



Optimal Resistance of Acrylic Glass Using Epoxy Coating

Rasoul Shemshadi¹, Mojtaba Masoumnezhad^{2*}

¹Faculty Member, Department of Chemical Engineering, Guilan Branch, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

²Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:

Original Research

Received: 10.15.2021

Revised: 11.15.2021

Accepted: 11.22.2021

Keyword:

Scratch Resistance

Acrylic

Epoxy

Coating

Silane

*Corresponding Author:

Mojtaba Masoumnezhad

Email:

mmasomnezhad@tvu.ac.ir

ABSTRACT

In recent years, the use of transparent polymers in fields such as optical applications and car glass has become common. Among these transparent polymers, poly (methyl methacrylate) is one of the most well-known and widely used plastics with excellent light-transmitting properties, which is used to make glass. The main disadvantage of acrylic glass is its scratch resistance which is often affected by storage conditions, transportation, and molding process, reducing the quality of polymer glass and thus its performance and longevity. For this purpose, glycidoxypropyl trimethoxysilane resin was used as an additive in the amount of 0.5 and 1% by weight to improve surface properties. To investigate the effect of epoxy resin coating and silane additive (as friction reducing agents) on scratch and abrasion resistance, hardness test, pencil hardness test, scratch resistance, abrasion and wash, friction coefficient and Taber abrasion were carried out. The results obtained by applying epoxy coating on poly (methyl methacrylate) sheets, while maintaining transparency, improved scratch and abrasion resistance by 28 and 200%, respectively. Although the application of epoxy coating slightly increased the coefficient of friction, the use of silane additive compensated for this shortcoming and reduced the coefficient of friction, and improved the abrasion and scratch resistance by more than 50%. It was also observed that the use of epoxy coatings and additives that improve surface properties did not have a negative effect on transparency and light transmission.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

In recent years, the use of transparent polymers in fields such as optical applications and car glass has become common. Among these transparent polymers, poly (methyl methacrylate) is one of the most well-known and widely used plastics with excellent light-transmitting properties, which is used to make glass. The main disadvantage of acrylic glass is its scratch resistance which is often affected by storage conditions, transportation, and molding process, reducing the quality of polymer glass and thus its performance and longevity.

Mechanical blows to polymers lead to a loss of transparency and, as a result, a reduction in the efficiency of the material. To prevent this effect, the use of coatings to protect plastic surfaces was developed. For this purpose, transparent coatings with good scratch and wear resistance should be used. As it is clear from the results, the use of hard coatings on acrylic glass materials increases the wear resistance significantly. In a research, the scratchability of epoxy and poly (methyl methacrylate) samples was evaluated. The results show that the creep of poly (methyl methacrylate) had a high dependence on time (great increase with time) compared to epoxy. An increase in compliance equals a decrease in stiffness. Therefore, the decrease in the hardness of poly (methyl methacrylate), compared to epoxy, indicates that poly (methyl methacrylate) is more dependent on time.

In this research, commercial polymethyl methacrylate sheets were coated using epoxy resins. The surface properties of the sheet before and after coating were evaluated using tests of hardness, friction coefficient, wear, and most importantly transparency, and the results were compared.

Methodology

In this research, the samples were prepared from poly (methyl methacrylate) sheets used in making helicopter windows. To improve the abrasion and scratch resistance of these parts, the final polymer coating method was used; therefore, transparent resins without solvents had to be used.

In the present research, samples of coating based on epoxy resin were prepared in different amounts of 0, 0.5 and 1 weight percentage of epoxy silane resin (at room temperature) and each sample was mixed using a stirrer for 10 minutes at a speed of 600 rpm. Then, for each prepared sample, before applying the hardener coating with the ratio of hardener (epoxy resin 2:1), it was mixed at 600 rpm for 10 minutes using a stirrer.

Various standard tests containing hardness (shore D), hardness with pencil tip and scratch resistance was carried out for each sample.

Results and discussion

The results of the hardness test are presented in Table 2. The test was replicated three times on each sample, and their values and average values presented. As can be observed, the poly (methyl methacrylate) sheet with epoxy coating had a higher hardness than the

uncoated sheet, which is due to the presence of cross network connections in the epoxy structure. In addition, the addition of epoxy silane resin additive to the coating did not significantly change the hardness of the coating, and this indicated the lack of effect of the epoxy silane additive in curing the coating.

Table 1. The results of hardness tests for various prepared samples.

Sample code	Hradness (shore D)			
	Test1	Test2	Test3	Average
NON-EP	59	58	58	58.33
EP-S0	70	71	70	70.33
EP-S0.5	73	73	74	73.33
EP-S1	76	75	75	75.33

The results for the pencil hardness of the samples are shown in Table 2. As can be seen from this table, the hardness of the used pencil was H3 and the scratch resistance increased to 0.9 kg for the 1EP-S sample. For uncoated surfaces, a pencil with H hardness was used and the scratch resistance was 0.4 kg. This confirmed that applying a coating with suitable properties improves the scratch resistance of poly (methyl methacrylate).

Table 2. The results of tip pencil hardness tests for various prepared samples.

Sample code	Hradness (tip pencil)	
	Pencil hardness	Scratch resistance (kg)
NON-EP	H	0.40
EP-S0	H3	0.80
EP-S0.5	H3	0.85
EP-S1	H3	0.90

Conclusion

In the current research, polymethyl methacrylate sheets as a strategic material in the aviation industry were covered using different combinations of epoxy resin. Various surface tests such as hardness, abrasion resistance, scratch resistance and most importantly transparency were performed on the prepared samples and the results were compared with each other. The results showed that the use of transparent coatings based on epoxy resin was effective for improving the scratch resistance of transparent poly (methyl methacrylate) sheets and improved the scratch and wear resistance.



بهینه مقاومتی شیشه‌های اکریلیکی با استفاده از پوشش اپوکسی

رسول شمشادی^۱، مجتبی معصوم‌نژاد^{۲*}

۱- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

در سال‌های اخیر استفاده از پلیمرهای شفاف در زمینه‌هایی مانند کاربردهای نوری، شیشه‌های خودرو و غیره مرسوم می‌باشند. در میان آنها، پلی (متیل متاکریلات) از شناخته‌شده‌ترین و پرمصرف‌ترین پلاستیک‌ها با خواص عبور نور عالی هستند که برای ساخت شیشه‌ها استفاده می‌شوند. عیب اصلی شیشه‌های اکریلیکی خراش‌پذیری آنها می‌باشد که اغلب متأثر از شرایط نگهداری، حمل‌ونقل، فرایند شکل‌دهی است و موجب کاهش کیفیت شیشه‌های پلیمری می‌شود و در نتیجه کاهش عملکرد و طول عمر آنها را در پی دارد. برای این منظور برای بهبود مقاومت خراش از رزین گلیسیدوکسی پروپیل متوکسی سیلان به‌عنوان افزودنی به میزان ۰/۵ و ۱ درصد وزنی برای بهبود خواص سطحی استفاده شد. برای بررسی تأثیر اعمال پوشش رزین اپوکسی و افزودنی سیلانی (به‌عنوان عوامل کاهش دهنده ضریب اصطکاک) بر مقاومت به خراش و سایش از آزمون‌های سختی سنجی، سختی‌سنجی مدادی، مقاومت به خراش، ساییدگی و شستشو، ضریب اصطکاک و سایش Taber استفاده گردید. از نتایج به‌دست‌آمده مشاهده شد که با اعمال پوشش اپوکسی بر ورق‌های پلی (متیل متاکریلات)، با حفظ شفافیت، بهبود در مقاومت به خراش و سایش به‌ترتیب به میزان ۲۸ و ۲۰ درصد ایجاد شده است. با اینکه اعمال پوشش اپوکسی ضریب اصطکاک را کمی افزایش داده است اما استفاده از افزودنی سیلانی نه تنها این کاستی را جبران کرده و ضریب اصطکاک را کاهش داده است بلکه مقاومت سایشی و خراشی را بیشتر از ۵۰ درصد بهبود داده است.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۲۳

بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۲۴

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۰۱

کلید واژگان:

مقاومت به خراش
اکریلیک
اپوکسی
پوشش
سیلان

*نویسنده مسئول: مجتبی معصوم‌نژاد

پست الکترونیکی:

mmasomnezhad@tvu.ac.ir



مقدمه

در حال حاضر انواع مختلفی از مواد پلاستیکی به علت خواص ویژه شیشه‌های پلاستیکی، مانند سبک بودن، سهولت در تولید و هزینه پایین به عنوان جایگزینی برای شیشه‌های معدنی استفاده می‌شود. در میان آنها، پلی(متیل متاکریلات) و پلی کربنات دو نوع از شناخته شده‌ترین و پر مصرف‌ترین پلاستیک‌ها با خواص نوری عالی هستند [۱-۳]. گرچه مقاومت اکریلیک در برابر سایش و تأثیر حلال به مقدار قابل توجهی کمتر از برخی پلاستیک‌ها است اما به مراتب از پلی کربنات بهتر است. به هر حال، یکی از معایب اصلی شیشه‌های پلیمری، ضعف آنها در مقابل خراش است. از این رو، بهبود مقاومت سطح در مقابل خراش‌های مکانیکی، بدون هیچ آسیبی به شفافیت و خواص نوری آنها هنوز معضلی در زمینه شیشه‌های پلیمری است [۴]. تجربه‌ها نشان داده که تعویض مکرر شیشه‌های بالگرد نظامی به علت کاهش شفافیت ناشی از خراش سطحی اساساً امری ضروری است که در اثر کارکرد تیغه‌های شیشه‌پاک‌کن و برخورد ذرات گرد و غبار ایجاد می‌شود. در حال حاضر در بیشتر هواپیماها و بالگردها از شیشه اکریلیکی استفاده می‌شود اما برای مقابله با شرایط ساینده سختی کافی را ندارد [۵].

از اواسط دهه ۱۹۵۰، پلاستیک‌های اکریلیک آرایش‌یافته به‌طور گسترده در سایه‌بان‌ها و شیشه‌های هواپیماهای تحت فشار استفاده شدند. چقرمگی و مقاومت بر رشد ترک با فرایند کشش اصلاح شد به طوری که امکان کشش اکریلیک در میزان تنش‌های نسبتاً بالا برای حفظ یکپارچگی و امنیت در برابر شکست همراه است. به استثنای مقاومت پایین این شیشه‌ها در برابر سایش ناشی از شیشه‌پاک‌کن، اکریلیک آرایش‌یافته، جایگزین مناسبی برای شیشه‌های متداول از جنس گلس بود که در کنار صرفه‌جویی در وزن، ویژگی نشکن بودن و خطوط آبرودینامیک انحنادار نیز ایجاد می‌کند [۶]. گرچه کشش خواص اکریلیک را بهبود داده است اما مقاومت سایشی را به مقادیر کمتر از اکریلیک قالب‌گیری‌شده تضعیف کرده است.

ضربات مکانیکی به پلیمرها منجر به افت شفافیت و در نتیجه کاهش کارایی مواد می‌شود. برای جلوگیری از این تأثیر، استفاده از پوشش‌ها برای محافظت از سطوح پلاستیک، توسعه پیدا کردند. به این منظور باید از پوشش‌های شفاف با مقاومت به خراش و سایش خوب استفاده شود [۷؛ ۸]. عوامل مختلفی بر مقاومت به خراش ماده، تأثیرگذار هستند؛ برای مثال افزایش جرم ملکولی باعث کاهش مقاومت به خراش می‌شود. به عبارت دیگر، موادی که شاخص جریان مذاب کمتری دارند، مقاومت به خراش کمتری دارند. در توجیه آن می‌توان کاهش مقاومت به خراش را به میزان بلورینگی مرتبط دانست ولی کسی توجیه مستقلی برای آن ارائه نداده است. در مورد مقدار بلورینگی نشان داده شده است که هرچه مقدار بلورینگی بیشتر باشد مقاومت به خراش بیشتر می‌شود [۹]. در ۱۹۵۹، شیمی‌دان‌های شرکت Sierracin ورق‌های پلاستیک مقاوم به سایش، به نام Sierracin ۹۰۰، تولید کردند که می‌تواند بر سطوح خارجی یک شیشه اکریلیک آرایش‌یافته لایه‌گذاری شود و مشکل خراش‌پذیری را کاهش دهد [۶]. مشاهده شده است که سطح داخلی ساختار اکریلیک آرایش‌یافته در شیشه بویینگ ۷۴۷ از خراش‌های در حین تمیز کردن با استفاده از لایه‌گذاری یک ورق پلاستیکی مقاوم با سایش، Sierracin ۹۰۰، محافظت می‌شود. در تحقیقی دیگر از پوشش سخت روی اکریلیک استفاده شده است. همان‌طور که از نتایج مشخص است استفاده از پوشش‌های سخت روی مواد شیشه‌ای اکریلیک افزایش قابل توجهی در مقاومت به سایش ایجاد می‌کند [۱۰]. در تحقیقی خراش‌پذیری نمونه‌های اپوکسی و پلی(متیل متاکریلات) ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد که خزش پلی(متیل متاکریلات) در مقایسه با اپوکسی وابستگی زیادی به زمان (افزایش بسیار زیاد با زمان) دارد. افزایش کامپلیانس معادل کاهش در سختی است. بنابراین میزان کاهشی که سختی پلی(متیل متاکریلات) نشان داده، در مقایسه با اپوکسی، نشان‌دهنده وابستگی بیشتر پلی(متیل متاکریلات) به زمان است [۹؛ ۱۱]. بنابراین تحقیقاتی که به مقامت سایشی اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های آن با نانوذرات الماس پرداخته دیده می‌شود که ضریب اصطکاک و سایش اپوکسی و نانوکامپوزیت‌ها است با افزایش ND کاهش یافته است [۱۲]. در واقع، خواص اصطکاک تأثیر برجسته‌ای بر نرخ سایش دارد. روند رو به کاهش ضریب

