



## ارزیابی تأثیر نسبت رنگدانه به رزین بر خواص نوری - حرارتی و عمومی پوشش‌های کنترل گرمایی سفید سیلیکاتی به کار رفته در ماهواره

نرگس کیومرثی پور<sup>۱</sup>، رضا شجاع رضوی<sup>۲</sup>، کمال قانی<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، اصفهان، ایران، صندوق پستی: ۸۳۱۴۵-۱۱۵

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، اصفهان، ایران، صندوق پستی: ۸۳۱۴۵-۱۱۵

۳- استادیار، دانشکده شیمی کاربردی، مجتمع دانشگاهی علوم، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، اصفهان، ایران، صندوق پستی: ۸۳۱۴۵-۱۱۵

تاریخ دریافت: ۹۱/۳/۲۷ تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۱/۲۵ در دسترس به صورت الکترونیکی از: ۱۳۹۲/۶/۲۰

### چکیده

رنگ‌های کنترل گرمایی پوشش‌هایی با خواص نوری و حرارتی ویژه هستند که به منظور کنترل گرمای ورودی به سامانه‌های فضایی بر سطح بیرونی آنها اعمال می‌شوند. در تحقیق حاضر، به بررسی تأثیر نسبت رنگدانه به رزین بر خواص عمومی و نوری - حرارتی رنگ‌های کنترل گرمایی پرداخته شده است. بدین منظور، با استفاده از رنگدانه اکسید روی و رزین سیلیکات پتاسیم با نسبت‌های مختلف رنگدانه به رزین، پوشش‌هایی تهیه و بر سطح آلومینیم اعمال شدند و خواص عمومی و نوری - حرارتی آنها بررسی شد. ضریب جذب خورشیدی و نشر گرمایی با استفاده از دستگاه‌های طیف سنج بازتابی و نشر سنج اندازه‌گیری شدند. ضخامت، انعکاس و براقت نمونه‌ها با استفاده از تجهیزات مربوطه ارزیابی شد. به منظور انجام آزمون سایش، از دستگاه سایش Taber استفاده شد. چسبندگی پوشش‌ها با استفاده از آزمون نوار و دستگاه شین ۷۵۰ و مقاومت خمشی با استفاده از استوانه‌های مندرل اندازه‌گیری شد. ارزیابی سطح نمونه‌ها پس از سایش با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت رنگدانه به رزین، جذب خورشیدی، چسبندگی، مقاومت در برابر سایش، خمش و ضربه، کاهش و انعکاس و نشر گرمایی رنگ افزایش می‌یابد. در نهایت رنگ با نسبت رنگدانه به رزین ۴:۱ به دلیل داشتن جذب پایین و نشر بالا و خواص عمومی قابل قبول، به عنوان نمونه بهینه معرفی شد.

واژه‌های کلیدی: رنگ کنترل گرمایی، اکسید روی، سیلیکات پتاسیم، ماهواره، خواص نوری.

## Evaluation of Pigment to Binder Ratio Effect on Properties of White Silicate Thermal Control Paints Used on Satellite

N. Kiomarsipour, R. Shoja Razavi\*, K. Ghani

Department of Materials Engineering, Malek Ashtar University of Technology, P.O.Box: 83145-115, Shahin Shahr, Isfahan, Iran

Received: 16-06-2012

Accepted: 31-02-2013

Available online: 11-09-2013

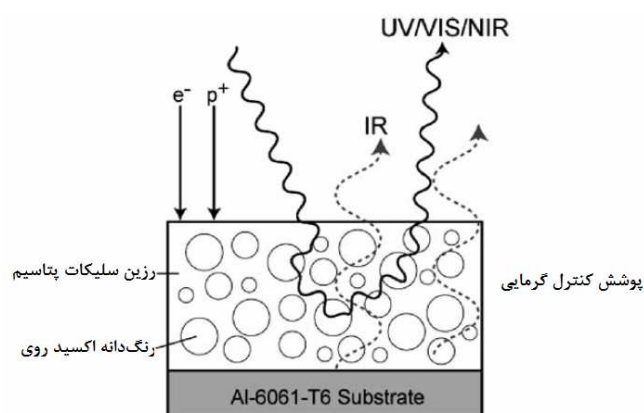
### Abstract

Thermal control paints are coatings with special thermo-optical properties that applied on the spacecraft outer surfaces to control the input and output heat. In this work, for evaluation of pigment to binder effect on white silicate thermal control paints properties, samples were made by ZnO pigment and potassium silicate binder in several pigment to binder ratios, then were applied on aluminum substrate. Solar absorptance and thermal emittance measurements were performed with spectroradiometer and emissometer. Thickness, reflectance and gloss measurements were performed with their instruments. For abrasion, adhesion and bend tests, Taber, 750 sheen tape test and mandrel instruments were used. Surface evaluation was performed with scanning electron microscopy (SEM). The results indicated that increasing pigment to binder ratio led to reduction of solar absorptance, adhesion, wear, bend and impact resistance and increasing thermal emittance and reflectance. Finally, the paint with 4:1 pigment to binder ratio was introduced as the optimum sample. J. Color Sci. Tech. 7(2013), 113-121©. Institute for Color Science and Technology.

**Keywords:** Thermal control paint, Zinc oxide, Potassium silicate, Satellite, Optical property.

## ۱- مقدمه

اکسید روی، رایج‌ترین رنگ‌دانه مورد استفاده در رنگ‌های کنترل گرمایی سفید است. دلیل اصلی استفاده از اکسید روی به عنوان رنگ‌دانه سفید، مقاومت بسیار بالای این ماده در برابر تابش فرابنفش در خلاء است، به گونه‌ای که پس از ۷۵ ساعت خورشیدی معادل<sup>۱</sup>، تابش هیچ تغییری در درصد بازتاب آن مشاهده نشد در صورتی که سایر رنگ‌دانه‌های سفید با کاهش در میزان بازتاب مواجه شده و رنگ آنها از سفید به زرد متمایل شد [۱۸-۲۱]. رنگ کنترل گرمایی حاوی اکسید روی در رزین سیلیکات پتاسیم با عنوان تجاری رنگ Z-93 به دلیل داشتن مقاومت بسیار خوب در برابر شرایط فضایی، به طور گسترده مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است [۲۲-۲۵]. مهم‌ترین مشخصات این رنگ در جدول ۱ نشان داده شده است [۲۰]. نور در هنگام برخورد به سطح یک رنگ کنترل گرمایی حاوی رنگ‌دانه اکسید روی شکسته شده و به عقب بر می‌گردد. در شکل ۱ تصویری از یک پوشش کنترل گرمایی سفید ایده‌آل نشان داده شده است [۲۶].



