ساخت شرکت ماهر<sup>۵</sup> آلمان اندازه‌گیری شد. جهت بررسی استحکام چسبندگی پوشش‌ها، از آزمون قدرت کندن<sup>۶</sup> توسط دستگاه Posi test AT-A ساخت کشور آمریکا، طبق استاندارد ASTM D4541 استفاده شد [۳۱]. در این آزمون ابتدا دالی‌های<sup>۷</sup> آلومینیمی و سطح پوشش با سنباده‌های ۲۰۰۰-۱۲۰۰ آماده‌سازی شده، سپس این دو توسط چسب اپوکسی، تحت فشار به هم متصل شده و پس از مدت ۲۴ ساعت (زمان جهت سخت شدن چسب مورد استفاده) توسط دستگاه هیدرولیکی، دالی‌های به پوشش چسبیده از سطح زیرلایه جدا شده و میزان نیروی مورد نیاز جهت جدانمودن پوشش از سطح زیرلایه استحکام چسبندگی پوشش را نشان می‌دهد. مقاومت در برابر ضربه پوشش‌ها با استفاده از روش ضربه لوله‌ای<sup>۸</sup> توسط دستگاه مدل IMP/3 ساخت شرکت ماکس تکنیک<sup>۹</sup> کشور کانادا و طبق استاندارد ASTM D2794 بررسی گردید [۳۲].

- 1- Heidolph
- 2- Hielscher
- 3- Additive dispersant
- 4- Elecometer 456
- 5- Mahr
- 6- Pull off
- 7- dolly
- 8- Tubular impact
- 9- Maxtechnics

جدول ۴: مشخصات سطوح آماده‌سازی شده.

روش آماده‌سازی سطح	Ra	Rz
سنباده‌زنی	۰,۵۰۱±۰,۰۹	۳,۳۱±۰,۲۰
ماسه‌پاشی	۲,۸۲۱±۰,۱۹	۱۲,۵۱±۰,۹۵

### ۲-۲-۲- تهیه و اعمال پوشش

در این پژوهش پوشش‌های نانوکامپوزیت حاوی ۱، ۲ و ۳ درصد وزنی (نسبت به مجموع رزین و عامل پخت) از نانوذرات کاربید سیلیسیم، به صورت زیر تهیه و اعمال شدند: ابتدا مقدار ذکر شده از نانوذرات را در حلال (به مقدار ۲۰ درصد مجموع جرم دو رزین) به مدت ۴ ساعت بدون تماس با اتمسفر و با استفاده از هم‌زن مغناطیسی ساخت شرکت هایدولف<sup>۱</sup> با سرعت ۱۲۰۰ rpm مخلوط، سپس توسط دستگاه فراصوت (مدل Up 400s)، ساخت شرکت هایلشر<sup>۲</sup>، به مدت ۶۰ دقیقه (بدون تماس با اتمسفر) با نصف توان (۲۰۰ وات) و چرخه ۰,۵ ثانیه، نانوذرات از حالت تجمع یافته خارج شدند. هم‌زمان، افزودنی محلول پراکنه<sup>۳</sup> کوپلمیری BYK@110 به نسبت جرمی برابر با نانوذرات (طبق پیشنهاد از طرف شرکت تولید کننده)، در رزین پلی‌یورتان به مدت ۱۵ دقیقه به وسیله هم‌زن مغناطیسی مخلوط گردید. نانوذرات پراکنده شده (در مرحله قبل)، با رزین حاوی محلول پراکنه به مدت ۲۰ دقیقه مخلوط شد، سپس عامل پخت (رزین حاوی هگزا متیل دی‌ایزوسیانات) به سیستم اضافه و به مدت ۵ دقیقه با هم مخلوط گردید. در مرحله آخر نانوکامپوزیت تولید شده با استفاده از هوای فشرده و دستگاه پاشش، با فاصله ۳۰ سانتی‌متر از سطح زیرلایه و با فشار ۲-۳ اتمسفر، به صورت یکنواخت بر روی زیرلایه اعمال و به مدت یک هفته در دمای ۲۸ درجه و رطوبت حدود ۳۰ درصد خشک گردید. ضخامت پوشش‌های اعمال شده بر روی نمونه‌های فولادی در دو مرحله اندازه‌گیری شد، ابتدا پس از خشک‌شدن سطحی (۲ ساعت) ضخامت حدود ۱۰±۹۰ میکرومتر و پس از سخت شدن نهایی (۷ روز) حدود ۳

جدول ۵: مشخصات نمونه‌های تهیه شده.

کد نمونه	روش آماده‌سازی سطح زیرلایه	درصد نانوذرات SiC(g)	وزن نانوذرات SiC(g)	وزن رزین (g)	وزن عامل پخت (g)	وزن حلال (g)
PUP		۰	۰	۲۰	۱۰	۶
PU1P	سنباده‌زنی	۱	۰,۳۰	۱۹,۸۰	۹,۹۰	۶
PU2P		۲	۰,۶۰	۱۹,۶۰	۹,۸۰	۶
PU3P		۳	۰,۹۰	۱۹,۴۰	۹,۷۰	۶
PUS		۰	۰	۲۰	۱۰	۶
PU1S	ماسه‌پاشی	۱	۰,۳۰	۱۹,۸۰	۹,۹۰	۶
PU2S		۲	۰,۶۰	۱۹,۶۰	۹,۸۰	۶
PU3S		۳	۰,۹۰	۱۹,۴۰	۹,۷۰	۶

شکل بلور (۰,۹)،  $\lambda$  طول موج لوله تولیدکننده پرتو ایکس (۰,۱۵۴ نانومتر)،  $\beta$  پهناي پیک در نصف ارتفاع بیشینه (برحسب واحد طول) و  $\theta$  زاویه پراش می‌باشد.

