



## ارزیابی تأثیر افزودن نانوذرات کاربید سیلیسیم و آلومینا بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت پلی یورتان

آزاده زمانی<sup>۱</sup>، علی دهقانی<sup>۲\*</sup>، سیدحسین میرحسینی<sup>۳</sup>، لیلا شریفی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، مجتمع دانشگاه آزاد اسلامی واحد نیشابور، خراسان رضوی، ایران، صندوق پستی: ۹۷۱۳۹-۹۳۱۹۷

۲- مربی، گروه نانومواد، سازمان جهاد دانشگاهی یزد، یزد، ایران، صندوق پستی: ۸۹۱۶۷-۹۷۴۳۱

۳- استادیار، گروه سرامیک، سازمان جهاد دانشگاهی یزد، یزد، ایران، صندوق پستی: ۸۹۱۶۷-۹۷۴۳۱

تاریخ دریافت: ۹۴/۵/۱۸ تاریخ پذیرش: ۹۵/۳/۴ در دسترس به صورت الکترونیکی از: ۱۳۹۵/۹/۲۰

### چکیده

هدف از اضافه کردن نانوذرات به پوشش‌های پلیمری، افزایش مقاومت مکانیکی این نوع پوشش‌ها است. در این تحقیق، سه نوع پوشش پلی یورتان خالص و پلی یورتان حاوی نانوذرات کاربید سیلیسیم و آلومینا با درصد وزنی ۱، ۲.۵ و ۵ نسبت به وزن پلی یورتان آماده شد. پراکندگی و توزیع ذرات در زمینه پلی یورتان با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی گردید. جهت بررسی خواص پوشش از آزمون‌های چسبندگی، سختی و سایش استفاده شد. نتایج آزمون‌ها نشان داد، با افزایش نانوذرات کاربید سیلیسیم تا ۵ درصد وزنی، چسبندگی پوشش، سختی و مقاومت سایشی نسبت به پلی یورتان خالص کاهش یافت. در حالی که افزایش نانوذرات آلومینا تا ۵ درصد وزنی، چسبندگی پوشش تا ۲۵ درصد، سختی از ۳H به ۵H و مقاومت سایشی حدود ۲۳ درصد نسبت به پلی یورتان خالص بهبود بخشید.

واژه‌های کلیدی: کاربید سیلیسیم، آلومینا، نانوکامپوزیت، پلی یورتان، خواص مکانیکی.

## Evaluation of Mechanical Properties of Polyurethane Nanocomposite Coatings Reinforced with Silicon Carbide and Alumina Particles

A. Zamani<sup>1</sup>, A. Dehghani<sup>2\*</sup>, S.H. mirhossieni<sup>2</sup>, L. Sharifi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Material Engineering, Neyshaboor Branch, Islamic Azad University, P. O. Box: 97139-93197, Khorasan Razavi, Iran.

<sup>2</sup> Nano Material Group, Academic Center for Education and Research, P. O. Box: 97431-89167, Yazd Branch, Iran

<sup>3</sup> Ceramic Group, Academic Center for Education and Research, P. O. Box: 97431-89167, Yazd Branch, Iran

Received: 09-08-2015

Accepted: 24-05-2016

Available online: 10-12-2016

### Abstract

The presence of nanoparticles in the polymer matrix will cause an increase in the mechanical performance of nano-composite. In this research the nature of reinforcing material was investigated by mixing pure polyurethane with two different nanoparticles, silicon carbide or alumina. The composition was selected in three levels; 1, 2.5 and 5 in weight percent. The dispersion and distribution of nanoparticles were examined by scanning electron microscopy (SEM). Adhesion, abrasion and hardness tests were applied to study the physical properties of the coated layers. The results were confirmed that in case of silicon carbide by increasing the amount of additive to 5%, all the adhesion, abrasion and hardness values reduced. While by substituting alumina with silicon carbide this trend has been changed to a positive value. Polyurethane-5% Alumina nanoparticles shows 25% increase in adhesion, 23% increase in abrasion and the hardness increases from 3H to 5H. J. Color Sci. Tech. 10(2016), 169-176©. Institute for Color Science and Technology.

**Keywords:** Silicon carbide, Alumina, Nano-composite coating, Polyurethane, Mechanical properties.

## ۱- مقدمه

لی و همکارانش، به بررسی خواص سایشی پلی تترافلورواتیلن در اثر اضافه کردن نانوذرات روی پرداختند. در این مطالعه نانوذرات روی با اندازه کوچکتر از ۵۰ نانومتر، در محدوده ۲۰-۵ درصد وزنی کل به زمینه پلیمری اضافه گردید. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که با اضافه کردن ۱۵ درصد نانوذرات مقاومت سایشی کامپوزیت حاصل به میزان دو برابر نسبت به پلیمر خالص افزایش پیدا کرده است [۲۶]. همچنین وانگ و همکارانش، تاثیر نانوذرات  $Si_3N_4$  در زمینه پلیمر و خواص مکانیکی کامپوزیت حاصل را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که اضافه کردن مقدار ۳٪ نانوذرات  $Si_3N_4$  موجب افزایش مقاومت به سایش نمونه‌های کامپوزیتی شده است [۲۷]. در مطالعه دیگری، ال موئن و همکارانش تاثیر توزیع ذرات نانورس را بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلی‌یورتان مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که وجود نانورس در حدود ۲۰٪ الی ۳۰٪ حجمی پلی‌یورتان و نحوه توزیع آنها، می‌تواند خواص مکانیکی کامپوزیت را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش دهد [۲۸].