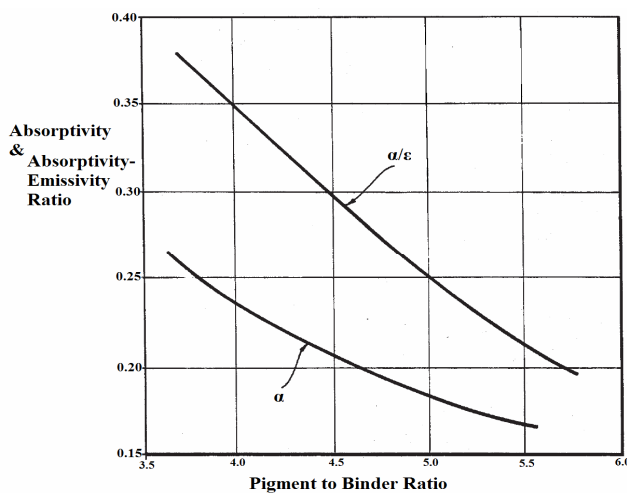
شکل ۱: انعکاس و نشر پرتوهای پر انرژی توسط یک پوشش کنترل گرمایی ایده‌آل [۲۶].

محیط فضا در بر دارنده عوامل مخرب بسیاری است که می‌توانند عملکرد یک سامانه فضایی را در مدت زمان مأموریتش با اختلال مواجه کنند. تابش‌های فرابنفش خورشیدی و کیهانی، آلودگی‌های ناشی از فضاپیما، برخورد شهاب‌سنگ‌ها، اکسیژن اتمی، سیکل حرارتی و پرتوهای پرانرژی؛ همگی باعث تخریب و انهدام یک سامانه خواهند شد. از این روی حفاظت از این سازه‌ها در برابر عوامل فوق ضروری است [۲۰]. مهم‌ترین مسأله‌ای که سازه‌های فضایی در حین مأموریت با آن مواجه می‌شوند، سیکل‌های گرمایی شدید و متعددی است که به واسطه تفاوت در موقعیت قرارگیری بخش‌های مختلف سیستم در برابر خورشید، ایجاد می‌شوند. ماهواره به دلیل موقعیت‌های مختلفی که در فضا اختیار می‌کند، دماهای متفاوتی را تجربه می‌کند. سطحی از ماهواره که به سمت خورشید است به واسطه جذب مستقیم تابش خورشیدی گرم می‌شود، در حالی که سمت دیگر ماهواره که به طرف فضای خالی است، به سبب نشر پرتو گرمایی در حال سرد شدن است. این تفاوت در موقعیت قرارگیری نسبت به خورشید، سبب ایجاد اختلاف دمایی تا حدود ۴۰۰°C میان بخش‌های مختلف یک ماهواره می‌شود. چنانچه دمای ساختار خیلی گرم یا خیلی سرد شود، انحراف‌هایی در سازه اتفاق می‌افتد که باعث کاهش توانایی و کارایی سیستم می‌گردد. کنترل گرمای ورودی به ماهواره و سایر سازه‌های فضایی از این روی دارای اهمیت بالایی است [۳]. سیستم‌های کنترل حرارتی غیرفعال، در واقع همان پوشش‌های کنترل گرمایی هستند که رنگ‌ها گروه بزرگی از آنها را تشکیل می‌دهند [۴]. رنگ‌های کنترل گرمایی سفید با داشتن خواص نوری ویژه، جذب خورشیدی ( $\alpha_s$ ) پایین و نشر زیر قرمز (ε) بالا، نقش مهمی را در کنترل دمای سیستم‌های فضایی به عهده دارند [۱۵-۱۵]. در این رنگ‌ها با بهره‌گیری از رنگ‌دانه‌ها و رزین‌های خاص، پوشش را به گونه‌ای فرموله می‌کنند تا میزان جذب پرتو خورشیدی را کاهش و توانایی آن برای نشر گرمایی (نشر پرتوهای مادون قرمز) را افزایش دهند، همچنین پوشش از مقاومت کافی در برابر تمامی عوامل خارجی برخوردار باشد [۱۶ و ۱۷].

جدول ۱: مشخصات کلی رنگ Z-93 [۱۸]

نام محصول	ترکیب شیمیایی	نسبت رنگ-دانه به رزین	جذب خورشیدی	نشر نورمال کلی	$\Delta\alpha_s$ , ۵۰۰۰ESH	مقاومت در برابر شوک گرمایی	مقاومت در برابر اکسیژن اتمی	تبخیر سطحی *TML	روش اعمال
Z-93 رنگ	اکسید روی-سیلیکات پتاسیم	۴,۳۰:۱	۰,۱۵	۰,۹۰	۰,۰۳	خوب	خوب	٪۱,۵	اسپری در دمای محیط

\*Total mass loss



شکل ۳: وابستگی جذب خورشیدی به نسبت رنگدانه به رزین [۲۹].

## ۲- بخش تجربی

### ۲-۱- مواد

مشخصات پودر اکسید روی و رزین سیلیکات پتاسیم استفاده شده، در جدول‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. رنگدانه اکسید روی و رزین سیلیکات پتاسیم به صورت صنعتی خریداری شده و به همان صورت تهیه شده، مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول ۲: مشخصات پودر اکسید روی.

ترکیب	غلظت (%W/W)	اندازه ذره‌ای
ZnO	۹۹/۴۲	۰/۶-۲/۳ μm

جدول ۳: مشخصات محلول سیلیکات پتاسیم.