اصطکاک با افزودن نانوذرات الماس تنش برشی پایینی را در سطح ایجاد و در نتیجه نرخ پایین تری در سایش را نشان می‌دهد [۱۲]. با توجه به تحقیقات باتیستا و همکاران [۱۳] در مورد ارتباط بین خواص خراش و ضریب اصطکاک نانوکامپوزیت‌های اپوکسی می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش ضریب اصطکاک نرخ سایش کاهش می‌یابد. از این رو نشان داده است که کم‌ترین ضریب اصطکاک مربوط به نمونه اپوکسی/ TiO_2 می‌باشد. چنین نتایج مشابهی در تحقیقات چانگ و ژانگ مشاهده شده است که کاهش نرخ سایش با افزودن TiO_2 را نشان می‌دهد [۱۴]. داساری و همکارانش [۱۵] نشان دادند که با افزایش مدول و دانسیته شبکه‌ای شدن پوشش‌های اپوکسی، متعاقباً سختی نیز ارتقا یافته است. در آزمون سختی، بیشتر تنش‌های فشاری دخیل هستند؛ از این رو نقش سفتی و مدول بسیار پررنگ است. توسعه مواد کامپوزیتی شفاف و مقاوم به سایش از اهمیت به‌سزایی در نگهداری پایداری مکانیکی سطوح با عبوردهی نوری (مانند لنزها، فیلم‌های فوتوگرافیک، شیشه جلوی اتومبیل، عینک آفتابی پنل‌های سلول خورشیدی و بسته‌بندی) دارد [۱۶]. پلیمرهای شفاف در دسترس تجاری شامل پلی‌کربنات، پلی‌استایرن، پلی‌متیل متاکریلات) و برخی سیستم‌های اپوکسی است. در میان این‌ها، مواد اپوکسی برای دمای بالاتر و مقاومت شیمیایی در کنار چسبندگی عالی به زیرلایه‌هایی مانند شیشه و دیگر پلیمرها شناخته شده است [۱۷-۱۹]. به‌علاوه، به‌علت عایق‌بندی الکتریکی، پایداری حرارتی عالی، جمع‌شدگی کم و هزینه پایین، رزین‌های اپوکسی به‌عنوان پوشش، چسب و رزین ماتریس برای کامپوزیت‌های پیشرفته استفاده شده است [۱۸]. یک گروه تحقیقاتی در کارهای خود پوشش شفاف کامپوزیتی برپایه اپوکسی ساخته است. این کامپوزیت‌های شفاف برای ساخت پوشش‌های چند کاربری، بسیار جذاب هستند. مشخص است که سایش سطح شفافیت سطح را کاهش می‌دهد و کارایی سطح موردنظر را در سیستم‌های شفاف تضعیف می‌کند یا از بین می‌برد [۲۰]. بنابراین، مشخص کردن رفتار سایشی این پوشش نانوکامپوزیتی و نحوه تأثیر سایش بر عملکرد آن مهم است.

در این پژوهش، ورق‌های پلی‌متیل متاکریلات تجاری با استفاده از رزین‌های اپوکسی پوشش داده شد. خواص سطحی ورق قبل و بعد از پوشش با استفاده از آزمون‌های سختی، ضریب اصطکاک، سایش و از همه مهم‌تر شفافیت ارزیابی شدند و نتایج با یکدیگر مقایسه گردیدند.

تجربی

مواد

در این پژوهش، نمونه‌ها از ورق پلی‌متیل متاکریلات) با نام تجاری Plexiglass مورد استفاده در شیشه بالگرد تهیه شده است. برای بهبود مقاومت سایشی و خراش این قطعات از روش پوشش‌دهی رزین‌های پلیمری استفاده شده است؛ از این رو باید از رزین‌های شفاف بدون حلال استفاده شود. به همین منظور از رزین اپوکسی شفاف و هاردنر با گرید PC-۱۳۰ تهیه‌شده از شرکت پلی‌کامپوزیت استفاده شد که رزنی شفاف و بیرنگ می‌باشد و به‌ترتیب ویسکوزیته بروکفیلد (در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد) ۸۰۰ و ۳۲۰ میلی‌پاسکال ثانیه دارند، همچنین به‌ترتیب دانسیته (در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد) ۱/۱۷ و ۱/۰۳ گرم بر سانتی‌مترمکعب دارد. همچنین از رزین اپوکسی سیلان با نام تجاری ESQUIM SL-۸۶۷ و با نام علمی ۳-گلیسیدوکسی پروپیل تری متوکسی سیلان استفاده شده است که گروه واکنش‌دهنده اپوکسی و ظاهر شفاف و بیرنگ دارد و دانسیته (۲۵ درجه سانتی‌گراد) ۱/۰۷ گرم بر سانتی‌مترمکعب، وزن مولکولی ۲۳۶/۴ گرم بر مول دمای جوش (در فشار ۱ اتمسفر) ۲۹۰ درجه سانتی‌گراد و نقطه اشتعال ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد دارد.

روش کار

تهیه نمونه

در این پروژه، نمونه‌هایی از پوشش بر پایه رزین اپوکسی تهیه شده است که دارای مقادیر مختلف ۰/۵ و ۱ درصد وزنی رزین اپوکسی سیلان (در دمای محیط) می‌باشند و هر نمونه با استفاده از هم‌زن به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۶۰۰ دور بر دقیقه تحت اختلاط قرار گرفت. سپس برای هر نمونه تهیه‌شده، پیش از اعمال پوشش هاردنر با نسبت ترکیب هاردنر: رزین اپوکسی ۲:۱ با استفاده از هم‌زن به مدت ۱۰ دقیقه تحت اختلاط ۶۰۰ دور بر دقیقه قرار گرفت. برای انجام آزمون‌ها، ورق‌های پلی‌متیل متاکریلات) در اندازه‌های مخصوصی (در بخش مربوط به آزمون‌ها گفته خواهد شد) برش خورده‌اند. برای اعمال پوشش از دستگاه فیلم‌کش با قابلیت تنظیم ضخامت استفاده شده است. پوشش‌دهی با ضخامت ۱۰۰ میکرون روی ورق‌های پلی‌متیل متاکریلات) انجام شده است. نمونه‌های تهیه‌شده برای خشک شدن کامل به مدت یک هفته در دمای محیط قرار داده شده‌اند. در این پژوهش ابتدا ورق‌های پلی‌متیل متاکریلات) بدون پوشش و سپس با اعمال رزین تهیه شد و نحوه تأثیر رزین‌ها بر خواص بررسی گردید. کدگذاری نمونه‌های تهیه‌شده به همراه مشخصات هر نمونه در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. کدگذاری نمونه‌های تهیه شده و ترکیب درصد مورد استفاده در پوشش هر کدام.

توضیحات	اپوکسی سیلان (درصد وزنی)	نسبت رزین: هاردنر	کد نمونه
نمونه ورق بدون پوشش	-	-	NON-EP
با پوشش اپوکسی خالص	۰	۱:۱	EP-S 0
پوشش اپوکسی دارای سیلان	۰.۵	۱:۱	EP-S 0.5
پوشش اپوکسی دارای سیلان	۱	۱:۱	EP-S 1

آزمون‌ها

آزمون سختی سنجی

برای اندازه‌گیری سختی نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM D ۲۲۴۰ عمل شده است. در این روش یک بخش متحرک فرورونده وجود دارد که برای تعیین سختی پلیمر استفاده می‌شود. برای این آزمون دو مقیاس Shore A و Shore D وجود دارد که مقیاس Shore D با نوک تیز برای مواد سخت‌تر مانند پلاستیک‌ها (۴۰D تا ۹۰D) است. میزان فرورفتگی به میزان سختی وابسته است.