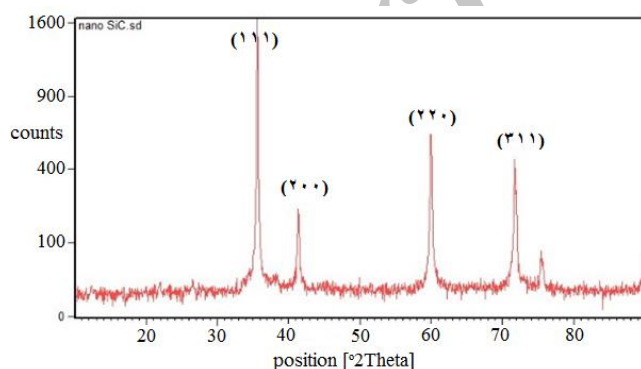
$$\tau = 0.9\lambda / \beta \cos\theta \quad (1)$$

جهت بررسی تأثیر نانوذرات در پیوندهای شیمیایی و ساختار شیمیایی پلی‌یورتان از آزمون طیف‌سنجی زیرقرمز تبدیل فوریه<sup>۷</sup> و دستگاه مدل Tensor27 ساخت شرکت براکر<sup>۸</sup> آلمان، استفاده شد. به دلیل این‌که نمونه‌های استفاده شده در این آزمون به صورت یک لایه پوشش بر روی زیرلایه فولاد بود، از روش کاهش مجموع بازتاب<sup>۹</sup> استفاده گردید.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی پراش پرتو ایکس نانوذرات

جهت بررسی چگونگی پراکندگی نانوذرات در زمینه پلیمر با استفاده از تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی، ابتدا نیاز است که اندازه تقریبی بلورک‌های نانوذرات کاربرد سیلیسیم مورد استفاده، محاسبه و با اندازه ذرات پراکنده شده در پلیمر مقایسه گردد. جهت محاسبه اندازه بلورک‌های این نانوذرات ابتدا بر روی آنها تجزیه و تحلیل پراش پرتو ایکس انجام شد و سپس با استفاده از رابطه شرر، اندازه تقریبی بلورک‌ها محاسبه گردید. نتایج پراش پرتو ایکس از نانوذرات کاربرد سیلیسیم در شکل ۱ نشان داده شده است و اندازه بلورک‌های کاربرد سیلیسیم با استفاده از رابطه شرر (رابطه ۱) ۵۶ نانومتر به دست آمد.



شکل ۱: نتایج تجزیه و تحلیل پراش پرتو ایکس از نانوذرات کاربرد سیلیسیم.

در این آزمون، سمه‌هایی با جرم‌های ۱ و ۲ کیلوگرم از ارتفاع مشخصی در داخل محفظه‌ای استوانه‌ای شکل بر روی نمونه‌های پوشش داده شده رها می‌شود. عدم تخریب پوشش در حادترین شرایط، مقاومت در برابر ضربه آن‌ها را نشان می‌دهد. در این پژوهش رهاسازی وزنه‌ها از ارتفاع ۲۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر و به دو روش ضربه از رو و ضربه از پشت انجام شد. میزان سختی پوشش‌های مورد نظر، توسط سختی‌سنج مدادی<sup>۱</sup> ساخت شرکت ماکس تکنیک کشور کانادا و طبق استاندارد ASTM D3363 انجام پذیرفت [۳۳] در این روش مدادها با سختی‌های 9B-6H با نیرو و سرعت ثابت، جهت ایجاد خراش بر روی نمونه‌های پوشش داده شده حرکت داده می‌شود، سخت‌ترین مدادی که بر روی پوشش خراش ایجاد نکند سختی پوشش را نشان می‌دهد، این روش معمولاً جهت مقایسه سختی پوشش‌ها به کار می‌رود.

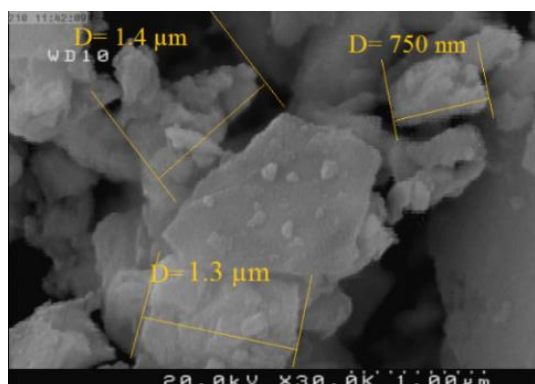
جهت بررسی تأثیر پوشش‌ها بر رفتار خوردگی زیرلایه، از آزمون امپدانس الکتروشیمیایی استفاده گردید. تجهیزات مورد استفاده در این آزمون متشکل از، یک دستگاه پتانسیواستات مدل Parstat2273A ساخت کشور آمریکا و یک سل تخت<sup>۲</sup> سه الکترودی، که شامل الکترود کمکی پلاتین، الکترود مرجع از جنس کالومل اشباع شده و الکترود کاری می‌باشد. بازه بسامد در این آزمون از ۰.۰۱ تا ۱۰۰ هزار هرتز، استفاده شد. داده‌ها در این آزمون توسط نرم‌افزار زدویو<sup>۳</sup> تحلیل و بررسی شد. الکترولیت در این آزمون الکتروشیمیایی، نمک ۳,۵ درصد کلرید سدیم و دمای محلول ۲۸ درجه سانتی‌گراد استفاده شد. زمان غوطه‌وری نمونه‌ها در الکترولیت جهت تثبیت پتانسیل مدار باز ۳۰ دقیقه و سطح تماس الکترود کاری با الکترولیت یک سانتی‌متر مربع استفاده شد. تمامی نمونه‌ها قبل از انجام آزمون الکتروشیمیایی به مدت ۲۴ ساعت در نمک ۳,۵ درصد کلرید سدیم غوطه‌ور شدند.

در این پژوهش جهت بررسی میزان پراکندگی نانوذرات در زمینه پلیمر، از تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی<sup>۴</sup>، با استفاده از دستگاه مدل Hitachi S4160 ساخت شرکت گلدفیلد<sup>۵</sup> و با ولتاژ ۲۰ کیلوولت استفاده شد. جهت بررسی اندازه بلورک‌های کاربرد سیلیسیم از دستگاه پراش پرتو ایکس مدل Pw3040 ساخت شرکت فیلیپس<sup>۶</sup> کشور هلند استفاده گردید. در این آزمون از منبع تابش  $k_{\alpha}$  Cu و با سرعت ۲ درجه بر دقیقه در گستره  $2\theta = 1-90^\circ$  استفاده شد. اندازه متوسط بلورک‌ها، مطابق رابطه شرر (رابطه ۱) [۳۴] و نرم‌افزار Xpert محاسبه شد. در رابطه ۱،  $\tau$  اندازه متوسط بلورک، K ضریب

7- Fourier Transform Infrared Spectroscopy  
8- Bruker  
9- Attenuated total reflectance

1- Pencil hardness  
2- Flat cell  
3- Zview  
4- Field emission scanning electron microscopy  
5- Gold field  
6- Philips