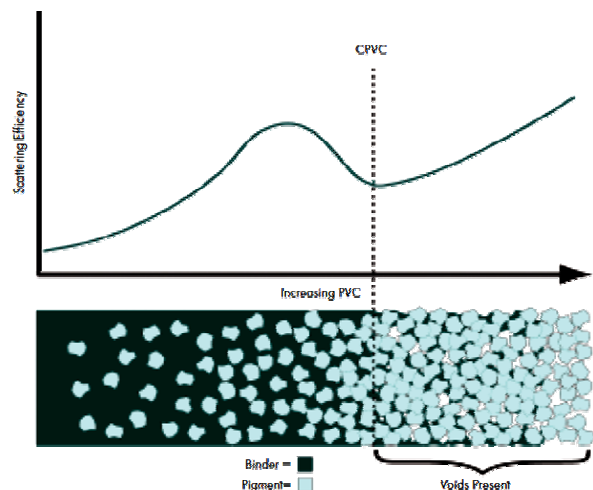
ترکیب	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	کل	محتوای جامد	SiO <sub>2</sub> :K <sub>2</sub> O
غلظت (%W/W)	۶۰،۲۶	۳۲،۴۵	۹۹،۹۶	۳۱،۷۴٪	۱،۸۵

### ۲-۲- روش کار

به منظور ساخت پوشش‌هایی با نسبت‌های مختلف رنگدانه به رزین، با توجه به درصد جامد رزین، پودر اکسید روی و سیلیکات پتاسیم با یکدیگر مخلوط شده و به مدت سه ساعت تا رسیدن به دانه‌بندی مناسب آسیاب شدند. ترکیب شیمیایی پوشش‌های ساخته شده در جدول ۴ نشان داده شده است. نسبت‌های رنگدانه به رزین با توجه به این که جذب خورشیدی پایین مورد نظر است [۲۹]، انتخاب شدند. پوشش‌های تولید شده بر روی زیرلایه‌های آلومینیومی پاشیده شدند. قبل از اسپری کردن، زیرلایه‌ها با سنباده ۸۰۰ سنباده زده شد و سپس با استون شستشو شدند. جهت اعمال پوشش‌ها از فشار افشانه

پوشش کنترل گرمایی سفید، در صورت داشتن پراکنش بیشینه، بالاترین بازتاب را دارد. طبق تئوری مای<sup>۱</sup>، سه عامل در بهبود بازده پراکنش پوشش کنترل گرمایی سفید تأثیر دارند. افزایش مقدار نسبت ضرایب شکست رنگدانه‌ها و رزین، قطر بهینه رنگدانه و غلظت حجمی بهینه رنگدانه [۲۷]. با افزایش غلظت حجمی رنگدانه<sup>۲</sup>، ضریب پراکنش افزایش می‌یابد تا جایی که مقدار آن به حد بحرانی می‌رسد. پس از غلظت حجمی بحرانی رنگدانه<sup>۳</sup>، رزین کافی در میان ذرات رنگدانه وجود ندارد و حفرات هوا به جای رزین، در بین ذرات رنگدانه قرار می‌گیرند. در این حالت بازده پراکنش به دلیل اختلاف بیشتر بین ضرایب شکست رنگدانه و حفره هوا به طور ناگهانی افزایش می‌یابد، ولی خواص عمومی پوشش کاهش می‌یابد. وابستگی بازده پراکنش نور به غلظت حجمی رنگدانه در شکل ۲ نشان داده شده است [۲۸]. در رنگ‌های کنترل گرمایی سفید به منظور داشتن پراکنش بالاتر و حداقل جذب خورشیدی، نسبت رنگدانه به رزین بالایی انتخاب می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، با افزایش نسبت رنگدانه به رزین جذب خورشیدی به طور پیوسته کاهش پیدا می‌کند [۲۹].

در این تحقیق، رنگ کنترل گرمایی سفید سیلیکاتی با استفاده از رنگدانه اکسید روی و رزین سیلیکات پتاسیم تهیه و خواص عمومی، نوری و حرارتی آن به طور همزمان اندازه‌گیری و بررسی شد. ارزیابی همزمان خواص نوری - حرارتی و خواص عمومی رنگ‌های پایه سیلیکاتی کاری جدید است که در این تحقیق انجام شده است. بررسی وابستگی خواص عمومی پوشش به نسبت رنگدانه به رزین در رنگ‌های سیلیکاتی، تاکنون گزارش نشده است.



شکل ۴: وابستگی بازده پراکنش نور به غلظت حجمی رنگدانه [۲۸].

- 1- Mie Theory
- 2- PVC
- 3- Critical Pigment Volume Concentration

بازتابی<sup>۲</sup> مدل LPSR 300 و نشر گرمایی نیز توسط دستگاه TEMP 2000A ساخت شرکت AZ Technology اندازه‌گیری شدند. ضخامت، بازتاب و براقیت به صورت میانگینی از پنج مرتبه اندازه‌گیری، گزارش شدند. به منظور بررسی مورفولوژی سطح نمونه‌های رنگ از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Philips XL-30 استفاده شد.

### ۳- نتایج و بحث

نتایج به دست آمده از آزمون‌های عمومی رنگ در جدول ۵ نشان داده شده‌اند. به طور کلی با افزایش میزان رنگ‌دانه در رنگ، پراکنش و انعکاس افزایش می‌یابد [۲۶، ۲۹، ۳۴، ۳۵]. در نمونه‌های رنگ A تا F، با افزایش نسبت رنگدانه اکسید روی به رزین سیلیکات پتاسیم، میزان شکست نور در اثر برخورد با ذرات بیشتر، افزایش یافته و در نهایت میزان انعکاس و پراکنش نور افزایش می‌یابد. به دلیل اختلاف میان ضرایب شکست رنگدانه اکسید روی (۲،۰) و رزین سیلیکات پتاسیم (۱،۵)، نور در حین عبور از رزین در هنگام برخورد به ذرات رنگدانه، شکسته شده و مسیر خود را تغییر می‌دهد.

- 1- Sheen
- 2- Mandrel
- 3- Spectroreflectometer

۳-۴ بار و فاصله ۲۰-۱۵ سانتی‌متر از سطح زیرلایه استفاده شد. پس از اعمال، نمونه‌ها در رطوبت ۴۵-۶۵ درصد به مدت هفت روز قرار داده شدند تا پخت شوند.