در این پژوهش، پوشش‌های کامپوزیتی با زمینه پلی‌یورتان و فاز پرکننده نانو ذرات کاربید سیلیسیم و آلومینا با درصدهای وزنی مختلف تهیه شدند. هدف از انجام این پژوهش بررسی تأثیر و مقدار نانوذرات بر خواص مکانیکی پوشش‌های کامپوزیتی پلیمری حاوی نانوذرات سرامیکی است بنابراین از آزمون‌های چسبندگی، سختی و سایش استفاده شد.

## ۲- بخش تجربی

## ۲-۱- مواد

پلی‌یورتان آلیفاتیک دو جزئی ساخت شرکت Vivero آلمان با مشخصات ذکر شده در جدول ۱ تهیه و به عنوان زمینه پلیمری کامپوزیت‌ها استفاده شد. همچنین جهت تقویت فاز زمینه پلیمری از نانو ذرات کاربید سیلیسیم و آلومینا با دانه‌بندی ۲۰ نانومتر محصول شرکت مرک آلمان و با مشخصات ذکر شده در جدول ۲ استفاده گردید. ورق فولادی نیز از نوع فولاد ساده کربنی (St12) به عنوان زیرلایه انتخاب شد.

جدول ۱: مشخصات مواد مورد استفاده در ساخت زمینه پلیمری.

مواد سازنده	کد تجاری	گرائروی ویژه (gr/ml)
پلی ال	RL171H	۱,۷۲
ایزوسیانات	HL171H	۱,۲۴

پلیمرها موادی هستند که به دلیل قابلیت شکل‌پذیری آسان، وزن کم و خواص مکانیکی مطلوب به عنوان یک گزینه ایده‌آل برای زمینه کامپوزیت‌ها استفاده می‌شوند. رایج‌ترین زمینه‌های پلیمری، رزین‌های اپوکسی و رزین‌های پلی‌یورتان هستند. پلی‌یورتان‌ها پلیمرهای گرماسخت هستند که از واکنش میان ایزوسیانات‌ها و ترکیبات چندعاملی دارای تعداد زیادی گروه هیدروکسید به دست می‌آیند [۶-۱]. از ویژگی‌های مهم این دسته از پلیمرها می‌توان به چسبندگی، صرفه اقتصادی، زمان خشک‌شدن کوتاه و انعطاف‌پذیری بالای آنها اشاره کرد. این ویژگی‌ها باعث شده تا جزء مواد پوششی مطلوب جهت حفاظت از خوردگی قرار بگیرند و در صنایع مختلف از جمله صنعت نفت، گاز، پتروشیمی، هوافضا، حمل و نقل و صنایع دریایی کاربرد فراوانی داشته باشند [۱۱-۷].

کاربید سیلیسیم دارای مقاومت شیمیایی بالا و مقاومت الکتریکی پایینی است. درجه سختی این ماده در مقیاس موس تقریباً ۹.۵ است بنابراین بیشتر در ساخت ابزارآلات سایشی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۲]. آلومینا نیز یکی از مواد سرامیکی مهم است که دارای کاربردهای متنوعی در زمینه‌های مختلف می‌باشد. درجه سختی آلومینا در مقیاس موس تقریباً ۹ می‌باشد که در برابر سایش مقاومت خوبی از خود نشان می‌دهد. از این رو در موارد مختلفی مانند نوک ابزار برش، غلاف‌های هدایت‌کننده الیاف، سیم‌ها و غیره استفاده می‌شود [۱۳]. نانوکامپوزیت‌های پلیمری در سال‌های اخیر اهمیت و کاربرد فراوانی یافته‌اند. در این نوع کامپوزیت‌ها از یک پلیمر به‌عنوان ماده زمینه و از نانوذرات به‌عنوان ماده تقویت‌کننده استفاده می‌شود. با کمک ذرات ترکیبی، الیاف و مواد ریز مشخصاتی نظیر خواص مکانیکی، نوری، حرارتی و الکتریکی می‌تواند بهبود یابد [۱۶-۱۴]. با توجه به اینکه پرکننده‌هایی با ابعاد میکرون و زیر میکرون برای مدت‌های طولانی در فرمولاسیون پلیمرها استفاده می‌شدند، پرکننده‌های با ابعاد نانو نسبتاً جزء دسته جدیدی از پرکننده‌ها قرار می‌گیرند که در دو دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. مواد در مقیاس نانو، خواص فیزیکی، شیمیایی و شیمی-فیزیکی بی‌نظیری از خود نشان می‌دهند و این می‌تواند سبب بهبود خواص مکانیکی در مقایسه با همین مواد در حالت توده گردد [۱۹-۱۵]. سیلیکات‌های لایه‌ای، نانولوله‌ها و انواع گوناگون نانوذرات اکسیدی و الیاف‌ها جهت بهبود خواص پلیمر به‌کاربرده می‌شوند [۲۰، ۱۸]. مزیت کامپوزیت‌های تقویت شده با نانوذرات در مقایسه با کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف این است که با استفاده از حداقل ماده مصرفی می‌توان به حداکثر بازده پوشش رسید [۲۱، ۱۹]. البته باید ذکر کرد که عوامل متعددی در خواص نهایی پوشش‌های کامپوزیتی تاثیرگذار است که می‌توان به مهم‌ترین آنها مانند شکل، اندازه، خاصیت ترشوندگی نانوذرات اشاره کرد [۲۵-۲۲].