آزمون سختی سنجی مدادی

در این آزمون، سختی پوشش به وسیله نوک مداد سنجیده می‌شود. نمونه روی یک سطح صاف محکم به صورت افقی قرار داده و با مداد، آزمون انجام شد؛ به طوری که مداد تحت زاویه ۴۵ درجه سانتی‌گراد نسبت به سطح قرار گرفت و سپس با اعمال نیروی ثابت و یکنواخت مداد به سمت مخالف کشیده شد. مدادهای مورد استفاده متداول برای این آزمون به صورت زیر است.

6B, 5B, 4B, 3B, 2B, B, HB, F, H, 2H, 3H, 4H, 5B, 6H



آزمون مقاومت به خراش

دستگاه اندازه‌گیری سختی خراش مدل ۲۳۹/II به‌منظور اندازه‌گیری مقاومت به خراش پوشش‌های سطحی طراحی شده است. این دستگاه دارای سه سوزن یا تیپ‌های خراش‌دهنده است. سوزنی که در این آزمون استفاده شده طبق استانداردهای ISO ۱۵۱۸ و DEF ۱۰۵۳ تهیه شده است. نوک سوزن مخروطی شکل از جنس کربید و دارای قطر ۱ میلی‌متری است. نیروی خراش‌دهنده ۱-۲۰ نیوتن می‌باشد که با حرکت وزنه در طول ترازو قابل تنظیم است. در آغاز آزمون، وسیله خراش‌دهنده به سمت پایین آمدند و در طول نمونه حرکت کردند. صفحه نمونه را می‌توان از پهلو حرکت داد تا تعدادی خراش کنار هم و با نیروهای مختلف ایجاد شود. با این روش می‌توان نیروی مؤثر برای ایجاد خراش را اندازه‌گیری کرد. اندازه صفحه موردآزمون که پوشش روی آن قرار دارد حداکثر دارای طول، عرض و ضخامت به ترتیب ۱۵۰، ۹۰ و ۲۰ میلی‌متری می‌باشد.

آزمون مقاومت سایشی و شست‌وشو

انجام این آزمون برای پوشش‌هایی که تحت سایش و شست‌وشوی زیاد هستند ضروری است. از آنجایی که شیشه‌های بالگرد نیز به دفعات زیاد شست‌وشو می‌شوند، از مهم‌ترین عوامل ایجاد خراش در سطح شیشه‌ها به‌شمار می‌روند. این آزمون می‌تواند برای ارزیابی کیفی نمونه‌ها مفید باشد. برای این آزمون از دستگاه شبیه‌سازی آزمایشگاهی مدل SC lab/۰۲۰ (Pars HORM Co.) استفاده شد. دستگاه این آزمون شامل قطعه متحرک و عمل‌کننده فرچه‌ای (از جنس پلی‌اتیلن) است که با استفاده از الکتروموتور حرکت رفت و برگشتی دارد. سرعت چرخش فرچه‌ها ۱۵۰ دور بر دقیقه و حرکت فرچه ۳۷ حرکت رفت و برگشت در دقیقه است. نمونه در ابعاد ۷۰×۴۰ میلی‌متر تهیه شد و درون دستگاه قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده به‌صورت تعداد دور رفت و برگشتی برای وزن مشخصی از فرچه است که طول ۵/۰ تا ۱ اینچ خراش ایجاد کرده باشد. این تعداد سیکل به‌عنوان مقاومت سایشی اعلام می‌شود. این آزمون براساس استاندارد ASTM D۲۴۸۶ انجام شده است. همچنین میزان فرسایش نمونه‌ها نیز با استفاده از معادله ۱ زیر محاسبه می‌شود.

$$A = \text{وزن اولیه نمونه}$$

$$B = \text{وزن نمونه بعد از آزمایش}$$

$$(1) \quad \text{فرسایش نرخ} = \frac{A - B}{\text{تعداد دور}} \times 100$$

اندازه‌گیری ضریب اصطکاک

برای تعیین ضریب اصطکاک طبق استاندارد ASTM ۲۰۴۷ عمل می‌شود. در این آزمون از یک دستگاه کشش افقی استفاده می‌شود به‌طوری که یک سورت‌مه لاستیکی روی سطح قرار می‌گیرد و توسط یک نیروسنج کشیده می‌شود. مقدار نیروی لازم برای شروع حرکت و همچنین نیروی لازم برای ادامه حرکت مشخص می‌شود. نیروی خوانده شده در ابتدای حرکت ضریب اصطکاک استاتیک و نیروی خوانده شده طی حرکت ضریب اصطکاک دینامیکی را مشخص می‌کند.

آزمون سایش Taber

در این آزمون، نمونه با چرخش صفحه زیر چرخ‌های ساینده با وزن مشخصی ساییده می‌شود. مقاومت سایشی با میزان کاهش وزن در تعداد دور مشخص اندازه‌گیری می‌شود. این آزمون طبق استاندارد ASTM D۴۰۶۰ انجام شد. در این آزمون نمونه باید به‌صورت صفحه‌ای دایره‌ای با قطر ۱۰۰ میلی‌متر یا صفحه مربعی شکل با طول ابعاد ۱۰ میلی-متر باشد. میزان وزن و تعداد دور برای انجام این آزمون، بسیار بر نتیجه تأثیر دارد. در این پژوهش وزن روی چرخ‌های ساینده باید ۱۰۰۰ گرم باشد.

کاهش وزن: میزان کاهش وزن برحسب میلی‌گرم در یک تعداد دور مشخص که با (L) نشان داده می‌شود، معادله ۲.

$$A = \text{وزن اولیه نمونه برحسب میلی‌گرم}$$

$$B = \text{وزن نمونه بعد از سایش برحسب میلی‌گرم}$$

$$L = A - B$$

(۲)

نتایج و بحث

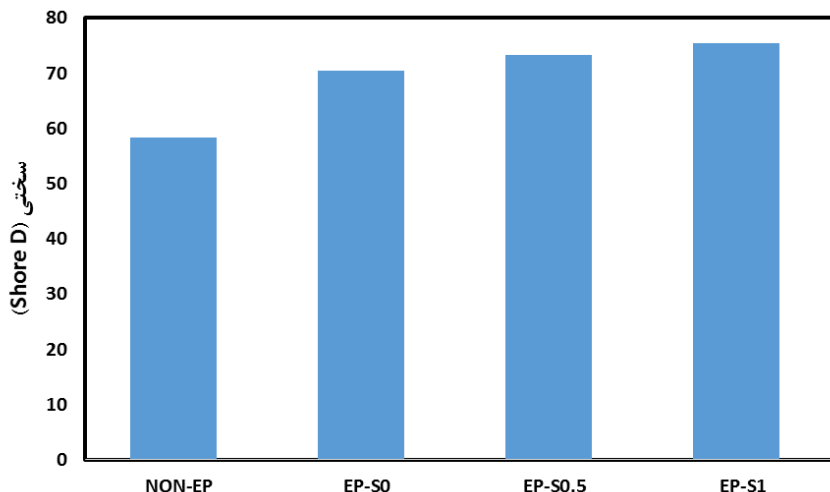
سختی

نتایج حاصل از این آزمون در جدول ۲ ارائه شده است. آزمون روی هر نمونه سه بار تکرار شده است که مقادیر آن و مقادیر میانگین ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنیم ورق پلی‌متیل متاکریلات) دارای پوشش اپوکسی، سختی بالایی نسبت به ورق بدون پوشش دارد که این مشاهده ناشی از وجود اتصالات عرضی شبکه‌ای در ساختار اپوکسی است. همچنین اضافه کردن افزودنی رزین اپوکسی سیلان به پوشش تغییر قابل ملاحظه‌ای در سختی پوشش ایجاد نکرده است و این نشان‌دهنده تأثیر نداشتن افزودنی اپوکسی سیلان در پخت پوشش است.