کششی Si—C می‌باشد. قله‌های ایجاد شده در  $2934$  و  $2860\text{ cm}^{-1}$  به ارتعاشات کششی C—H و قله ایجاد شده در  $1722$  و  $1685\text{ cm}^{-1}$  به ارتعاشات کششی C=O نسبت داده شد. همچنین قله‌های ایجاد شده در  $1522$ ،  $1136$ ،  $1250$  و  $1460\text{ cm}^{-1}$  به ترتیب به ارتعاشات کششی C—O، C—C، CO—NH، C—O—C و C—H نسبت داده شدند و قله وسیعی که در  $3369\text{ cm}^{-1}$  ظاهر شده به ارتعاش کششی O—H یا N—H، نسبت داده شده است. این طیف‌ها مربوط به ساختار شیمیایی پلی‌یورتان است [۳۶، ۳۷] و همان‌طور که ملاحظه می‌گردد طیف‌های نانوکامپوزیت ساخته شده همان قله‌های مربوط به پلی‌یورتان خالص را نشان می‌دهد. پس ساختار پایه خود پلی‌یورتان بوده و با حضور نانوذرات کاربرد سیلیسیم تغییری در ساختار آن ایجاد نشده و هرگونه تغییر در خواص پوشش مربوط به تغییر در ساختار پلی‌یورتان نیست [۹].



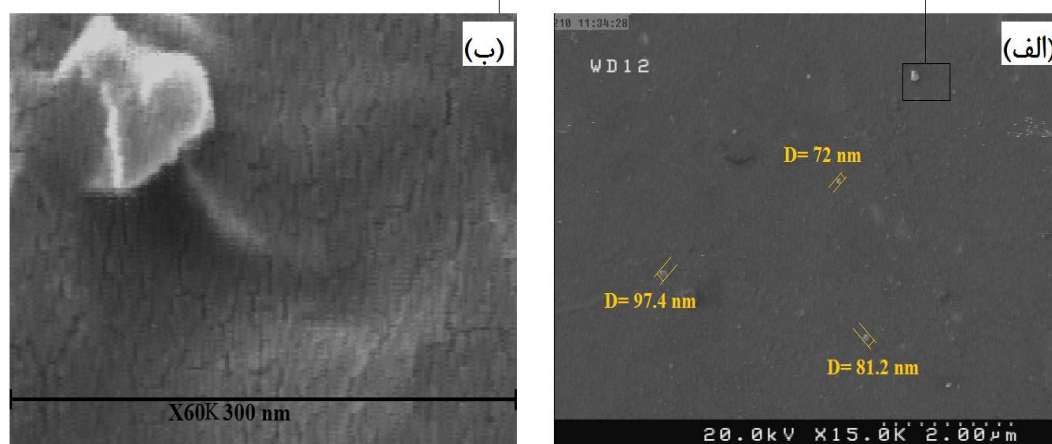
شکل ۲: تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی از نانوذرات کاربرد سیلیسیم مورد استفاده در این تحقیق، قبل از پراکندگی در پلیمر.

### ۳-۲- بررسی پراکندگی نانوذرات در زمینه پلی‌یورتان

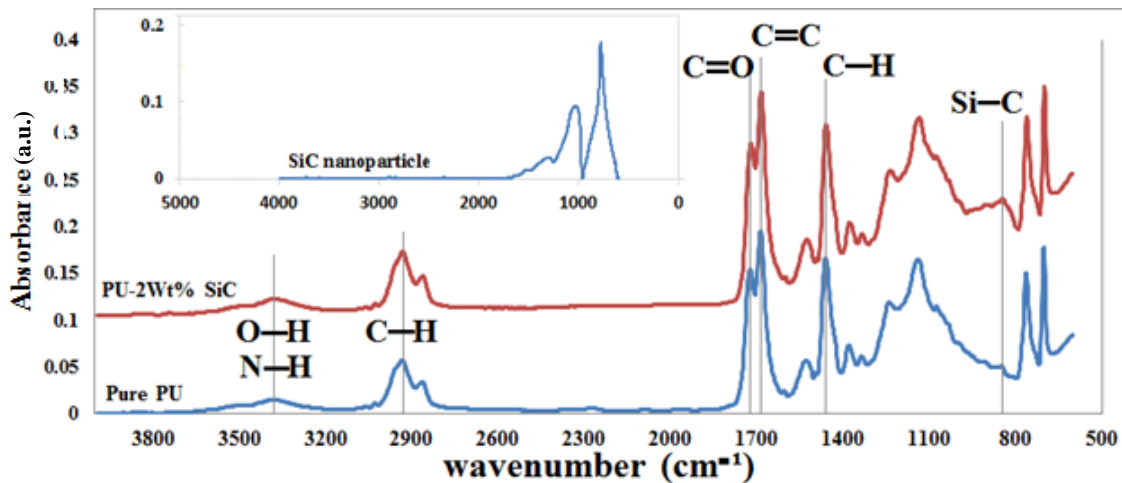
شکل ۲ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی از نانوذرات مورد استفاده در این تحقیق، قبل از پراکندگی در پلی‌یورتان را نشان می‌دهد. این تصویر، ذرات اختلاط مکانیکی شده در حلال (به مدت ۱۰ دقیقه) را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اندازه نانوذرات تجمع یافته، قبل از پراکندگی در پلیمر حدود یک میکرومتر نشان داده شد. شکل ۳ (الف و ب) نیز تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی از سطح نانوکامپوزیت حاوی ۲ درصد وزنی نانو کاربرد سیلیسیم، با بزرگ‌نمایی‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، قطر نانوذرات پراکنده شده کمتر از ۱۲۰ نانومتر نشان داده شد. همچنین همان‌طور که الگوی پراش پرتو ایکس از نانوذرات و رابطه شرر نشان داد، اندازه بلورهای کاربرد سیلیسیم حدود ۵۶ نانومتر (شکل ۱) محاسبه گردید. از مطالب ذکر شده می‌توان نتیجه گرفت، این میزان از نانوذرات پراکنده شده در پلی‌یورتان حداکثر از چند بلورک تشکیل شده‌اند و نسبت به نانوذرات قبل از پراکنده شدن در پلیمر (شکل ۲)، بسیار کوچک‌تر هستند که این موضوع نشان‌دهنده پراکندگی مناسب نانوذرات در زمینه است [۳۵، ۱۹].