پس از اتمام فرآیند پخت، ضخامت پوشش‌ها با استفاده از دستگاه الکومتر ۴۵۶ ساخت شرکت الکومتر انگلستان اندازه‌گیری شد. بازتاب نمونه‌ها با استفاده از دستگاه بازتاب‌سنج شین‌اوپیک ۳۱۰ ساخت شرکت شین انگلستان و براقیت با استفاده از دستگاه براقیت‌سنج Micro Gloss 160 Three ساخت شرکت شین با زاویه ۶۰° اندازه‌گیری شد. در این تحقیق به منظور انجام آزمون سایش، از دستگاه سایش مدل Taber 515 ساخت آمریکا مطابق با استاندارد ASTM D4259 [۳۰] استفاده شد. نتایج بر حسب میزان کاهش وزن پوشش به ازای ۲۰۰ دور گزارش شد. به منظور بررسی چسبندگی از طریق آزمون نوار از دستگاه شین<sup>۱</sup> ۷۵۰، مطابق با استاندارد ASTM D3359-02 [۳۱] استفاده شد. مقاومت خمشی پوشش معیاری از انعطاف پذیری آن می‌باشد. آزمون خمش مطابق با استاندارد ASTM D-2794-93 [۳۲] انجام شد. در این آزمون که به آزمون مندرل<sup>۲</sup> نیز مشهور است، از استوانه‌هایی با قطرهای بین یک تا ۳۲ میلی‌متر استفاده شد. مقاومت در برابر ضربه معیاری از مقاومت جسم در برابر فرورفتن اجسام و ایجاد تغییر شکل ناگهانی در پوشش است. استاندارد انجام این آزمون، ASTM D-2794-93 [۳۳] است. نتیجه این آزمون به صورت حاصل ضرب وزن در ارتفاع وزنه، بیان شده است. ضریب جذب خورشیدی با استفاده از دستگاه طیف‌سنج

جدول ۴: ترکیب شیمیایی پوشش‌ها با نسبت‌های مختلف رنگدانه به رزین.

کد نمونه	نسبت رنگدانه به رزین	غلظت حجمی رنگدانه (%)	اکسید روی (g)	سیلیکات پتاسیم (g)	آب مقطر (g)
A	۱،۵:۱	۳۹،۱۰	۳۰	۶۳،۰۱	۷،۰۰
B	۲:۱	۴۶،۱۲	۳۰	۴۷،۲۵	۹،۰۰
C	۲،۵:۱	۵۱،۷۳	۳۵	۴۴،۱۲	۱۳،۶۳
D	۳:۱	۵۶،۳۰	۳۰	۳۱،۵۰	۱۵،۰۰
E	۳،۵:۱	۶۰،۰۰	۳۵	۳۱،۵۰	۱۸،۰۰
F	۴:۱	۶۳،۱۲	۳۰	۲۳،۶۳	۲۰،۰۰

جدول ۵: نتایج به دست آمده از آزمون‌های عمومی رنگ.

نمونه	ضخامت ( $\mu\text{m}$ )	چسبندگی	سایش (mg)	خمش (mm)	ضربه (ارتفاع وزنه نیم کیلویی (cm))
A	$2 \pm 50$	B5	$1,2 \pm 0,2$	۴	۵۰
B	$2 \pm 43$	B5	$0,2 \pm 1,2$	۶	۴۵
C	$2 \pm 46$	B5	$0,2 \pm 1,6$	۶	۴۵
D	$2 \pm 45$	B3	$0,2 \pm 5,2$	۸	۴۰
E	$2 \pm 43$	B3	$0,2 \pm 6,1$	۸	۳۵
F	$2 \pm 47$	B3	$0,2 \pm 7,2$	۸	۳۰

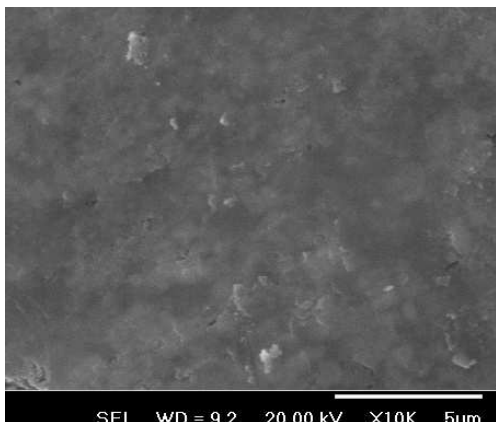
است و پوشش‌ها از چسبندگی خوبی به سطح زیرلایه‌ها برخوردار هستند؛ ولی پس از نسبت رنگدانه به رزین ۳:۱، کاهش چشمگیری در چسبندگی مشاهده شد. از آن جایی که یکی از مهم‌ترین خصوصیات فیزیکی متأثر از غلظت حجمی بحرانی رنگدانه، چسبندگی است [۳۶]، غلظت حجمی بحرانی رنگدانه، در نسبت رنگدانه به رزین ۲/۵:۱ واقع شده است. در غلظت حجمی بحرانی رنگدانه، رزین تنها برای پر کردن فواصل میان ذرات رنگدانه وجود دارد، در بالاتر از این نسبت عملاً ذرات رنگدانه اتصالی با یکدیگر و با زیرلایه ندارند که این امر باعث کاهش میزان چسبندگی رنگ به زیرلایه می‌شود. از آن جایی که در رنگ‌های کنترل گرمایی سفید، جذب پایین مد نظر است؛ میزان رنگدانه در این قبیل رنگ‌ها بالاتر از حد بحرانی انتخاب می‌شود که باعث کاهش میزان چسبندگی می‌شود. از این روی در این رنگ‌ها، چسبندگی حداقل 3B نیز قابل قبول است [۳۷].