جدول ۲. نتایج حاصل از آزمون سختی نمونه‌های ورق پلی‌متیل متاکریلات) بدون پوشش (NON-EP) و ورق با پوشش اپوکسی خالص (EP-S0) و اپوکسی با ۵/۰ (EP-S ۰.۵) و ۱ (EP-S ۱) درصد وزنی از اپوکسی سیلان.

کد نمونه	سختی (Shore D)			
	آزمایش ۱	آزمایش ۲	آزمایش ۳	میانگین
NON-EP	۵۹	۵۸	۵۸	۵۸.۲۳
EP-S ۰	۷۰	۷۱	۷۰	۷۰.۳۳
EP-S ۰.۵	۷۳	۷۳	۷۴	۷۳.۳۳
EP-S ۱	۷۶	۷۵	۷۵	۷۵.۳۳

نتایج سختی Shore D را برای ورق‌های پلی‌متیل متاکریلات) خالص و دارای پوشش مطابق استاندارد ASTM D۲۲۴۰ گزارش شده است. همان‌طور که از نمودار میله‌ای در شکل ۱ مشاهده می‌شود سختی پوشش اعمال شده از پلی‌متیل متاکریلات) خالص، بیشتر است. مقدار میانگین سختی Shore D برای نمونه‌های NON-EP، EP-S ۰، EP-S ۰/۵ و EP-S ۱ به ترتیب مقادیر ۵۸/۳۳، ۷۰/۳۳، ۷۳/۳۳ و ۷۵/۳۳ می‌باشد. همه نمونه‌ها سختی بهتری از پلی‌متیل متاکریلات) خالص نشان داده‌اند. افزایش در سختی به علت اتصالات عرضی شبکه‌ای ساختار پوشش است.



شکل ۱. نمودار نتایج آزمون سختی نمونه‌های ورق پلی(متیل متاکریلات) بدون پوشش (NON-EP) و ورق با پوشش اپوکسی خالص (EP-S0) و اپوکسی با ۰/۵ (EP-S 0.5) و ۱ درصد وزنی از اپوکسی سیلان.

سختی مدادی

بررسی نتایج در این آزمون به صورتی است که اگر در حین انجام آزمون، نوک مداد شکسته شود؛ سختی مداد به- عنوان سختی قلم گزارش می‌شود. در غیر این صورت، آزمایش با مدادی با سختی یک درجه کمتر انجام می‌شود و این عمل تا جایی ادامه می‌یابد تا مدادی پیدا شود که پوشش را خراش ندهد. نتایج برای سختی مدادی نمونه‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود، سختی مداد استفاده شده ۳H می‌باشد و مقاومت به خراش تا مقدار ۰.۹ کیلوگرم برای نمونه EP-S1 افزایش یافته است. برای سطوح بدون پوشش از مداد با سختی H استفاده شده و مقاومت خراشیدگی ۰/۴ کیلوگرم به دست آمده است. از این رو تأیید می‌شود که اعمال پوشش با خواص مناسب مقاومت به خراشیدگی پلی(متیل متاکریلات) را بهبود می‌دهد.

جدول ۳. سختی مدادی نمونه‌های ورق پلی(متیل متاکریلات) بدون پوشش (NON-EP) و ورق با پوشش اپوکسی خالص (EP-S0) و اپوکسی با ۰/۵ درصد (EP-S0/۵) و ۱ درصد (EP-S1) وزنی از اپوکسی سیلان.

کد نمونه	سختی مدادی	
	سختی مداد	مقاومت خراش (kg)
NON-EP	H	0.4
EP-S 0	3H	0.8
EP-S 0.5	3H	0.85
EP-S 1	3H	0.9

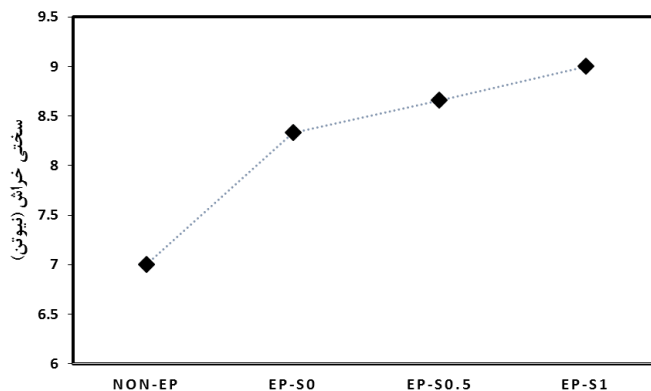
مقاومت به خراش

برای تعیین مقاومت به خراش، نمونه‌ها بعد از پخت کامل پس از یک هفته، آزمون قرار شدند. نتایج در جدول ۴ و شکل ۲ آمده است. آزمون برای هر نمونه با سه بار تکرار انجام شده است که نتایج هر بار تکرار و مقدار میانگین آنها ارائه

شده است. نتایج نشان می‌دهد که سختی خراش نمونه EP-S۰، ورق پوشش داده‌شده با رزین اپوکسی، در مقایسه با نمونه NON-EP، ورق بدون پوشش، از ۷ نیوتن به ۸/۳ نیوتن افزایش می‌یابد و این به علت خاصیت شبکه‌ای رزین اپوکسی است که سختی بالایی در مقایسه با ورق پلی (متیل متاکریلات) دارد. همچنین با افزودن مقادیر ۰/۵ و ۱ درصد وزنی از اپوکسی سیلان منجر به افزایش این مقدار به ۸/۶۶ و ۹ به ترتیب برای نمونه‌های EP-S۰/۵ و EP-S۱ می‌شود. مشاهده می‌شود که با افزایش مقادیر ۰/۵ و ۱ درصد وزنی از اپوکسی سیلان به پوشش، تنها مقدار کمی توانسته مقاومت به خراش را افزایش دهد که می‌توان دلیل آن را تأثیر ناچیز حضور افزودنی اپوکسی سیلان در دانسیته اتصالات عرضی ساختار شبکه‌ای پوشش دانست.

جدول ۴. نتایج حاصل از آزمون خراش بر روی نمونه‌های ورق پلی (متیل متاکریلات) بدون پوشش (NON-EP) و ورق با پوشش اپوکسی خالص (EP-S۰) و اپوکسی با ۰/۵ (EP-S۰.۵) و ۱ (EP-S۱) درصد وزنی از اپوکسی سیلان.

کد نمونه	سختی خراش (N)			میانگین
	آزمایش ۱	آزمایش ۲	آزمایش ۳	
NON-EP	۷	۷	۷	۷
EP-S ۰	۸	۸	۹	۸.۳۳
EP-S ۰.۵	۹	۸	۹	۸.۶۶
EP-S ۱	۹	۱۰	۸	۹



شکل ۲. نمودار مقاومت به خراش نمونه‌های ورق پلی (متیل متاکریلات) بدون پوشش (NON-EP) و ورق با پوشش اپوکسی خالص (EP-S0) و اپوکسی با ۰/۵ (EP-S۰.۵) و ۱ (EP-S۱) درصد وزنی از اپوکسی سیلان.