خرایش داده شده پوشش و همچنین خود نوار چسب به دقت بررسی گردیدند که در شکل ۱ مشاهده می‌کنید. بعد از انجام این مرحله تمامی نمونه‌ها در حمام آب جوش درب بسته به مدت ۳ ساعت به طور کامل در زیر آب قرار گرفتند. بعد از خروج از آب و خشک شدن پوشش، دوباره تمامی مراحل آزمون چسبندگی تکرار شد.

سختی طبق استاندارد ASTM D-3363 [۳۰] توسط دستگاه سختی‌سنج مدادی ساخت شرکت ماکس تکنیک کشور کانادا اندازه‌گیری شد. در این روش، مدادها با سختی‌های 6B-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. برای هر نمونه سه مرتبه سختی‌سنجی تکرار شد.

آزمون سایش نیز بر اساس استاندارد ASTM D-4060 [۳۱] و با دستگاه سایش ساخت کارخانه Taber Industries آمریکا مدل 5135-Abraser انجام شد. سایش نمونه‌ها با استفاده از چرخ‌های ساینده CS-10 و وزنه‌های ۵۰۰ گرمی بر روی هر چرخ مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از انجام تعداد ۵۰۰ دور چرخش چرخ‌های ساینده، نمونه مجدداً وزن شده و کاهش وزن نمونه‌ها محاسبه و داده‌ها ثبت شد. این آزمایش نیز برای هر نمونه سه مرتبه تکرار گردید.

### ۳- نتایج و بحث

ضخامت پوشش پس از خشک شدن از  $200 \mu\text{m}$  تقریباً به طور میانگین به  $140 \pm 1,8 \mu\text{m}$  رسیده است. ضخامت زیاد فیلم تر روی زیرآیند باعث کاهش چسبندگی می‌شود زیرا هرچه از زیرآیند فاصله بگیریم از قدرت چسبندگی کاسته می‌شود [۱۶]. همچنین زمانی که قدرت چسبندگی پوشش در اثر افزایش ضخامت پوشش کاهش یابد احتمال ورقه ورقه شدن فیلم خشک افزایش می‌یابد، بنابراین یکی از راه‌های افزایش چسبندگی پوشش کنترل ضخامت پوشش می‌باشد [۲۱-۱۹].

تصاویر SEM و آزمون EDX نقطه‌ای پوشش‌های کامپوزیتی حاوی نانوذرات، در شکل ۳ و ۴ آورده شده است. نتایج شکل ۳ نشان می‌دهد که سطح پوشش حاوی عناصر آلومینیم، اکسیژن، سیلیسیم و کربن است بنابراین دلیلی بر وجود نانوذرات در زمینه پلیمر می‌باشد. در ضمن وجود گروه کربنی در زمینه پلیمری باعث تشدید پیک کربن در هر دو شکل شده است. شکل ۴ - الف و ۴ - ب پوشش‌های حاوی نانوذرات کاربید سیلیسیم را نشان می‌دهد. با افزایش مقدار نانوذرات از ۲,۵ به ۵٪ مشاهده می‌شود که در بعضی از نقاط پوشش، نانوذرات تجمع یافته‌اند. شکل ۴ - د و ۴ - ه نیز پوشش‌های حاوی نانوذرات آلومینا را نشان می‌دهد.

جدول ۲: مشخصات نانوذرات مورد استفاده در زمینه پلیمری

نانوذره	خلوص (%)	سطح ویژه ( $\text{m}^2/\text{gr}$ )	چگالی ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )
SiC	>۹۹	۹۲	۳,۲۰
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	>۹۹	۸۸	۳,۹۳

### ۲-۲- روش کار

جهت تهیه پوشش نانوکامپوزیت، از پلی‌یورتان دو جزئی به عنوان ماده اصلی پوشش و نانو ذرات کاربید سیلیسیم و آلومینا با درصدهای وزنی ۱، ۵، ۲ و ۵٪ استفاده شد. نانو ذرات به مدت زمان ۱۵ الی ۳۰ دقیقه در جزء A (پلی‌ال) به کمک هم‌زن بر روی دستگاه هم‌زن مغناطیسی مخلوط، سپس توسط دستگاه فراصوت مدل parsonic ساخت شرکت پارس نهند به مدت ۲۰ الی ۳۰ دقیقه با توان ۱۰۰ وات و چرخه ۰,۵ ثانیه نانوذرات از حالت تجمع یافته خارج شدند. پس از این مدت، جزء B (ایزوسیانات) که عامل سخت‌کننده آن است، با نسبت وزنی  $(\frac{A}{B}) = (\frac{100}{40})$  به مخلوط اضافه شد و مجدداً عمل هم‌زدن به مدت ۵ الی ۱۰ دقیقه ادامه پیدا کرد. سپس مخلوط آماده شده به مدت ۵ دقیقه به منظور حباب‌زدایی در محیط خلأ در دستگاه دسیکاتور قرار گرفتند. سپس برای این که لایه‌های اکسیدی و خراش‌های سطحی ورق فولادی از بین برود از کاغذ سمباده‌های ۱۲۰ تا ۶۰۰ استفاده شد و در پایان با اتانل و آب مقطر شسته و با دمش هوای گرم خشک شدند.