### ۳-۳- بررسی پیوندهای پلی‌یورتان

از آزمون طیف‌سنجی زیرقرمز تبدیل فوریه جهت بررسی تغییرات در پیوندهای شیمیایی پلی‌یورتان با افزودن نانوذرات کاربرد سیلیسیم، استفاده گردید. شکل ۴ نتایج حاصل این آزمون برای نانوذرات کاربرد سیلیسیم، پلی‌یورتان خالص و حاوی ۲ درصد وزنی از نانوذرات کاربرد سیلیسیم را نشان می‌دهد. همان‌طور که در طیف‌های مربوط به پوشش‌ها مشاهده می‌گردد، قله حدود  $844\text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاشات



شکل ۳: تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی از سطح پوشش نانوکامپوزیت PU2S با بزرگ‌نمایی‌های (الف) ۱۵ و (ب) ۶۰ هزار برابر.



شکل ۴: طیف‌سنجی تبدیل فوریه زیر قرمز از نانوذرات کاربید سیلیسیم، پلی‌یورتان خالص و حاوی ۲ درصد وزنی نانو کاربید سیلیسیم.

جدول ۶: استحکام چسبندگی پوشش‌های اعمال شده بر روی زیرلایه فولاد آماده‌سازی شده به روش‌های مختلف.

کد نمونه	استحکام چسبندگی (MPa)
PUP	$0.10 \pm 0.01$
PUIP	$0.18 \pm 0.03$
PU2P	$0.11 \pm 0.02$
PU3P	$0.10 \pm 0.02$
PUS	$0.15 \pm 0.02$
PUIS	$0.20 \pm 0.04$
PU2S	$0.25 \pm 0.03$
PU3S	$0.15 \pm 0.02$

دلیل افزایش استحکام چسبندگی پوشش‌ها می‌تواند افزایش اتصالات عرضی پلیمر در حضور نانوذرات باشد که باعث افزایش استحکام پوشش می‌شود. یا به بیانی دیگر، به دلیل پیچیدگی و گره‌خوردن زنجیره‌های پلیمری، در میان سطح بالای نانوذرات استحکام پوشش افزایش یافته است [۳۸]. در پوشش حاوی ۳ درصد نانو کاربید سیلیسیم استحکام چسبندگی کاهش یافت، که احتمالاً می‌تواند به دلیل تجمع نانوذرات در زمینه باشد، که باعث کاهش سطح برهم‌کنش ذره-پلیمر و همچنین ایجاد نقص در پوشش می‌شود [۳۶، ۸].

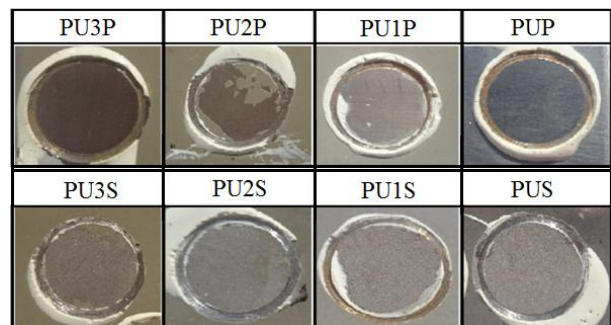
### ۳-۴-۲- تاثیر آماده‌سازی سطح زیرلایه

همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است، آماده‌سازی سطح زیرلایه به روش ماسه‌پاشی، استحکام چسبندگی بیشتری نسبت به روش

### ۳-۴-۳- استحکام چسبندگی پوشش‌ها

#### ۳-۴-۳-۱- تاثیر درصد وزنی نانوذرات کاربید سیلیسیم

جدول ۶ میانگین حاصل از ۳ بار انجام آزمون چسبندگی قدرت کندن و شکل ۵ سطح مقطع پوشش‌های پلی‌یورتان حاوی صفر، ۱، ۲ و ۳ درصد وزنی از نانوذرات کاربید سیلیسیم، بر روی زیرلایه فولاد آماده‌سازی شده با روش‌های سنباده‌زنی و ماسه‌پاشی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۵ مشخص است، نمونه حاوی ۲ درصد وزنی نانو کاربید سیلیسیم پس از انجام آزمون حدود ۲۰-۱۰ درصد پوشش بر روی زیرلایه باقی‌مانده است؛ در صورتی که در نمونه‌های پوشش داده شده با پلی‌یورتان خالص و حاوی ۱ و ۳ درصد نانو کاربید سیلیسیم، پوشش کاملاً از سطح زیرلایه جدا شده است. همچنین همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، افزایش نانوذرات تا ۲ درصد وزنی باعث بهبود قابل توجه استحکام چسبندگی پوشش پلی‌یورتان به سطح فولاد شده است.

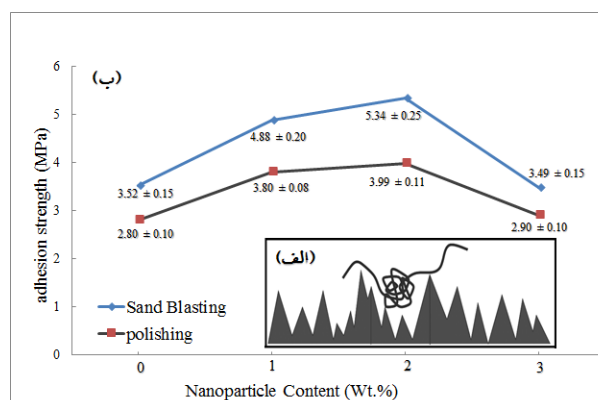


شکل ۵: سطح مقطع پوشش‌ها پس از انجام آزمون چسبندگی قدرت کندن.

### ۳-۵- بررسی مقاومت به ضربه پوشش‌ها

میانگین حاصل از ۳ بار انجام آزمون ضربه لوله‌ای بر روی پوشش‌ها در جدول ۷ و سطح شکست این پوشش‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است؛ همان‌طور که مشاهده می‌شود، حضور نانوذرات کاربید سیلیسیم تا ۲ درصد وزنی در پوشش پلی‌یورتان باعث افزایش مقاومت در برابر ضربه (ارتفاع وزنه تخریب) این پوشش‌ها می‌گردد. در آزمون ضربه، تنش‌های فشاری (ضربه از رو) و کششی (ضربه از پشت) ناگهانی به پوشش‌ها وارد می‌شود که در صورت وجود هر گونه عیب در پوشش، تمرکز تنش، جوانه‌زنی و رشد ترک رخ داده و به سرعت منجر به تخریب پوشش می‌شود. نانوذراتی که به خوبی در پلیمر پراکنده شده باشند، اندازه‌های کوچک‌تر از حد بحرانی جوانه‌زنی ترک دارند و نمی‌توانند باعث تمرکز تنش و ایجاد جوانه ترک شوند [۷]. از طرفی با افزایش فشردگی (کاهش تخلخل) پوشش در حضور نانوذرات، استحکام، مدول و در نتیجه مقاومت به ضربه بهبود می‌یابد. در پوشش حاوی ۳ درصد وزنی نانوذره به دلیل تجمع ذرات و تشکیل ذراتی با اندازه‌های نزدیک به حد بحرانی جوانه ترک، شکست پوشش در تنش‌های پایین‌تری نسبت به پوشش حاوی ۱ و ۲ درصد نانوذره رخ داده است [۷، ۸]. روش آماده‌سازی سطح زیرلایه به دلیل حضور تخلخل و برآمدگی‌ها و فرورفتگی‌ها روی سطح زیرلایه و با ایجاد گیربکس‌ناختی در ضخامت پوشش و ایجاد تمرکز تنش در نواحی نوک تیز سطح زیرلایه، می‌تواند مکان‌هایی جهت تمرکز تنش به خصوص در تنش‌های کششی (ضربه از پشت) ایجاد کند و باعث جوانه‌زنی ترک و در نهایت تخریب پوشش در اثر تنش‌های پایین‌تر گردد [۳۸]. کاهش مقاومت در برابر ضربه نمونه‌های آماده‌سازی شده به روش ماسه‌پاشی که در جدول ۷ نشان داده شده نیز می‌تواند به همین دلایل ایجاد شده باشد.