نتایج آزمون سایش نمونه‌های رنگ نشان داد که آنها از مقاومت بسیار خوبی در برابر سایش برخوردار هستند. سطح رنگدانه اکسید روی در هنگام مخلوط شدن با رزین سیلیکات پتاسیم، توسط سیلیکات به طور کامل پوشانده می‌شود [۳۵]. رنگدانه حاصل با سطح سیلیکاتی، مقاومت به سایش بسیار خوبی را نشان می‌دهد. در شکل‌های ۴ و ۵ تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نمونه C قبل و پس از سایش نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود، سطح رنگ قبل از سایش، متخلخل بوده و پس از سایش، صاف شده و اثری از خطوط سایشی بر روی آن مشاهده نشد. در شکل‌های ۶ و ۷ تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نمونه D قبل و پس از سایش نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود پس از سایش، بر روی سطح نمونه؛ خطوط سایش به طور واضح مشاهده می‌شود. از آن جایی که رنگ‌های سیلیکاتی با پایه غیرآلی، مانند مواد سرامیکی،

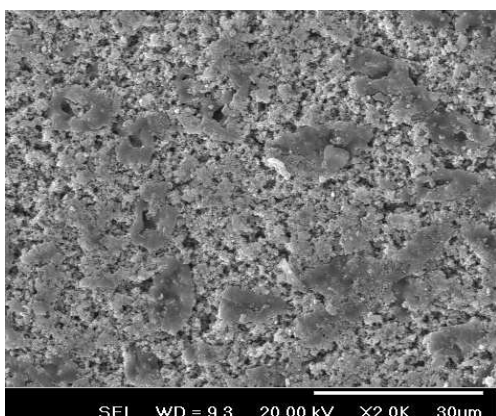
هر چقدر تعداد این شکست‌ها بیشتر باشد، احتمال عبور نور از ضخامت رنگ و رسیدن به زیرلایه کاهش می‌یابد. افزایش میزان پراکنش و انعکاس نور با افزایش میزان رنگدانه، روند یکنواختی را دنبال می‌کند تا جایی که به نسبت رنگدانه به رزین ۳:۱ می‌رسد. پس از رسیدن به نسبت رنگدانه به رزین ۳:۱، میزان انعکاس به طور ناگهانی افزایش زیادی را نشان می‌دهد. از آن جایی که پس از غلظت حجمی بحرانی رنگدانه، رزین کافی برای پر کردن فواصل میان ذرات رنگدانه وجود ندارد و به جای رزین، هوا در بین ذرات قرار گرفته است، اختلاف بیشتر میان ضرایب شکست هوا (۱,۰) و رنگدانه (۲,۱)، باعث افزایش ناگهانی انعکاس می‌شود [۲۸]. به عبارت دیگر، تفاوت میان ضرایب شکست رنگدانه و واسطه (هوا + رزین)، افزایش یافته و در نهایت میزان انعکاس به طور ناگهانی افزایش می‌یابد. با توجه به این نکته می‌توان دریافت که غلظت حجمی بحرانی رنگدانه بین نسبت‌های رنگدانه به رزین ۲,۵:۱ و ۳:۱ قرار گرفته است. این نکته با توجه به کاهش ناگهانی چسبندگی نیز تأیید می‌شود. براقیت رنگ‌های سیلیکاتی به دلیل متخلخل بودن سطح آنها و به دلیل این که سازوکار بازتاب نور از سطح این قبیل رنگ‌ها، پراکنده<sup>۱</sup> است، ذاتاً پایین است [۲۶، ۳۶]. نور در هنگام برخورد به سطح رنگ‌های سیلیکاتی، بازتاب منظم نمی‌یابد؛ بلکه به صورت پراکنده و نامنظم در جهات مختلف پراکنده می‌شود. با افزایش غلظت حجمی رنگدانه، تعداد ذرات رنگدانه حاضر در سطح، افزایش یافته و سطح رنگ خشن‌تر و ناهموارتر می‌شود. در عین حال میزان رزین حاضر در رنگ کاهش می‌یابد و در نتیجه میزان براقیت به دلیل تخلخل بیشتر کاهش می‌یابد.

چسبندگی پوشش‌ها تا نسبت رنگدانه به رزین ۳:۱ مقدار ثابتی

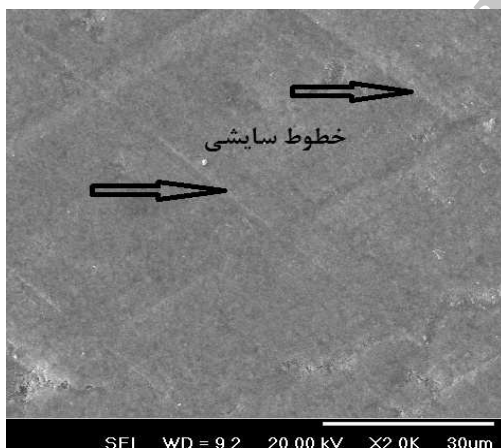
1- Diffuse



شکل ۵: تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نمونه C (رنگ با نسبت رنگدانه به رزین ۲/۵:۱) پس از سایش.

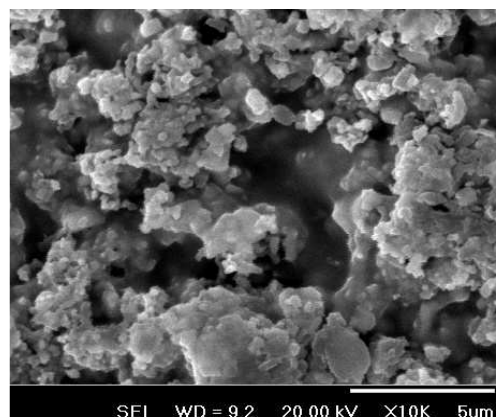


شکل ۶: تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نمونه D (رنگ با نسبت رنگ-دانه به رزین ۳:۱) قبل از سایش.



شکل ۷: تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نمونه D (رنگ با نسبت رنگدانه به رزین ۳:۱) پس از سایش.