مقاومت سایشی و شست‌وشو

آزمون مقاومت سایشی بنابر استاندارد DIN۵۳۷۷۸

استاندارد DIN۵۳۷۷۸ چگونگی اندازه‌گیری مقاومت سایشی پوشش‌ها را توصیف می‌کند. ایده اصلی شمارش تعداد سیکل‌های موردنیاز برای سایش پوشش با فرچه است. بنابر این استاندارد، مقاومت پوشش به شست‌وشو ۱۰۰۰ سیکل فرچه را تحمل می‌کند. پوشش با ضخامت ۱۰۰ میکرون اعمال شد. ضخامت پوشش به‌دقت بررسی گردید. پس از خشک شدن پس از ۷ روز در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵۰ درصدی، آزمون به‌صورت خیس انجام شد. سه نمونه از پوشش، آزمایش و میانگین نتایج گزارش شد. فاکتورهای اصلی تأثیرگذار بر نتایج به‌صورت زیر است:

- ضخامت پوشش خشک
- زمان خشک شدن و ایجاد فیلم
- خواص مکانیکی پوشش در شروع و خواص چسبندگی به زیرآبند در پایان آزمون
- شرایط آزمون.

آزمون مقاومت سایشی بنابر استاندارد ISO۱۱۹۹۸

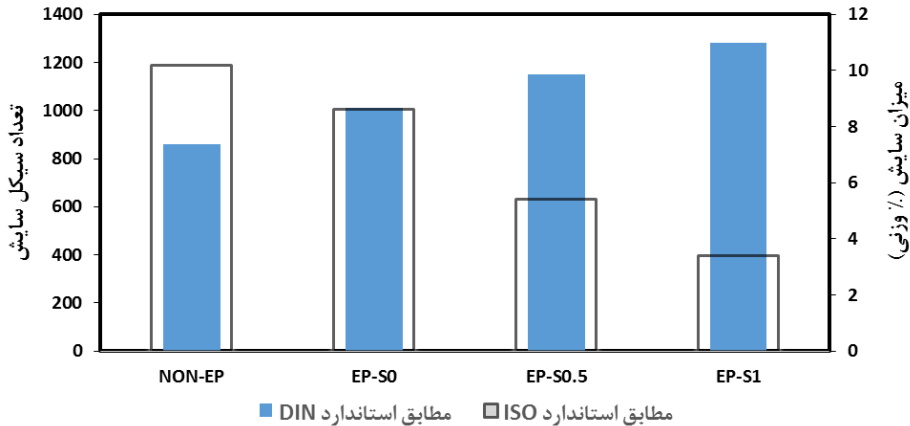
در این آزمون، یک پوشش با تعداد ۲۰۰ سیکل تحت خراش قرار می‌گیرد. وزن پوشش خراشیده، با ضخامت فیلم متناظر اندازه‌گیری و محاسبه می‌شود. ضخامت ساییده‌شده بیشتر پوشش، نشان‌دهنده مقاومت کمتر رنگ است.

جدول ۵. مقاومت سایشی و شست‌وشوی نمونه‌های ورق پلی‌متیل متاکریلات) بدون پوشش (NON-EP) و ورق با

پوشش اپوکسی خالص (EP-S0) و اپوکسی با ۰/۵ (EP-S۰.۵) و ۱ (EP-S۱) درصد وزنی از اپوکسی سیلان

کد نمونه	تعداد سیکل سایش (DIN)	میزان سایش (% وزنی) (ISO)
NON-EP	۸۶۱	۱۰.۲
EP-S۰	۱۰۱۲	۸.۶
EP-S۰.۵	۱۱۵۱	۵.۴
EP-S۱	۱۲۸۱	۳.۴

اندازه‌گیری‌ها براساس استاندارد DIN در یک محدوده ۵۰۰ تا ۲۵۰۰ سیکل انجام شد. نتایج در جدول ۵ گزارش شده است. همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد با اعمال پوشش روی ورق پلی‌متیل متاکریلات) مقاومت سایشی، افزایش می‌یابد و تعداد سیکل‌هایی که پوشش برپایه اپوکسی تحمل کردند در مقایسه با ورق‌های پلی‌متیل متاکریلات) از ۸۶۴ دور به ۱۰۱۲ دور رسید. این بهبود مقاومت سایشی با اضافه شدن افزودنی سیلانی بیشتر شد؛ به‌طوری که برای نمونه‌های EP-S۰/۵ و EP-S۱ به ترتیب به ۱۱۵۱ و ۱۲۸۱ دور رسید.



شکل ۳. نتایج آزمون مقاومت سایشی و شست‌وشو براساس دو روش استاندارد ISO و DIN برای نمونه‌های ورق پلی(متیل متاکریلات) بدون پوشش (NON-EP) و ورق با پوشش اپوکسی خالص (EP-S₀) و اپوکسی با ۰/۵ (EP-S_{0.5}) و ۱ (EP-S₁) درصد وزنی از اپوکسی سیلان.

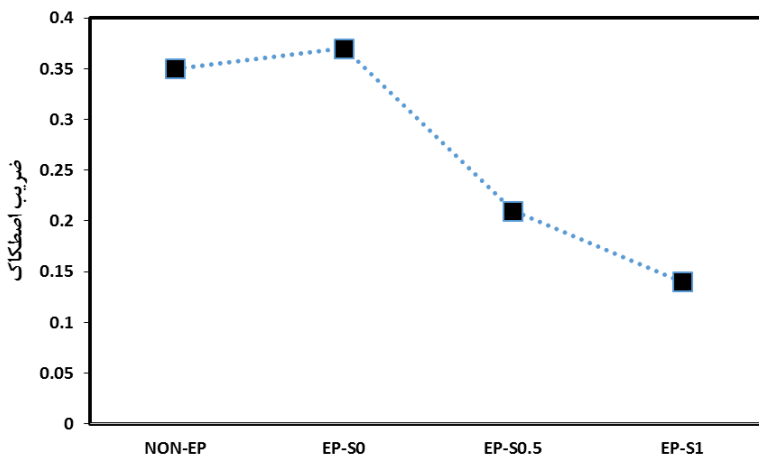
در روش آزمون براساس استاندارد ISO، درصد کاهش وزن در هر مترمربع از نمونه با اعمال پوشش‌ها کاهش یافته است. نتایج براساس استاندارد ISO نیز تأییدکننده نتایج استاندارد DIN می‌باشد. به طوری که بنابر نتایج ارائه شده در شکل ۳ مشاهده می‌شود با اعمال پوشش اپوکسی روی ورق پلی(متیل متاکریلات) و سپس افزودن مقادیر ۰/۵ و ۱ درصد وزنی افزودنی سیلانی، میزان سایش، روند نزولی دارد و کاهش می‌یابد.