سنباده‌زنی، بین پوشش و زیرلایه ایجاد کرده است که دلیل این موضوع می‌تواند افزایش سطح تماس پوشش-فلز باشد که در نتیجه این امر موقعیت‌های تعامل فیزیکی و شیمیایی بین پلیمر و زیرلایه افزایش می‌یابد و همچنین باعث افزایش پلیمرهای محبوس شده (شکل ۶ الف) در تخلخل‌های سطح زیرلایه می‌شود [۳۸]. در شکل ۶ (ب)، تاثیر متقابل آماده‌سازی سطح و درصد نانوذرات بر استحکام چسبندگی پوشش‌ها قابل مشاهده است. به این صورت که با افزایش درصد نانوذرات تا ۲ درصد وزنی، میزان افزایش در استحکام چسبندگی نمونه ماسه‌پاشی شده نسبت به نمونه سنباده شده، بیشتر شده است.



شکل ۶: الف) سازوکار افزایش چسبندگی با افزایش تخلخل سطح [۳۸] ب) تاثیر متقابل روش آماده‌سازی سطح زیرلایه و درصد وزنی نانوذرات بر استحکام چسبندگی پوشش‌ها.

جدول ۷: مقاومت در برابر ضربه پوشش‌های پلی‌یورتان حاوی درصد‌های وزنی مختلف نانو کاربید سیلیسیم در روش‌های آماده‌سازی سطح سنباده‌زنی و ماسه‌پاشی.





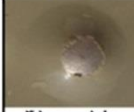
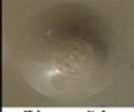


کد نمونه	ضربه از رو		ضربه از پشت	
	ارتفاع تخریب (cm)	ارتفاع تخریب (cm)	ارتفاع تخریب (cm)	ارتفاع تخریب (cm)
	(وزنه یک کیلوگرمی)	(وزنه ۲ کیلوگرمی)	(وزنه یک کیلوگرمی)	(وزنه ۲ کیلوگرمی)
PUP	۷۵±۵	-	۴۰±۲	-
PU1P	مقاوم	۵۰±۴	۸۰±۳	-
PU2P	مقاوم	مقاوم	مقاوم	۴۵±۲
PU3P	۹۰±۴	-	۵۰±۴	-
PUS	۶۵±۶	-	۳۵±۲	-
PU1S	۹۰±۶	-	۵۵±۳	-
PU2S	مقاوم	۶۵±۴	مقاوم	۳۵±۳
PU3S	۵۵±۵	-	۳۵±۲	-



نقاط به دست آمده از آزمون EIS را نشان می‌دهد. عناصر معادل شده در این مدار عبارتند از:  $R_s$  مقاومت محلول،  $R_{coat}$  مقاومت پوشش،  $R_{ct}$  مقاومت پلاریزاسیون (لایه دوگانه)،  $C_{coat}$  ظرفیت خازن پوشش و  $C_{dl}$  ظرفیت خازن لایه دوگانه. شکل ۸ (ب) نمودارهای نایکوئیست و شکل ۸ (ج) نمودارهای باد مربوط به فولاد، فولاد پوشش داده شده با پلی‌یورتان خالص و حاوی ۱ و ۲ درصد وزنی نانوذره را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در نمودار نایکوئیست مشخص است، نمودارها دارای ۲ ثابت زمانی می‌باشند که ثابت زمانی نزدیک به محور عمودی مربوط به پوشش (بسامد بالا) و دیگری مربوط به لایه دوگانه می‌باشد [۴۰]. نتایج حاصل از برازش نمودارهای امپدانس در جدول ۹ نشان داده شده است (نتایج میانگین حاصل از انجام ۲ بار آزمون می‌باشند). همان‌طور که مشاهده می‌شود حضور نانوذرات باعث کاهش مقاومت پوشش شده است. کاهش مقاومت و افزایش ظرفیت خازن پوشش معمولاً به دلیل افزایش تخلخل پوشش و نفوذ الکترولیت به داخل آن می‌باشد [۴۰]. ولی این موضوع در این‌جا به دلیل این‌که با حضور نانوذرات کاربرد سیلیسیم مقاومت لایه دوگانه افزایش و ظرفیت خازن لایه دوگانه نیز کاهش یافت، نشان‌دهنده کاهش حضور الکترولیت در فصل مشترک فلز-پوشش و در نتیجه پلاریزه شدن فرآیند خوردگی می‌باشد. یعنی نفوذ الکترولیت به سطح فلز با حضور نانوذرات در پوشش، کاهش یافته است. در نتیجه می‌توان گفت حضور نانوذرات کاربرد سیلیسیم در پوشش باعث کاهش تخلخل پوشش شده است. کاهش مقاومت و افزایش ظرفیت خازن پوشش را می‌توان به افزایش هدایت الکتریکی پوشش، به دلیل نیمه‌رسانا بودن کاربرد سیلیسیم نسبت داد که باعث عبور راحت‌تر الکترون از پوشش می‌شود [۴۱، ۲۰].