دارای سختی بالا و چقرمگی شکست پایین هستند. سازوکار سایشی پیشنهاد شده برای آنها، سایش ریز برش ترد<sup>۱</sup> است [۳۸]. در این سازوکار اثری از تغییر شکل پلاستیک وجود نداشته و مواد جدا شده از سطح نقش ساینده را بازی کرده و باعث ساییده و هموار شدن سطح می‌شوند. ذرات جدا شده در اثر برخورد ترک‌ها در رنگ، از سطح جدا شده و مانند یک ساینده سبب سایش و هموار شدن سطح می‌شوند. از سوی دیگر، بررسی سازوکار سایش در شیشه‌های آهکی - قلیایی نشان داد که لبه‌های حفرات موجود در سطح این شیشه‌ها در اثر برخورد ساینده از سطح جدا شده و خود باعث افزایش ساییدگی و هموار شدن سطح می‌شوند [۳۹]. با توجه به این که در نمونه C، میزان رنگدانه پایین‌تر از غلظت حجمی بحرانی رنگدانه است؛ حفرات میان ذرات کاملاً پر شده‌اند، بنابراین امکان کنده شدن ذرات از لبه‌های حفرات و عمل کردن به عنوان یک ساینده وجود ندارد. ولی در رنگ D، بالا بودن میزان رنگدانه سبب شده تا حفرات پر نشده روی سطح رنگ به وجود آیند که در اثر تماس ساینده، لبه‌های این تخلخل‌ها شکسته و خود به عنوان ساینده باعث سایش رنگ می‌شوند و خطوط سایشی واضحی را بر روی سطح ایجاد می‌نمایند. وزن ساییده شده پس از نسبت رنگدانه به رزین ۲/۵:۱ به طور ناگهانی افزایش یافته است. بنابراین در غلظت‌های حجمی رنگدانه بالاتر از حد بحرانی، مقاومت در برابر سایش نیز کاهش می‌یابد [۴۰]. به عبارت دیگر، ذرات از چسبندگی کافی با زیرلایه برخوردار نیستند و در اثر برخورد ساینده به آسانی از سطح جدا می‌شوند.

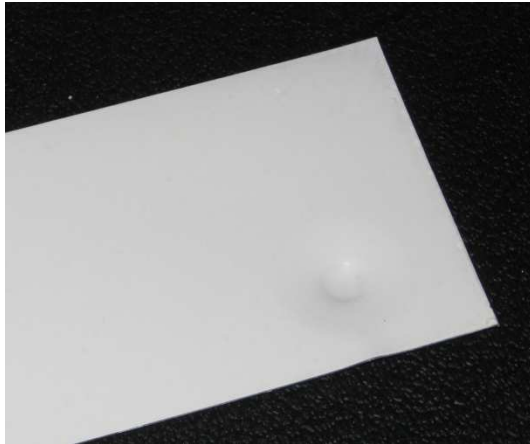


شکل ۴: تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نمونه C (رنگ با نسبت رنگدانه به رزین ۲/۵:۱) قبل از سایش.

آزمون ضربه، مقاومت پوشش‌های رنگ را در مقابل تغییر شکل سریع و ناگهانی نشان می‌دهد. رنگ‌های سیلیکاتی با داشتن پیوندهای محکم SiO<sub>2</sub> که در سه جهت امتداد دارد، انعطاف‌پذیری کمی دارند و

1- Brittle micro – cutting





شکل ۸: تصویر از سطح نمونه D (رنگ با نسبت رنگدانه به رزین ۳:۱) پس از انجام آزمون ضربه.



شکل ۹: تصویر از سطح نمونه D (رنگ با نسبت رنگدانه به رزین ۳:۱) پس از انجام آزمون خمش.

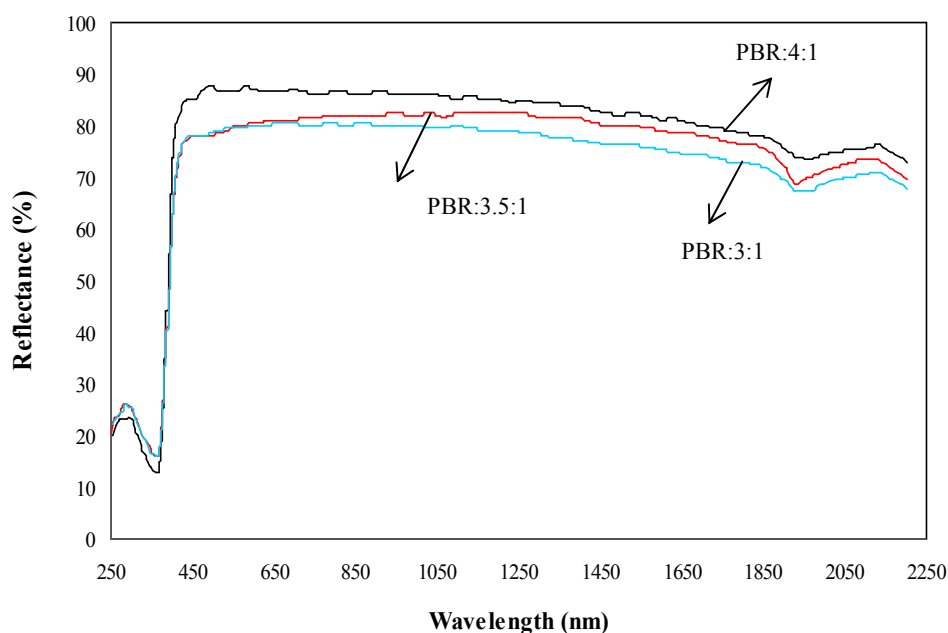
به طور ذاتی ترد هستند و در مقایسه با پوشش‌های آلی، با وزنه‌های سبک‌تر و ارتفاع‌های کمتر دچار شکست می‌شوند. از نسبت رنگدانه به رزین ۲،۵:۱ به بعد، رنگ در برابر ضربه مقاومت خود را از دست می‌دهد و ترک می‌خورد. در نسبت‌های رنگدانه به رزین بالای حد بحرانی، مقاومت در برابر ضربه نیز کاهش می‌یابد. در شکل ۸ تصویری از سطح رنگ D پس از انجام آزمون ضربه نشان داده شده است.