ضریب اصطکاک

نتایج آزمون ضریب اصطکاک برای نمونه‌های تهیه‌شده در جدول ۶ و شکل ۴ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با اعمال پوشش اپوکسی روی ورق پلی(متیل متاکریلات) ضریب اصطکاک از ۰/۳۵ به ۰/۳۷ افزایش یافته است. اما با افزودن رزین اپوکسی سیلان به پوشش در مقادیر ۰/۵ و ۱ درصد وزنی ضریب اصطکاک به ترتیب به مقادیر ۰/۲۱ و ۰/۱۴ کاهش یافته است. افزایش ضریب اصطکاک در نمونه دارای پوشش اپوکسی خالص (EP-S₀) نسبت به نمونه ورق پلی(متیل متاکریلات) بدون پوشش (NON-EP) که به معنای بدتر شدن کیفیت سطح از لحاظ لغزش می‌باشد به علت بالا بودن کشش سطحی اپوکسی در مقایسه با پلی(متیل متاکریلات) می‌باشد که با افزودن ترکیب سیلانی به پوشش با کاهش کشش سطحی میزان ضریب اصطکاک و در نتیجه کیفیت لغزندگی سطحی، بهبود می‌یابد.

جدول ۶. ضریب اصطکاک نمونه‌های ورق پلی(متیل متاکریلات) بدون پوشش (NON-EP) و ورق با پوشش اپوکسی خالص (EP-S₀) و اپوکسی با ۰/۵ (EP-S_{0.5}) و ۱ (EP-S₁) درصد وزنی از اپوکسی سیلان.

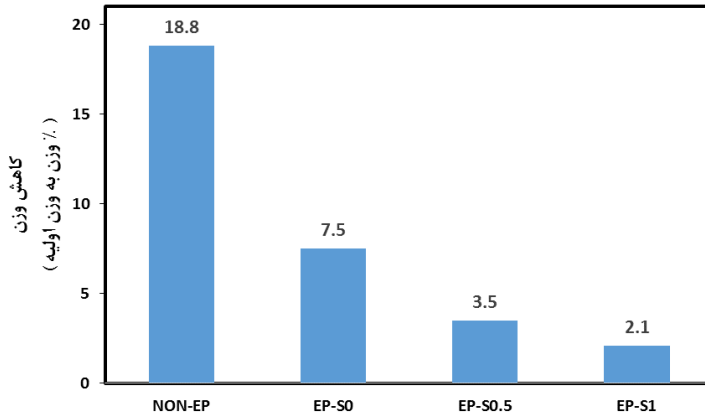
کد نمونه	ضریب اصطکاک
NON-EP	0.35
EP-S 0	0.37
EP-S 0.5	0.21
EP-S 1	0.14



شکل ۴. ضرب اصطکاکی نمونه‌های ورق پلی‌متیل متاکریلات) بدون پوشش (NON-EP) و ورق با پوشش اپوکسی خالص (EP-S0) و اپوکسی با ۰/۵ (EP-S ۰.۵) و ۱ (EP-S ۱) درصد وزنی از اپوکسی سیلان.

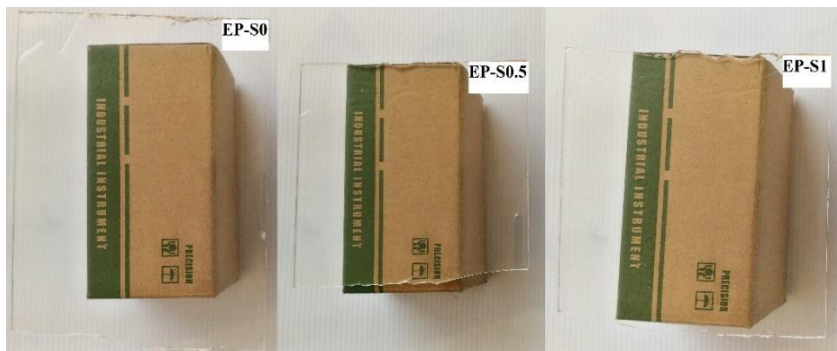
آزمون سایشی Taber

نمونه‌ها برای ارزیابی مقاومت فرسایشی با روش آزمون Taber بررسی شدند. در این آزمون، نتایج به دست آمده، حاصل از اعمال نیرو توسط وزنه ۱۰۰۰ گرمی به نمونه‌ها است. کاهش وزن‌ها برای اندازه‌گیری مقاومت فرسایشی ثبت شده‌اند. همانطور که شکل ۵ نشان می‌دهد با اعمال پوشش روی نمونه‌های ورق پلی‌متیل متاکریلات)، کاهش قابل توجهی در میزان افت وزن ایجاد شده است؛ به طوری که برای نمونه‌های ورق پلی‌متیل متاکریلات) بدون پوشش (NON-EP)، نمونه با پوشش اپوکسی خالص (EP-S0)، و نمونه‌های با پوشش اپوکسی و افزودنی سیلانی به مقدار ۰/۵ درصد (EP-S ۰/۵) و ۱ درصد (EP-S ۱) وزنی به ترتیب مقادیر ۱۸/۸، ۷/۵، ۳/۵ و ۲/۱ به دست آمده است. نتایج نشان‌دهنده این مطلب است که در آزمون سایش Taber پوشش‌های با ساختار شبکه‌ای بالاتر، عملکرد بهتری دارند. بنابر مشاهدات می‌توان فهمید که نتایج تغییرات کاهش وزن، روند یکسانی با مابقی آزمون‌ها دارند.



شکل ۵. درصد کاهش وزن نسبت به وزن اولیه به دست آمده از آزمون سایشی Taber برای نمونه‌های ورق پلی‌متیل متاکریلات) بدون پوشش (NON-EP) و ورق با پوشش اپوکسی خالص (EP-S۰) و اپوکسی با ۰/۵ (EP-S ۰/۵) و ۱ (EP-S ۱) درصد وزنی از اپوکسی سیلان.

از آنجایی که اصلی‌ترین ویژگی شیشه‌های پلیمری، شفافیت و عبورپذیری نور بدون هیچ‌گونه انحرافی است؛ بنابراین هرگونه تغییر یا اصلاحی روی شیشه‌ها به منظور بهبود خواص سایشی نباید بر عبورپذیری نور تأثیر منفی داشته باشد. برای این منظور نمونه‌های ورق پلی‌متیل متاکریلات) با پوشش اپوکسی خالص (EP-S۰) و اپوکسی با ۰/۵ (EP-S ۰/۵) و ۱ (EP-S ۱) درصد وزنی از اپوکسی سیلان ارزیابی شدند. تصاویر نمونه‌های تهیه شده در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود استفاده از پوشش‌های بهبوددهنده مقاومت به خراش، هیچ تأثیر مخربی بر عبورپذیری نور نداشتند و هیچ انحراف دیدی به وجود نیاوردند و نیز هیچ‌گونه آسیبی ایجاد نشد.