همان‌طور که در جدول ۹ مشخص شده است، مقاومت الکتریکی لایه دوگانه نمونه پوشش داده شده با نانوکامپوزیت‌های پلی‌یورتان نانوکاربید سیلیسیم نسبت به نمونه پوشش داده شده با پلی‌یورتان خالص افزایش پیدا کرده است. به طوری که در پوشش حاوی ۱ و ۲ درصد وزنی نانوذره کاربرد سیلیسیم مجموع دو مقاومت پوشش و لایه دوگانه نسبت به پلی‌یورتان خالص به ترتیب ۱۷٫۶۷ و ۵٫۷ درصد کاهش یافت، در حالی که حضور نانوذرات باعث کاهش ۳۵ درصدی مقاومت پوشش می‌گردد، به عبارتی می‌توان گفت تاثیر مثبت کاهش تخلخل (افزایش فشردگی) در پوشش توسط اثر منفی هدایت الکتریکی خنثی شده و باعث کاهش ناچیز مجموع دو مقاومت شده است.

PU3P	PU2P	PU1P	PUP
			
۵۰ cm . ۱ kg	۴۵ cm . ۲ kg	۸۰ cm . ۱ kg	۴۰ cm . ۱ kg
PU3S	PU2S	PU1S	PUS
			
۳۵ cm . ۱ kg	۳۵ cm . ۲ kg	۵۵ cm . ۱ kg	۳۵ cm . ۱ kg

شکل ۷: سطح پوشش‌ها پس از آزمون ضربه از پشت.

### ۳-۶- سختی پوشش‌ها

روش سختی‌سنجی مدادی یک روش ساده و سریع جهت مقایسه سختی پوشش‌ها می‌باشد. در این روش بررسی میزان سختی، براساس ایجاد و یا عدم ایجاد خراش در اثر حرکت مدادها با سختی‌های متفاوت و با نیرو و سرعت ثابت بر روی سطح پوشش انجام می‌گیرد. در این پژوهش درصد وزنی نانوذرات و آماده‌سازی سطح زیرلایه بر میزان سختی پوشش‌ها مورد بررسی قرار گرفت. میانگین حاصل از ۳ بار انجام آزمون سختی‌سنجی مدادی بر روی پوشش‌ها، در جدول ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزودن نانوذرات تا ۲ درصد وزنی به پوشش پلی‌یورتان، باعث افزایش میزان سختی پوشش از 3H به 5H می‌گردد و افزودن ۳ درصد وزنی نانوذره به این پوشش‌ها سختی آن را نسبت به نانوکامپوزیت حاوی ۱ و ۲ درصد وزنی نانوذره کاهش داد. دلیل افزایش سختی نانوکامپوزیت‌های حاوی ۱ و ۲ درصد وزنی نانوذره، می‌تواند برهم‌کنش قوی نانوذرات با زمینه پلی‌یورتان باشد که باعث افزایش مدول و استحکام پوشش شده است [۳۹]. کاهش سختی پوشش نانوکامپوزیت حاوی ۳ درصد وزنی نانوکاربید سیلیسیم نیز می‌تواند به دلیل تجمع نانوذرات، کاهش سطح در تماس با پلیمر و در نتیجه کاهش برهم‌کنش نانوذره-پلیمر باشد [۳۸]. در این تحقیق مشخص شد، آماده‌سازی سطح زیرلایه تاثیر بر سختی این پوشش‌ها ندارد.

### ۳-۷- بررسی رفتار خوردگی پوشش‌ها در آزمون امپدانس

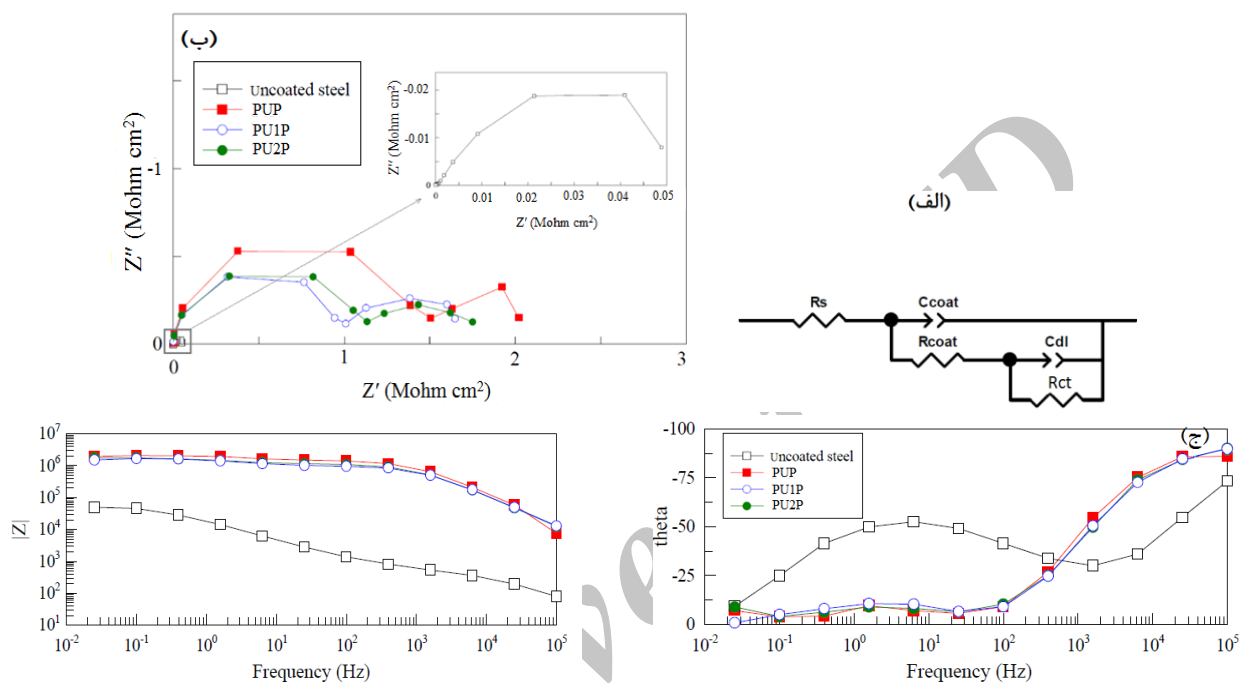
#### الکتروشیمیایی

جهت بررسی دقیق‌تر دلیل تغییرات رفتار خوردگی پوشش‌ها از آزمون امپدانس الکتروشیمیایی استفاده گردید. به منظور استخراج اطلاعات، نمودارهای پاسخ بسامد توسط مدار الکتریکی معادل مدل شد. شکل ۸ (الف) مدار معادل الکتریکی مورد استفاده جهت برازش<sup>۱</sup>

1- Fitting

جدول ۸: نتایج حاصل از آزمون سختی پوشش‌های پلی‌یورتان خالص و حاوی درصد‌های وزنی مختلف نانو کاربرد سیلیسیم بر روی زیرلایه فولاد آماده‌سازی شده به روش‌های سنباده‌زنی و ماسه‌پاشی.