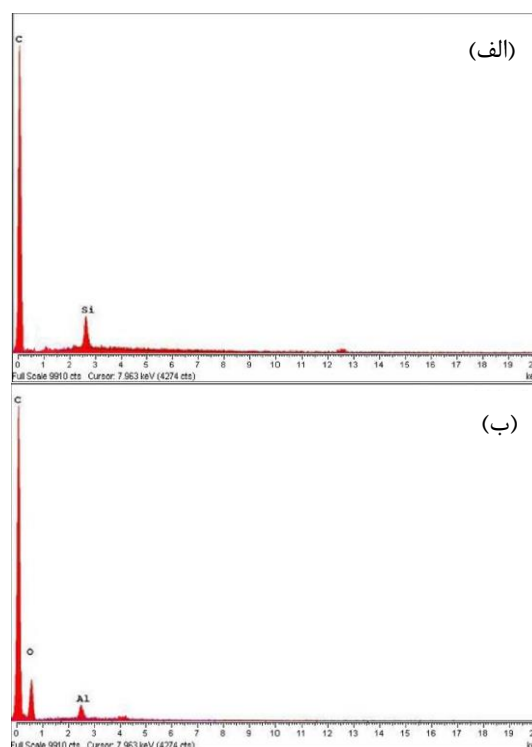
به منظور اعمال پوشش بر روی ورق‌های فولادی از ابزار فیلم‌کش مدل KT204 با قابلیت تغییر ضخامت پوششی از ۰ تا ۵۰۰ میکرون استفاده گردید و پوششی با ضخامت فیلم تر  $200 \mu\text{m}$  بر روی ورق‌های فولادی اعمال شد. ضخامت پوشش‌های خشک‌شده پس از ۴۸ ساعت توسط ضخامت‌سنج دیجیتال مدل CM8801FN اندازه‌گیری شد.

جهت بررسی پراکندگی نانوذرات و توزیع آنها در سطح پوشش از میکروسکوپ الکترونی مجهز به آنالیزر EDX مدل Stereo Scan360(leica/combridg) استفاده شد.

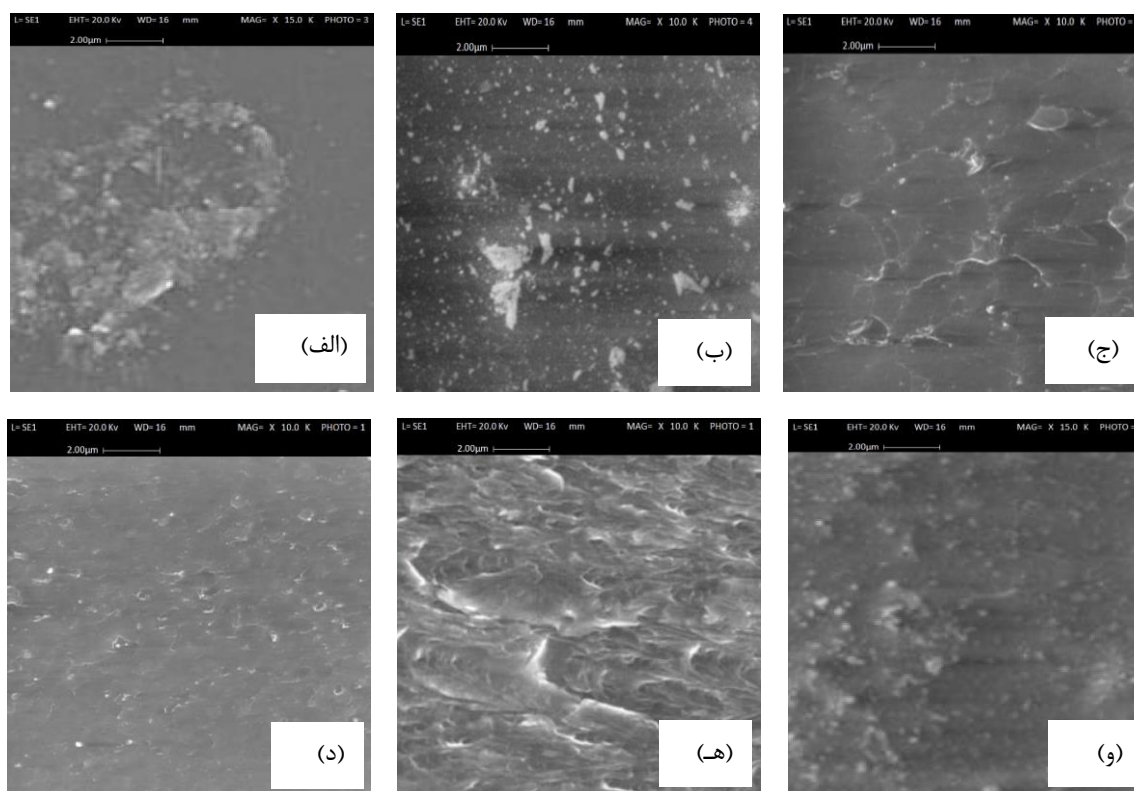
آزمون چسبندگی طبق استاندارد ASTM D-3359 [۲۹] و با استفاده از روش Cross-Cut انجام شد. برای این منظور از دستگاه خراش‌انداز با تیغه استاندارد ۲ mm استفاده شد. خراش‌های عمود بر هم و عمیق توسط تیغه‌های دستگاه بر روی پوشش خشک ایجاد گردید. سپس چسب نواری شفاف مخصوص و طبق استاندارد مورد نظر بر روی ناحیه خراش داده شده چسبانده شد و با استفاده از یک مداد پاک‌کن لاستیکی بر روی چسب فشار وارد شد تا به طور کامل و یکنواخت بر روی سطح پوشش بچسبد. پس از گذشت ۹۰ ثانیه چسب از یک طرف به صورت  $180^\circ$  و با سرعت زیاد برداشته شد. سپس ناحیه

تفاوت درصدهای بالای نانوذرات کاربید سیلیسیم و آلومینا در شکل های ۴-ج و ۴-و آشکار می شود. به طوری که با افزایش مقدار نانوذرات کاربید سیلیسیم از پراکندگی آنها کاسته شده و آن قدر به هم نزدیک شده اند که تراکم بیش از حد از نانوذرات موجب شده است تا به صورت کلوخه به نظر برسند (شکل ۴-ج). در حالی که با افزایش مقدار نانوذرات آلومینا، هنوز این نانوذرات پراکندگی خود را در زمینه پلی یورتان حفظ کرده اند (شکل ۴-و).