شکل ۶. تصاویر نمونه‌های ورق پلی‌متیل متاکریلات) با پوشش اپوکسی خالص (EP-S۰) و اپوکسی با ۰/۵ (EP-S ۰/۵) و ۱ (EP-S ۱) درصد وزنی از اپوکسی سیلان.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، ورق‌های پلی‌متیل متاکریلات به‌عنوان یک ماده استراتژیک در صنعت هوایی با استفاده از ترکیبات مختلف رزین اپوکسی تحت پوشش قرار گرفت. آزمون‌های مختلف سطحی نظیر سختی، مقاومت سایشی، مقاومت به

خراش و از همه مهم‌تر شفافیت بر روی نمونه‌های مختلف تهیه‌شده صورت پذیرفت و نتایج با یکدیگر مقایسه گردید. نتایج نشان داد که استفاده از پوشش‌های شفاف برپایه رزین اپوکسی برای بهبود مقاومت به خراش ورق‌های شفاف پلی‌متیل متاکریلات) تأثیر گذار بود و بهبود مقاومت به خراش پذیری و سایش را ایجاد می‌کند. اما اعمال پوشش برپایه رزین اپوکسی خالص به علت بالا بردن ضریب اصطکاک توصیه نمی‌شود. از آنجا که به هنگام پرواز به شیشه‌های بالگردها تنش زیادی وارد می‌شود؛ بالا رفتن ضریب اصطکاک می‌تواند موجب برهم‌زدن آیرودینامیک سازه شود. از طرفی مشاهده شده که استفاده از افزودنی سیلانی به مقادیر ۰/۵ و ۱ درصد وزنی در پوشش برپایه اپوکسی می‌تواند تأثیر مضاعفی بر تقویت رزین اپوکسی داشته باشد. همان‌طور که از نتایج برمی‌آید استفاده از افزودن سیلانی نه تنها توانسته نقص پوشش اپوکسی در مورد بالا بردن ضریب اصطکاک را رفع کند بلکه توانسته با کاهش مناسب ضریب اصطکاک، این نقص را به نقطه قوت تبدیل کند؛ به طوری که دیده شده است که نمونه دارای پوشش اپوکسی با افزودنی سیلانی، به میزان ۱ درصد وزنی توانسته سختی، مقاومت به خراش، مقاومت به سایش، اصطکاک و مقاومت به فرسایش را به ترتیب به میزان ۲۹/۲، ۲۸/۵، ۶۶/۷، ۶۰ و ۸۹ درصد بهبود دهد.

References

- [1] Alkawaz, A., Hadi, N., & Hamzah, A. (2017). Study the Effect of Bi-Layers on the Friction and Impact Resistance of PMMA/Nano-composite Hard Coatings. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(16), 6176-6181. https://www.researchgate.net/publication/319493655_Study_the_Effect_of_Bi-Layers_on_the_Friction_and_Impact_Resistance_of_PMMA_Nano-composite_Hard_Coatings
- [2] Nakhaei, M. R., & Ghorbankhan, A. (2021). Experimental Investigation on Mechanical Properties of PA6/NBR/Graphene Nanocomposite by Response Surface Methodology. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 18(3), 327-341. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.275252.1405>
- [3] Scharfe, B., Lehmann, S., Gerdes, T., & Brüggemann, D. (2019). Optical and Mechanical Properties of Highly Transparent Glass-Flake Composites. *Journal of Composites Science*, 3(4), 1-17. <https://doi.org/10.3390/jcs3040101>
- [4] Mohamadpour, S., Pourabbas, B., & Fabbri, P. (2011). Anti-scratch and adhesion properties of photo-curable polymer/clay nanocomposite coatings based on methacrylate monomers. *Scientia Iranica*, 18(3), 765-771. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2011.06.001>
- [5] McGarvey, J., & Kay, B. (1976). *Design and Development of Helicopter Transparent Enclosures*. Army air mobility research and development lab fort eustis va eustis directorate. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA092981.pdf>
- [6] Wisner, G. L. (1970). *New Materials in Aircraft Windshields*. Society of Automotive Engineers Technical Paper. <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/700862/>
- [7] Messori, M., Toselli, M., Pilati, F., Fabbri, E., Fabbri, P., & Busoli, S. (2003). Poly(caprolactone)/silica organic-inorganic hybrids as protective coatings for poly(methyl methacrylate) substrates. *Surface Coatings International Part B: Coatings Transactions*, 86(3), 181-186. <https://doi.org/10.1007/BF02699651>
- [8] Song, K. (2018, May 13-16). *Wear-resistant coatings for solar cell panels*. 11th Annual TechConnect World Innovation Conference and Expo, Held Jointly with the 20th Annual Nanotech Conference and Expo, the 2018 SBIR/STTR Spring Innovation Conference, and the Defense TechConnect DTC Spring Conference, Anaheim, United States. <https://asu.pure.elsevier.com/en/publications/wear-resistant-coating-s-for-solar-cell-panels>

- [9] Memar Maher, B. (2019). *Mechanical properties (scratch resistance) improvement of nano composite with nano fillers*. [Doctoral, Semnan]. Iran.
- [10] Kay, B. F. (1978). *Design, Test, and Acceptance Criteria for Helicopter Transparent Enclosures*. United technologies corp stratford ct sikorsky aircraft div. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA064318>
- [11] VanLandingham, M. R., Sung, L-P., Chang, N-K., Wu, T. Y., Chang, S-H., & Jardret, V. D. (2004). Measurement approaches to develop a fundamental understanding of scratch and mar resistance. *Journal of Coatings Technology and Research* 1(4), 257-266. <https://doi.org/10.1007/s11998-004-0028-9>
- [12] Ayatollahi, M. R., Alishahi, E., Doagou-R, S., & Shadlou, S. (2012). Tribological and mechanical properties of low content nanodiamond/epoxy nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*, 43(8), 3425-3430. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.01.022>
- [13] Bautista, Y., Gonzalez, J., Gilabert, J., Ibañez, M. J., & Sanz, V. (2011). Correlation between the wear resistance, and the scratch resistance, for nanocomposite coatings. *Progress in Organic Coatings*, 70(4), 178-185. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2010.09.022>
- [14] Chang, L., & Zhang, Z. (2006). Tribological properties of epoxy nanocomposites: Part II. A combinative effect of short carbon fibre with nano-TiO₂. *Wear*, 260(7-8), 869-878. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.04.002>
- [15] Dasari, A., Yu, Z-Z., & Mai, Y-W. (2009). Fundamental aspects and recent progress on wear/scratch damage in polymer nanocomposites. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 63(2), 31-80. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2008.10.001>
- [16] Asadi Borojeni, B., & Mozafari Vanani, L. (2020). The effect of tool geometry on the tensile strength of polypropylene Components Welded by Friction Stir Welding Method. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 17(1), 133-145. <https://doi.org/10.48301/kssa.2020.112761>
- [17] Azeez, A. A., Rhee, K. Y., Park, S. J., & Hui, D. (2013). Epoxy clay nanocomposites – processing, properties and applications: A review. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 308-320. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.012>
- [18] Gu, H., Ma, C., Gu, J., Guo, J., Yan, X., Huang, J., Zhang, Q., & Guo, Z. (2016). An overview of multifunctional epoxy nanocomposites. *Journal of Materials Chemistry C*, 4(25), 5890-5906. <https://doi.org/10.1039/C6TC01210H>
- [19] Song, K., Zhang, Y., Meng, J., Green, E. C., Tajaddod, N., Li, H., & Minus, M. L. (2013). Structural Polymer-Based Carbon Nanotube Composite Fibers: Understanding the Processing–Structure–Performance Relationship. *Materials*, 6(6), 2543-2577. <https://doi.org/10.3390/ma6062543>
- [20] Dyett, B. P., Wu, A. H., & Lamb, R. N. (2014). Toward Superhydrophobic and Durable Coatings: Effect of Needle vs Crater Surface Architecture. *American Chemical Society Applied Materials & Interfaces*, 6(12), 9503-9507. <https://doi.org/10.1021/am501900b>