کد نمونه	PUP	PU1P	PU2P	PU3P	PUS	PU1S	PU2S	PU3S
سختی	H۳	H۴	H۵	H۳	H۳	H۴	H۵	H۳



شکل ۸: الف) مدار معادل استفاده شده جهت برازش داده‌های آزمون امپدانس، ب) نمودار نایکوئیست و ج) نمودار باد، مربوط به فولاد، پلی‌یورتان خالص و حاوی ۱ و ۲ درصد وزنی نانو کاربرد سیلیسیم.

جدول ۹: نتایج به دست آمده از تحلیل داده‌های آزمون امپدانس بر روی پوشش‌های پلی‌یورتان خالص و حاوی ۱ و ۲ درصد وزنی نانو کاربرد سیلیسیم.

عنصر	PUP	PU1P	PU2P
ظرفیت خازن پوشش T (nF)	۰,۲۵۴	۰,۲۶۶	۰,۲۶۹
ظرفیت خازن پوشش P	۰,۹۲۷	۰,۹۳۴	۰,۹۵۱
مقاومت پوشش (Mohm)	۱,۳۹۴±۰,۰۱	۰,۹۳۴±۰,۰۱	۰,۹۲۴±۰,۰۰۵
ظرفیت خازن لایه دوگانه T (nF)	۴۳۰	۲۷۰	۲۰۱
ظرفیت خازن لایه دوگانه P	۰,۶۶۳	۰,۶۴۰	۰,۴۰۳
مقاومت لایه دوگانه (Mohm)	۰,۷۸۸±۰,۰۱	۰,۸۶۳±۰,۰۲	۱,۱۳۹±۰,۰۱

#### ۴- نتیجه گیری

ساختار پلی یورتان. نتایج بررسی های خواص مکانیکی پوشش ها نشان داد، حضور ۱ و ۲ درصد وزنی نانوکاربید سیلیسیم در پوشش های پلی یورتان استحکام چسبندگی پوشش ها را به ترتیب ۳۸ و ۵۱ درصد بهبود، سختی و مقاومت به ضربه پوشش ها را به مقدار قابل توجهی افزایش می دهد. بررسی الکتروشیمیایی نیز نشان داد، حضور ۱ درصد وزنی از نانوذرات کاربید سیلیسیم در پوشش های نانوکامپوزیت اعمال شده بر روی فولاد، مقاومت به خوردگی آن را نسبت به فولاد پوشش داده شده با پلی یورتان خالص کاهش می دهد. ولی حضور ۲ درصد وزنی از نانوذرات در پوشش ها تغییر چندانی در رفتار خوردگی پوشش ها ایجاد نمی کند. همچنین در نتایج آزمون ها نشان داده شد که آماده سازی سطح به روش ماسه پاشی نسبت به روش سنباده زنی استحکام چسبندگی بسیار بیشتری میان پوشش ها و زیرلایه ایجاد می کند؛ ولی باعث کاهش نسبی مقاومت به ضربه پوشش ها می گردد.

در این پژوهش پوشش های پلی یورتان خالص و نانوکامپوزیت پایه پلی یورتان تقویت شده با ۱، ۲ و ۳ درصد وزنی از نانوذرات کاربید سیلیسیم تولید و بر روی زیرلایه فولاد آماده سازی شده به روش های سنباده زنی و ماسه پاشی، اعمال شد. سپس خواص مکانیکی و خوردگی آن ها با روش های استاندارد بررسی و با یکدیگر مقایسه گردید و نتایج کلی زیر حاصل شد:

طیفسنجی پراش پرتو ایکس از نانوذرات و تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی از سطح پوشش ها نشان داد، ۲ درصد وزنی نانوکاربید سیلیسیم به خوبی در زمینه پلی یورتان پراکنده شده و آنالیز طیفسنجی زیر قرمز تبدیل فوریه از پوشش ها نشان داد، حضور نانوذرات تاثیری بر ساختار اصلی پلی یورتان ندارد و هرگونه تغییر در خواص پوشش ها به دلیل ایجاد ساختار درهم رسوخ کرده پلیمر است که در حضور نانوذرات ایجاد شده و نه به دلیل تغییر در

#### ۵- مراجع

1. M. Barikani, Polyurethane chemistry, property, application and ageing, IPPI, Tehran. 2004.
2. M. Rashvand, Z. Ranjbar, Effect of nano-ZnO particles on the corrosion resistance of polyurethane-based waterborne coatings immersed in sodium chloride solution via EIS technique. *Prog. Org. Coat.* 76(2013), 1413-1417.
3. A. Forsgren, corrosion control through organic coating, Taylor & Francis Group, United Kingdom, 2006.
4. C. I. Elsner, E. Cavalcanti, O. Ferraz, A. R. D. Sarli, Evaluation of the surface treatment effect on the anticorrosive performance of paint systems on steel. *Prog. Org. Coat.* 48(2003), 50-62.
5. R. W. Revie, H. H. Uhlig, Corrosion and corrosion Control, 4<sup>th</sup> Edition, Wiley & Sons, New Jersey, 2007.
6. J. Njuguna, K. Pielichowski, Recent developments in polyurethane-based conducting composites. *J. Mater. Sci.* 39(2004), 4081-4094.
7. P. M. Ajayan, L. S. Schadler, P. V. Braun, Nanocomposite Science and Technology, Wiley-VCH, Weinheim, 2003.
8. I. V. Khudyakov, R. D. Zopf, N. J. Turro, Polyurethane Nanocomposites. *Des. Monomers Polym.* 12(2009), 279-290.
9. F. Liu, L. Yang, E. Han, Effect of particle sizes and pigment volume concentrations on the barrier properties of polyurethane coatings. *J. Coat. Technol. Res.* 7(2010), 301-313.
10. S. A. Sajjadi, M. H. Avazkonandeh-Gharavol, S. M. Zebarjad, M. Mohammadtaheri, M. Abbasi, K. Mossaddegh, A comparative study on the effect of type of reinforcement on the scratch behavior of a polyacrylic-based nanocomposite coating. *J. Coat. Technol. Res.* 10(2013), 255-261.
11. L. Sung, J. Comer, A. M. Forster, H. Hu, B. Floryancic, L. Brickweg, R. H. Fernando, Scratch behavior of nano-alumina/polyurethane coatings. *J. Coat. Technol. Res.* 5(2008), 419-430.
12. Z. Ranjbara, S. Rastegar, Evaluation of mar/scratch resistance of a two component automotive clear coat via nano-indenter. *Prog. Org. Coat.* 64(2009), 387-391.
13. M. Taheran, A. H. Navarchian, R. ShojaRazavi, Optimization of wear resistance of PU/TiO<sub>2</sub> coatings on aluminum surfaces. *Prog. Org. Coat.* 72(2011), 486-491.
14. C. Sow, B. Riedl, P. Blanchet, UV-waterborne polyurethane-acrylate nanocomposite coatings containing alumina and silica nanoparticles for wood: mechanical, optical, and thermal properties assessment. *J. Coat. Technol. Res.* 8(2011), 211-221.
15. A. Darvish, R. Naderi, M. M. Attar, The impact of pigment volume concentration on the protective performance of polyurethane coating with second generation of phosphate based anticorrosion pigment. *Prog. Org. Coat.* 77(2014), 1768-1773.
16. L. Zhai, G. Ling, J. Li, Y. Wang, The effect of nanoparticles on the adhesion of epoxy adhesive. *Mater. Letters.* 60(2006), 3031-3033.
17. P. A. Sørensen, S. Kiil, K. Dam-Johansen, C. E. Weinell, Anticorrosive coatings: A review. *J. Coat. Technol. Res.* 6(2009), 135-176.
18. Y. Gonzalez-Garcia, S. Gonzalez, R. M. Souto, Electrochemical and structural properties of a polyurethane coating on steel substrates for corrosion protection. *Corros. Sci.* 49(2007), 3514-3526.
19. M. J. Palimi, M. Rostami, M. Mahdavian, B. Ramezanzadeh, Application of EIS and salt spray tests for investigation of the anticorrosion properties of polyurethane-based nanocomposites containing Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles modified with 3-amino propyl trimethoxy silane. *Prog. Org. Coat.* 77(2014), 1935-1945.