بنابراین ترکیب فیزیکی پلیمر و نانوذرات (ترکیب هر ماده معدنی در ماده آلی دیگر) لزوماً به تشکیل نانوکامپوزیت نمی انجامد و معمولاً در این موارد جدایش فازی صورت می گیرد. به طوری که اگر میزان نانوذرات مصرفی از مقداری بیشتر شود که زمینه پلیمری قادر به جا دادن آن در خود نباشد، در یک نقطه تجمع و برانباشتگی رخ می دهد و در نهایت خواص مطلوب مورد نظر ایجاد نمی شود [۳۲]. همچنین یکی دیگر از دلایلی که باعث کلوخه شدن نانو ذرات می شود سطح ویژه آنها می باشد که با افزایش سطح ویژه، تمایل نانوذرات به کلوخه شدن افزایش می یابد [۲۶].



شکل ۳: تصاویر EDX نقطه‌ای پوشش‌های کامپوزیتی پلی یورتان حاوی نانوذرات الف) کاربید سیلیسیم، ب) آلومینا.



شکل ۴: تصاویر SEM پوشش کامپوزیتی پلی یورتان حاوی نانوذرات الف) ۲،۵٪ کاربید سیلیسیم، ب) ۵٪ کاربید سیلیسیم، د) ۲،۵٪ آلومینا، ه) ۵٪ آلومینا، ج) ۵٪ کاربید سیلیسیم (بزرگنمایی ۱۵ هزار برابر)، ز) ۵٪ آلومینا (بزرگنمایی ۱۵ هزار برابر).

## ۱-۳- آزمون چسبندگی

نتایج حاصل از آزمون چسبندگی قبل از حمام آب جوش در جدول ۳ آمده است. همان طور که مشاهده می شود، افزودن بیش از ۱٪ نانو ذرات کاربید سیلیسیم در پوشش باعث کاهش میزان چسبندگی شده است. از طرف دیگر با افزایش نانوذرات آلومینا میزان چسبندگی بهبود یافته است.

نتایج آزمون چسبندگی بعد از قرار گرفتن نمونه ها در حمام آب جوش در جدول ۴ آورده شده است. اکثر پوشش ها از سطح جدا شدند و مطابق عدد صفر در جدول استاندارد ASTM D-3359 برای آزمون چسبندگی بودند [۲۹]. اما مشاهدات چشمی نشان داد که پوشش پلی یورتان حاوی ۵٪ نانوذرات آلومینا کمترین میزان چسبندگی و پوشش حاوی ۵٪ نانوذرات کاربید سیلیسیم بیشترین میزان چسبندگی را داشتند. نتایج آزمون چسبندگی در هر دو حالت نشان می دهد که از نظر چسبندگی نانوذرات آلومینایی در زمینه پلیمری بهتر از نانوذرات کاربید سیلیسیم عمل کرده اند. همچنین تراکم موضعی نانوذرات مشاهده شده در تصاویر SEM یکی از دلایل کاهش چسبندگی پوشش است زیرا هرچه نانوذرات توزیع مناسب و یکنواخت تری در سطح داشته باشند باعث افزایش استحکام چسبندگی پوشش می شوند [۱۶، ۵].

چسبندگی پوشش ها را می توان از جهات دیگر نیز بررسی کرد. یکی از موارد پایه ای در مطالعه چسبندگی دو سطح، انرژی آزاد سطح به عنوان یک عامل ترمودینامیکی می باشد که با استفاده از روابط ۱ و ۲ محاسبه می شود [۳۳].

$$S = r(\gamma_{sv} - \gamma_{sl}) - \gamma_{lv} \quad (1)$$

$$W_A = r(\gamma_{sv} - \gamma_{sl}) + \gamma_{lv} \quad (2)$$

در روابط بالا، S ضریب پخش و  $W_A$  کار چسبندگی است. همچنین r ضریب ناهمواری سطح است که در اینجا برای تمامی سطوح یکسان گرفته می شود. رابطه ۱ نشان می دهد که ضریب پخش از موازنه انرژی های سطحی در حالت قبل و بعد از ایجاد سطح تماس بین چسب و سطح به دست می آید. همچنین کار چسبندگی با ضریب پخش و انرژی سطحی رابطه مستقیم دارد [۳۳]. بنابراین هر قدر ضریب پخش پوشش روی زیرآیند بیشتر باشد انرژی لازم برای جدایش پوشش از سطح بیشتر است. از طرف دیگر تجمع نانوذرات در پوشش باعث کاهش انرژی سطحی فصل مشترک پوشش و زیرآیند می شود که در نتیجه کار چسبندگی را کاهش داده و پوشش با انرژی کمتری از سطح جدا می شود.