آزمون خمش، معیاری از انعطاف‌پذیری پوشش‌های رنگ است. رنگ‌های سیلیکاتی با داشتن ماهیت سرامیکی، دارای انعطاف‌پذیری کمی هستند. با افزایش نسبت رنگدانه به رزین، به دلیل کاهش میزان چسبندگی، توانایی رنگ برای خم شدن حول استوانه‌های با قطر کوچک کم شده و رنگ به صورت پودر از سطح زیرلایه جدا می‌شود. از نسبت رنگدانه به رزین ۲،۵:۱، رنگ قادر نیست حول استوانه شماره شش خم شود و دچار ترک‌خوردگی می‌شود. در شکل ۹ تصویری از سطح رنگ D پس از انجام آزمون خمش با دو استوانه متفاوت نشان داده شده است.

نتایج مربوط به اندازه‌گیری جذب خورشیدی و نشر گرمایی نمونه‌ها در جدول ۶ نشان داده شده است. همان‌گونه که قبلاً ذکر شد، با افزایش نسبت رنگدانه به رزین یا به عبارت دیگر با افزایش غلظت حجمی رنگدانه، میزان جذب خورشیدی کاهش می‌یابد [۲۹]. در رنگ‌های کنترل گرمایی، سازوکار بازتاب نور از سطح رنگ پراکنده است. به عبارت دیگر نور پس از برخورد به سطح رنگ، توسط ذرات رنگدانه شکسته می‌شود و در نهایت از پوشش خارج می‌شود. از این روی با افزایش نسبت رنگدانه به رزین، ذرات بیشتری در واحد ضخامت فیلم رنگ حضور دارند که مانع از عبور نور و جذب آن توسط زیرلایه می‌شوند.

جدول ۶: نتایج مربوط به اندازه‌گیری خواص نوری - حرارتی رنگ.

نمونه	براقیت	انعکاس (%)	ضریب جذب ( $\alpha$ )	ضریب نشر ( $\epsilon$ )
A	۲،۲	۷۹،۱۵	۰،۴۲۱	۰،۸۱۹
B	۲،۱	۷۸،۱۰	۰،۳۸۸	۰،۸۹۲
C	۲،۱	۸۲،۲۶	۰،۳۲۶	۰،۸۹۴
D	۲،۳	۹۰،۵۲	۰،۲۳۶	۰،۹۰۶
E	۲،۲	۹۰،۸۲	۰،۲۳۰	۰،۹۰۷
F	۲،۲	۹۳،۷۷	۰،۲۱۰	۰،۹۰۷



شکل ۱۰: طیف‌های بازتابی پوشش‌های D (با نسبت رنگدانه به رزین ۳:۱)، E (با نسبت رنگدانه به رزین ۳٫۵:۱) و F (با نسبت رنگدانه به رزین ۴:۱).

با توجه به این که در پوشش‌های کنترل گرمایی، خواص نوری و حرارتی فیلم دارای اهمیت بالاتر نسبت به خواص عمومی است، لذا پوشش بهینه با توجه به خواص نوری بهتر آن در نظر گرفته می‌شود. پس از بررسی نتایج به دست آمده از طیف‌سنجی بازتابی، پوشش دارای نسبت رنگدانه به رزین ۴:۱ به دلیل داشتن جذب خورشیدی پایین‌تر و نشر گرمایی بالاتر و همچنین خواص عمومی قابل قبول به عنوان پوشش بهینه در نظر گرفته شد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، رنگ کنترل گرمایی سفید حاوی رنگدانه اکسید روی و رزین سیلیکات پتاسیم، با نسبت رنگدانه به رزین ۴:۱ بر روی آلومینیم سنباده زده شده، پوشش داده شد. نتایج به دست آمده نشان داد که این پوشش دارای کمترین ضریب جذب خورشیدی و بیشترین نشر گرمایی است. مقدار جذب و نشر اندازه‌گیری شده برای این پوشش به ترتیب ۰٫۲۱۰ و ۰٫۹۰۷ به دست آمد. بررسی‌ها نشان داد که با افزایش نسبت رنگدانه به رزین، جذب خورشیدی کاهش و نشر گرمایی افزایش می‌یابد. با افزایش نسبت رنگدانه به رزین، براقت کاهش و انعکاس افزایش و با افزایش این نسبت بالاتر از حد بحرانی، مقاومت در برابر سایش، خمش و ضربه کاهش یافت.

در شکل ۱۰ میزان بازتاب بر حسب طول موج در سه نسبت رنگدانه به رزین؛ ۳:۱، ۳٫۵:۱ و ۴:۱؛ نمونه‌های رنگ D، E و F نشان داده است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت رنگدانه به رزین، میزان جذب خورشیدی به طور یکنواخت کاهش می‌یابد؛ تا جایی که این میزان به غلظت حجمی بحرانی رنگدانه می‌رسد. از این مقدار به بعد، ورود حفرات هوا در فیلم رنگ، انعکاس را افزایش داده و جذب را کاهش می‌دهد. از نسبت رنگدانه به رزین بالاتر از ۲٫۵:۱، میزان جذب خورشیدی به کمتر از ۰٫۳ کاهش می‌یابد. در نمونه A، میزان رنگدانه در رزین آن قدر کم است که عملاً پوشش‌دهی زیرلایه ضعیف بوده و سطح زیرلایه قابل مشاهده است. میزان جذب خورشیدی در نمونه D، با کاهش چشمگیر همراه است. اختلاف میان ضرایب شکست اکسید روی و هوا در تمام طول موج‌ها از اختلاف میان ضرایب شکست اکسید روی و رزین سیلیکاتی بیشتر است [۴۱]، از همین روی با وارد شدن حفرات هوا در فیلم رنگ میزان انعکاس و پراکنش افزایش و جذب کاهش نشان می‌دهد. میزان نشر گرمایی از جمله خصوصیات وابسته به ماهیت ماده و زبری سطح آن است [۳۴]. نشر گرمایی با افزایش نسبت رنگدانه به رزین، به دلیل حضور ذرات بیشتر که در حال نشر گرما هستند، افزایش می‌یابد.