20. Z. Guo, K. Shin, A. B. Karki, D. P. Young, R. B. Kaner, H. T. Hahn, Fabrication and characterization of iron oxide nanoparticles filled polypyrrole nanocomposites. *J. Nanopart. Res.* 11(2009), 1441-1452.
21. N. Kiomarsipour, R. ShojaRazavi, Preparation and evaluation of black silicate thermal control coating for using on satellite surface. *J. Color Sci. Tech.* 8(2015), 283-293.
22. Z. Guo, T. Y. Kim, K. Lei, T. Pereira, J. G. Sugar, H. T. Hahn, Strengthening and thermal stabilization of polyurethane nanocomposites with silicon carbide nanoparticles by a surface-initiated-polymerization approach. *Compos. Sci. Technol.* 68(2008), 164-170.
23. Q. L. Ji, M. Q. Zhang, M. Z. Rong, B. Wetzal, K. Friedrich, Friction and wear of epoxy composites containing surface modified SiC nanoparticles. *Tribol. Lett.* 20(2005), 115-123.
24. N. Chisholm, H. Mahfuz, V. K. Rangari, A. Ashfaq, S. Jeelani, Fabrication and mechanical characterization of carbon/SiC-epoxy Nanocomposites. *Composite Structures.* 67(2005), 115-124.
25. Marrion, Chemistry and physics of coatings, 3<sup>rd</sup> Edition, R.S.C. London, 2004.
26. P. Mavinakuli, S. Wei, Q. Wang, A.B. Karki, S. Dhage, Z. Wang, D. P. Young, Z. Guo, Polypyrrole/Silicon Carbide Nanocomposites with Tunable Electrical Conductivity. *J. Phys. Chem.* 114(2010), 3874-3882.
27. W. Zhenyu, L. Fuchun, H. Enhou, K. Wei, L. Suzhen, Effect of ZnO nanoparticles on anti-aging properties of polyurethane coating. *Chinese Sci Bull.* 54(2009), 3464-3472.
28. F. Alhosseini, M. Moniei, Evaluated the effect of the surface roughness on corrosion resistance of stainless steel 316 low-carbon in simulation sea water, 15th Iranian national seminar on surface engineering, Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran, (2014), 9-17.
29. Standard preparation of steel substrates before application of paint and related products, ISO-Standard, Part 1, 8501-1, 1994.
30. Standard Test Methods for Nondestructive Measurement of Dry Film Thickness of Nonmagnetic Coatings Applied to a Ferrous Base, Annual Book of ASTM Standard, ASTM Standard, 06.01, D1186-01, 2006.
31. Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers, Annual Book of ASTM Standard, ASTM Standard, 06.02, D4541-02, 2006.
32. Standard Test Method for Resistance of Organic Coatings to the Effects of Rapid Deformation (Impact), Annual Book of ASTM Standard, ASTM Standard, 06.01, D2794-04, 2005.
33. Standard Test Method for Film Hardness by Pencil Test, Annual Book of ASTM Standard, ASTM Standard, 06.01, D3363-02, 2011.
34. C. S. Barrett, T. B. Massalski, Structure of Metals, 3rd Edition, McCraw-Hill, New York, 1966.
35. M. Barikani, M. R. Kalae, S. Mazinani, M.H. Barikani, Synthesis, Characterization and Thermal Properties of Polyurethane-Urea Nanocomposite with Nanodiamond. *J. Color Sci. Tech.* 9(2015), 65-73.
36. F. Caruso, Nanoengineering of particle surfaces. *Adv. Mater.* 13(2001), 11-22.
37. M. Taheran, Synthesis and characterization of thermal control coatings using polyurethane and nano additives for aluminum surfaces, M.Sc. thesis, University of Isfahan, Iran, 2011.
38. T. A. Vilgis, G. Heinrich, M. Kluppel, Reinforcement of Polymer nano-composites, Cambridge, New York, 2009.
39. M. H. Avazkonandeh-Gharavol, S. A. Sajjadi, S. M. Zebarjad, M. Mohammadtaheri, M. Abbasi, K. Mossaddegh, Effect of heat treatment of nanodiamonds on the scratch behavior of polyacrylic/nanodiamond nanocomposite clear coats. *Prog. Org. Coat.* 76(2013), 1258-1264.
40. M. Hosseini, I. Ahadzadeh, Electrochemical Impedance Spectroscopy fundamentals and applications, Iranian Association of corrosion, Tehran, 2009.
41. T. Tanaka, Y. Matsuo, K. Uchida, Partial Discharge endurance of epoxy-SiC nanocomposite, Annual Report Conference on Electrical Insulation Dielectric Phenomena, Hotel Delta Quebec, Quebec City, Canada, (2008), 13-16.