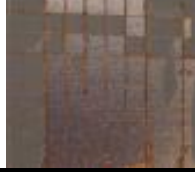
## ۲-۳- آزمون سختی

روش سختی سنجی مدادی یک روش ساده و سریع جهت مقایسه سختی پوشش ها می باشد. در این روش بررسی میزان سختی، بر اساس ایجاد و یا عدم ایجاد خراش در اثر حرکت مدادها با سختی های متفاوت و با نیرو و سرعت ثابت بر روی سطح پوشش انجام می گیرد [۳۰]. شکل ۵، میانگین سختی کامپوزیت های حاوی نانوذرات کاربید سیلیسیم و آلومینا را نشان می دهد. همچنین حدود اطمینان داده ها روی شکل مشخص شده است. همان طور که مشاهده می شود با اضافه کردن ۵٪ کاربید سیلیسیم مقدار سختی به ۳H کاهش می یابد که تقریباً با سختی پلی یورتان خالص برابر است. بنابراین مقدار بهینه این نانوذرات جهت افزایش سختی، ۱٪ وزنی می باشد که سختی آن برابر با ۵H است. همچنین با توجه به تصویر شکل ۴-ج و حدود اطمینان، می توان دریافت که با افزایش میزان نانوذرات کاربید سیلیسیم در پلی یورتان احتمال افزایش کلوخه های شدن و تراکم موضعی نانوذرات افزایش می یابد که تأثیر زیادی بر روی سختی و نهایتاً سایش نمونه ها خواهد گذاشت [۲۷، ۲۰]. در حالت مشابه با افزودن نانو ذرات آلومینا مشاهده می شود که با افزایش مقدار آلومینا، سختی افزایش می یابد به طوری که با افزودن ۵٪ وزنی از این نانوذرات، سختی پوشش از ۳H به ۵H افزایش می یابد. با توجه به شکل ۴-و، و حدود اطمینان، می توان علت افزایش سختی این نمونه ها را به توزیع و پراکندگی خوب این نانوذرات در زمینه پلی یورتان نسبت داد. حدود اطمینان نمونه های حاوی ۵٪ نانوذرات کاربید سیلیسیم نشان می دهد که پراکندگی داده ها زیاد می باشد. یکی از دلایل این امر را می توان به تفاوت سختی در نقاط مختلف پوشش نانوکامپوزیت نسبت داد. همچنین به علت این که این نوع پوشش های نانوکامپوزیت، یک ترکیب فیزیکی ماده معدنی در ماده آلی می باشند بنابراین مقدار بهینه نانوذرات بسیار حائز اهمیت است زیرا در سیستم های غیرقابل امتزاج، برهم کنش ضعیف بین فاز آلی و معدنی باعث ایجاد خواص مکانیکی ضعیف در فاز نهایی می شود.

جدول ۳: نتایج حاصل از آزمون چسبندگی قبل از حمام آب جوش.

عدد استاندارد (ASTM D-3359)	نوع پوشش کامپوزیتی
۴B	پلی یورتان خالص
۳ B	پلی یورتان به همراه ۵٪ نانو ذرات SiC
۳ B	پلی یورتان به همراه ۵٪ نانو ذرات SiC
۴ B	پلی یورتان به همراه ۵٪ نانو ذرات Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۴ B	پلی یورتان به همراه ۵٪ نانو ذرات Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

جدول ۴: نتایج حاصل از آزمون چسبندگی بعد از حمام آب جوش.

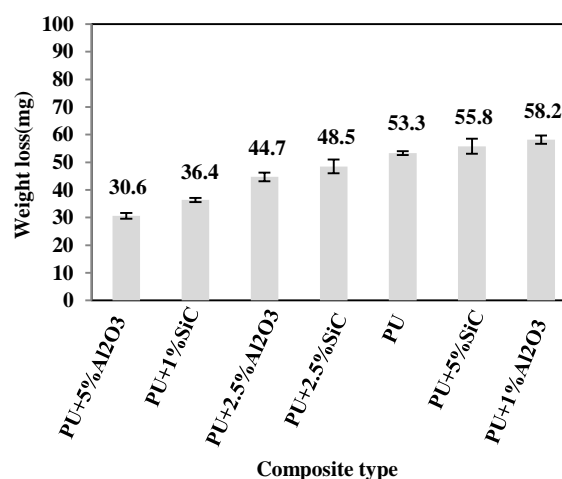
تصویر سطح	درصد کندگی پوشش	چسبندگی (ASTM D-3359)	نوع پوشش
	٪۴۸	1B	پلی یورتان خالص
	٪۲۵	2B	پلی یورتان حاوی ۲/۵٪ نانو ذرات Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	٪۳۰	2B	پلی یورتان حاوی ۵٪ نانو ذرات Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	٪۶۰	1B	پلی یورتان حاوی ۲/۵٪ نانو ذرات SiC
	٪۸۲	0B	پلی یورتان حاوی ۵٪ نانو ذرات SiC

### ۳-۳- آزمون سایش

سازوکار سایش در این آزمون، سایش خراشان است. سایش خراشان زمانی رخ می‌دهد که یک سطح سخت و زبر در مقابل یک سطح نرم تر می‌لغزد و باعث کاهش جرم سطح نرم می‌گردد. وزن هر نمونه قبل از انجام آزمون به عنوان وزن اولیه و بعد از انجام آزمون به عنوان وزن ثانویه اندازه‌گیری شد و با استفاده از رابطه ۳ ثبات سایشی نمونه‌ها محاسبه گردید [۳۱، ۲۷].

$$I = \frac{W_1 - W_2}{C} \times 1000 \quad (۳)$$

$W_1$  وزن اولیه،  $W_2$  وزن ثانویه نمونه و  $C$  تعداد سیکل تحت آزمون است. شکل ۶، کاهش وزن محاسبه شده برای هر نمونه را به همراه حدود اطمینان نشان می‌دهد.