## ۵- مراجع

- European cooperation for space standardization, Space environment. ECSS-E-ST-10-04C. Nov.2008.
- J. Dever, B. Banks, K.D. Groh, S. Miller, Degradation of spacecraft materials. *NASA Glenn Research Center*. 1998.
- W. Xiaohong, White anodized thermal control coating on LY12 aluminum alloy. *J. Mater. Proc. Tech.* 200(2008), 405-409.
- S. M. Barekat, R. Sh. Razavi, S. Bastani, Preparation of a black silicone thermal control coating and the effect of atomic oxygen on the coating. *J. Color. Sci. Tech.* 6(1391), 177-186. (in Persian)
- L.E. Long, Thermal control coating, US Pat. 5589274, 1996.
- R. Cumberland, Flexible thermal control coatings and methods for fabricating the same, US Pat. 2008/0045639 A1, 2008.
- H. Xiao, C. Li, D. Yang, S. He, Optical degradation of silicone in ZnO/silicone white paint irradiated by < 200 keV protons. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sec.A.* 266(2008), 3375-3380.
- C. P. Torre, Thermal control coatings and method for improving atomic oxygen resistance, US Pat. 4939031, 1990.
- M. B. Brown, High reflectance paint for high intensity optical applications, US Pat. 6974498 B2, 2005.
- N. Kiomarsipour, R.Sh. Razavi, K. Ghani, Improvement of spacecraft white thermal control coatings using the new synthesized Zn-MCM-41 pigment. *Dyes Pigm.* 96(2013) 403-406.
- D. A. Jaworske, Correlation of predicted and observed optical properties of multilayer thermal control coatings. *Thin Solid Films.* 332(1998), 30-33.
- N. Kayhan, R.Sh. Razavi, S. Choopani, Evaluation of two new white silicone thermal control paints under atomic oxygen. *Prog. Org. Coat.* 74(2012), 603-607.
- M. Barekat, R. Sh. Razavi, S. Bastani, Wear behavior of silicone rubber/carbon black coatings on 6061 aluminum alloy surfaces. *Prog. Org. Coat.* 76(2013), 277-285.
- M. Taheran, A. H. Navarchian, R. Sh. Razavi, Optimization of wear resistance of PU/TiO<sub>2</sub> coatings on aluminum surfaces. *Prog. Org. Coat.* 72(2011), 486-491.
- R. Sh. Razavi, S. M. Barekat, N. Kiomarsipour, K. Ghani, S. Bastani, Evaluation of thermo-optical and adhesion properties of thermal control coatings employed in spacecraft surfaces. *Iran. J. Surf. Sci. Eng.* 13(1391),79-89.
- N. Kayhan, R. Sh. Razavi, Preparation and evaluation of white silicone thermal control paint properties. *J. Color.Sci. Tech.* 6(1391), 233-239.
- N. Kiomarsipour, R. Sh. Razavi, K. Ghani, Evaluation of optical properties of silicate white thermal control paints employed in spacecraft by Taguchi Method. *J. Color. Sci. Tech.* 6(1391), 197-207.
- N. Kiomarsipour, R. Sh. Razavi, Hydrothermal synthesis and optical property of scale and spindle-like ZnO. *Ceram. Int.* 39(2013), 813-818.
- N. Kiomarsipour, R. Sh. Razavi, Characterization and optical property of ZnO nano, submicro and microrods synthesized by hydrothermal method on a large-scale. *Super lattices Microstruct.* 52(2012), 704-710.
- Y. Harada, M. Deshpande, Requalification of white thermal control coatings. *IIT Research Institute*, Chicago, 1994.
- Y. Harada, R. J. Mell, Inorganic thermal control coatings: A Review. *IIT Research Institute*, AIAA-83-0074, Nevada, 1983.
- J. Marco, Evaluation of thermal control coatings degradation in simulated Geo-space environment. *High. Perform. Polym.* 16(2004) 177-196.
- M. J. Meshishnek, Space environmental exposure of IITRI white thermal control paints. *Aerospace Report*. No. SMC-TR-95-42, 1995.
- R. R. Kamenetzky, Evaluation of thermal control coatings and polymeric materials exposed to ground simulated atomic oxygen and vacuum ultraviolet radiation. *NASA Technical Paper* 3595, 1995.
- R. Breuch, Handbook of optical properties for thermal control surfaces, Final Report, *LMSA-A847882*, 3(1967).
- J. A. Johnson, A multiple-scattering model analysis of zinc oxide pigment for spacecraft thermal control coatings. *Prog. Org. Coat.* 47(2003), 432-442.
- O. Berger, Commercial white paint as back surface reflector for thin-film solar cells. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 91(2007), 1215-1221.
- E. S. Berman, Spacecraft materials development programs for thermal control coatings and space environmental testing. *Amptiac Q.* 8(2004), 59-68.
- M.E. Sibert, M. Park, J. Tsukamoto, Inorganic surface coatings, US Pat. 3222197, 1962.
- Standard test method for abrasion resistance of organic coatings by the taber abraser, ASTM Standard, D4060-01, 2008.
- Standard test methods for measuring adhesion by tape test, ASTM Standard, D-3359, 2002.
- Standard test methods for mandrel bend test of attached organic coatings, ASTM Standard, D522-93a, 2008.
- Standard test method for impact flexibility of organic coatings, ASTM Standard, D6905-03, 2008.
- J. A. Johnson, Development of improved thermal control coatings for space assets. *J. Article Preprint*. AFRL-ML-WP-TP-2004-411, 2004.
- X. D. Wang, A study of electron exposure effects on ZnO/K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> thermal control coatings. *Mater. Chem. Phys.* 78(2008), 38-42.
- S. Paul, Surface Coating, Science and technology, John Wiley & Sons, New York. 1985.
- S. A. Daneman, Advanced thermal control coatings for use in low earth orbit, 24<sup>th</sup> International Conference On Environmental Systems and 5<sup>th</sup> European Symposium On Space Environmental Control Systems, Germany, 1994.
- D. S. Mao, Study of abrasion behavior of an advanced Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC-Co ceramic. *Wear.* 209(1997), 153-159.
- J. K. Lancaster, Material specific wear mechanisms: Relevance to wear modelling. *Wear.* 141(1990), 159-183.
- Z. W. Wicks, Organic coatings, Science and technology, Wiley & Sons Publishing, New York. 2007, 467.
- A. I. Davis, Development of improved and novel thermal control coatings, air force research laboratory, AFRL-ML-WP-TP-2007-484, 2007.