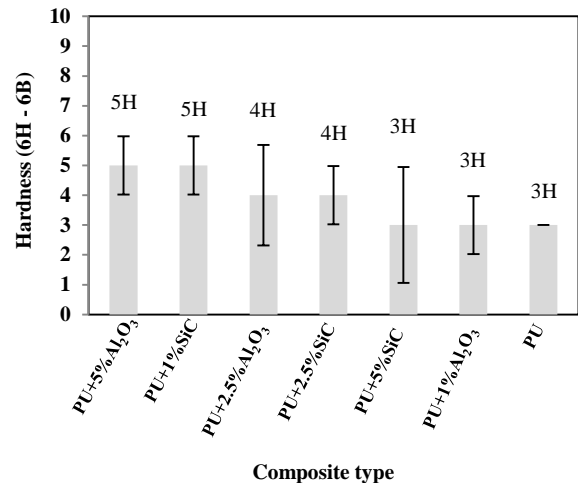
شکل ۵: میزان سختی کامپوزیت‌های حاوی نانوذرات کاربید سیلیسیم و آلومینا.

سطح کنده شده و ایجاد حفره‌های ریز بی‌شماری در نمونه می‌کنند که بر روی وزن ثانویه و در نهایت ثبات سایشی تأثیر فراوانی می‌گذارند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

تصاویر SEM نشان داد که افزایش مقدار نانوذرات کاربید سیلیسیم، تراکم نانوذرات را به دنبال دارد و از پراکندگی آنها در تمام سطح می‌کاهد در حالی که با افزایش مقدار نانوذرات آلومینا هیچ‌گونه تراکمی از نانوذرات دیده نمی‌شود و به صورت یکنواخت‌تر در تمام سطح پراکنده می‌شوند. نتایج مرحله اول و دوم آزمون چسبندگی بیان می‌کند که افزودن بیش از حد نانوذرات کاربید سیلیسیم به زمینه پلی‌یورتان میزان چسبندگی را کاهش و افزودن نانوذرات آلومینا میزان چسبندگی را افزایش می‌دهد. نتایج آزمون سختی و سایش تاییدکننده یکدیگر هستند به طوری که میزان سختی و مقاومت به سایش با مقدار نانوذرات کاربید سیلیسیم نسبت عکس دارد و از طرفی با میزان نانوذرات آلومینا ارتباط خطی و مستقیم دارند. به طوری که نمونه‌های حاوی ۱٪ نانوذرات کاربید سیلیسیم و ۵٪ نانوذرات آلومینا بیشترین سختی و مقاومت به سایش را نسبت به نمونه‌های پلی‌یورتان خالص دارند.

نتایج تمامی آزمون‌ها نشان داد که با افزایش مقدار کاربید سیلیسیم در زمینه پلی‌یورتان، خواص مکانیکی این نوع پوشش‌های کامپوزیتی کاهش می‌یابد که دلیل این امر را می‌توان به تراکم‌های موضعی نانوذرات کاربید سیلیسیم و توزیع غیریکنواخت آنها در زمینه پلی‌یورتان نسبت داد.



شکل ۶: کاهش وزن کامپوزیت‌های حاوی نانوذرات کاربید سیلیسیم و آلومینا.

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزودن ۱٪ از نانوذرات کاربید سیلیسیم به زمینه، کاهش وزن کامپوزیت نسبت به پلی‌یورتان خالص کاهش یافته است و با اضافه کردن بیشتر این نانوذرات به پلی‌یورتان، مقاومت به سایش کامپوزیت حاصل کاهش می‌یابد زیرا کاهش وزن افزایش یافته است و به مقدار ۵۵٫۸ میلی‌گرم می‌رسد. در حالی که با افزایش مقدار نانوذرات آلومینا، مقاومت کاهش وزن کامپوزیت‌ها کاهش می‌یابد به طوری که این مقدار در کامپوزیت حاوی ۵٪ وزنی آلومینا به کمترین مقدار خود یعنی ۳۰٫۶ میلی‌گرم می‌رسد. با توجه به این که سایش از نوع سایش خراشان است بنابراین با افزایش مقدار نانوذرات کاربید سیلیسیم و شکل گرفتن تجمعات موضعی این نانوذرات در زمینه پلی‌یورتان هنگام سایش، این تجمعات ناگهان از

#### ۵- مراجع

- H. Rasmika, P. Kaushal, Synthesis and characterization of flame retardant hyperbranched polyurethanes for nano-composite and nano-coating applications. *Prog. Org. Coat.* 88(2015), 283–292.
- P. Kavalur, P. Jeyaraj, R. Babu, Static behaviour of visco-elastic sandwich plate with nano composite facings under mechanical load. *Procedia Mater. Sci.* 5(2014), 1376-1384.
- J. J. Burdeniuc, A. Z. Kamzelski, Blowing catalyst compositions containing hydroxyl and surface active groups for the production of polyurethane foams, EU Pat. 1702913, 2006.
- N. Daum, J. Thiltgen, P. R. Soucek, M. Simonsick, J. Zhong, Cycloaliphatic polyester-based high solids polyurethane coatings: II. the effect of difunctional acid. *Prog. Org. Coat.* 45(2002), 49–58.
- R. Adhikari, P. Gunatillake, S. McCarthy, Mixed macrodiol-based siloxane polyurethanes: effect of the comacrodiol structure on properties and morphology. *Appl. Poly. Sci.* 78(2000), 71–82.
- ا. زرگرلهپی، م. خراسانی، ع. صباغ الوانی، س. کیانی، اثر نوع عامل انتقال زنجیر بر خواص فیزیکی پراکنده‌های پلی‌یورتان پایه آبی، نشریه علمی پژوهشی علوم و فناوری رنگ، ۸(۱۳۹۳)، ۳۰۷–۳۱۶.
- J. Stanford, R. H. Still, A. Wilkinson, Effects of soft segment prepolymer functionality on structure development in RIM copolymers. *Polym.* 36(1995), 55–64.
- P. Barbeau, J. F. Gerard, B. Magny, J. Pascault, Effect of the diisocyanate on the structure and properties of polyurethane acrylate prepolymers. *Polym. Sci.* 38(2000), 50–68.
- ش. اشهری، ع. سراپی، س. م. کثیریه‌ها، د. زارعی، ارزیابی اثر پراکنش ذرات رس آلی بر رفتار رئولوژیکی نانوکامپوزیت پلی‌یورتان - رس مونت موریلونیت، نشریه علمی پژوهشی علوم و فناوری رنگ، ۳(۱۳۸۸)، ۸۹–۹۶.
- M. Yen, P. Chen, Synthesis, properties, and dyeing application of non ionic waterborne polyurethanes with

- different chain length of ethyldiamines as the chain extender. *Appl. Polym. Sci.* 90(2003), 24–33.
11. D. Chattopadhyay, B. Sreedhar, Influence of varying hard segments on the properties of chemically cross linked moisture cured polyurethane urea. *Polym. Sci.* 44(2006), 10–18.
  12. A. Joseph, D. Oladayo, High Temperature mechanical properties of silicon carbide particulate reinforced cast aluminum alloy composite. *Leonardo Electron. J. Practices Technol.* 6(2011), 9-16.
  13. L. Seung, B. Myeong, K. Nam, R. Su, Properties of alumina coated with hydroxyapatite nano-sol. *Nanosci. Nanoeng.* 8(2014), 36-43.
  14. D. Burris, B. Boesl, R. Gerald, Polymeric nanocomposites for tribological applications. *Macromol. Mater. Eng.* 292(2007), 387-402.
  15. T. Agag, T. Koga, J. Takeichi, Studies on thermal and mechanical properties of polyimide-Clay Nano-composites. *Polym.* 42(2001), 3399-3408.
  16. R. Siegel, S. k. chan, B. Ash, J. Stone, Mechanical behavior of polymer and ceramic matrix nanocomposites. *Scr. Mater.* 44(2001), 2061-2064.
  17. C. Ng, L. Schadler, R. Siegel, Synthesis and mechanical properties of  $TiO_2$ -epoxy Nano-composites. *Nanostruct. Mater.* 12(1999), 507-510.
  18. W. Sawyer, K. Freudenberg, P. Bhimaraj, A study on the friction and wear behavior of PTFE filled with alumina nanoparticles. *Wear.* 254(2003), 573-580.
  19. Q. Xue, Q. Wang, Wear mechanisms of polyetheretherketone composites filled with various kinds of SiC. *Wear.* 213(1997), 54-58.
  20. Y. Zhu, D. Sun, Preparation of silicon dioxide/polyurethane nano-composites by a sol-gel process. *App. Polym. Sci.* 92(2004), 13–22.
  21. P. V. Antunes, A. Ramalho, E. V. Carrilho, Mechanical and wear behaviours of nano and microfilled polymeric composite: effect of filler fraction and size. *Mater. Des.* 69(2014), 31-44.
  22. D. Chattopadhyay, R. Prasad, B. Sreedhar, K. Raju, The phase mixing of moisture cured polyurethane-urea during cure. *Prog. Org. Coat.* 54(2005), 296–304.
  23. D. Chattopadhyay, B. Sreedhar, K. Raju, Effect of chain extender on phase mixing and coating properties of polyurethane ureas. *Ind. Eng. Chem.* 44(2005), 2–79.
  24. T. A. Vilgis, G. Heinrich, M. Kluppel, Reinforcement of polymer nano-composites. CAM. New York, 2009, 102-144.
  25. C. Chinwanitcharoen, S. Kanoh, T. Yamada, S. Hayashi, Preparation of aqueous dispersible polyurethane: effect of acetone on the particle size and storage stability of polyurethane emulsion. *App. Polym. Sci.* 91(2004), 55–61.
  26. F. Li, K. Hu, J. Li, The friction and wear characteristics of nanometer ZnO filled polytetrafluoroethylene. *Wear.* 249(2002), 877-882.
  27. Q. H. Wang, J. Xue, W. Shen, W. Liu, An investigation of the friction and wear properties of nanometer  $Si_3N_4$  filled PEEK. *Wear.* 196(1996), 82-86.
  28. A. El Moumen, Y. Djebara, T. Kanit, S. Madani, A. Imad, Modeling of the effect of particles size, particles distribution and particles number on mechanical properties of polymer-clay nano composites: numerical homogenization versus experimental results. *Compos.* 53(2015), 78-86.
  29. Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test, Annual Book of ASTM Standard, ASTM Standard, 06.01, D3359 – 09, 2009.
  30. Standard Test Method for Film Hardness by Pencil Test, Annual Book of ASTM Standard, ASTM Standard, 07.01, D3363-02, 2011.
  31. Standard Test Method for Abrasion Resistance of Organic Coatings by the Taber Abraser, Annual Book of ASTM Standard, ASTM Standard, 06.01, D4060 – 07, 2009.
  32. S. Sinha Ray, M. Okamoto, Polymer/layered silicate nanocomposites: A review from preparation to processing. *Prog. Polym. Sci.* 28(2003), 1539-1641.
  33. D. E. Packham, Surface energy, surface topography and adhesion. *Int. J. Adhes.* 23(2003), 437-448.