

ساخت و ارزیابی پوشش کنترل گرمایی سیاه پایه سیلیکاتی به منظور اعمال بر سطح ماهواره

نرگس کیومرثی پور^۱، رضا شجاع رضوی^{۲*}

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

تاریخ دریافت: ۹۲/۹/۳ تاریخ پذیرش: ۹۳/۷/۲۹ در دسترس به صورت الکترونیکی از: ۱۳۹۳/۱۲/۲۰

چکیده

در این تحقیق با استفاده از دو رنگدانه سیاه معدنی اکسید مس و اکسید آهن و رزین سیلیکات پتاسیم با سه نسبت رنگدانه به رزین، پوشش‌های کنترل گرمایی سیاه تهیه و بر سطح آلومینیم اعمال شدند. خواص نوری نمونه‌ها با استفاده از طیف‌سنجی نوری UV/vis اندازه‌گیری شد. خواص عمومی پوشش‌ها شامل: چسبندگی، خمش، سایش، ضربه و براقیت نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. ارزیابی خواص عمومی پوشش‌ها نشان داد که چسبندگی نمونه‌های رنگ برابر با 5B است. انجام آزمون‌های خمش و ضربه بدون ایجاد ترک خوردگی و جدایش پوشش از سطح زیرلایه انجام شد و میزان کاهش وزن پوشش پس از انجام آزمون سایش حدود سه میلی‌گرم بود. ارزیابی خواص نوری نشان داد که رنگدانه اکسید مس از جذب کمتری نسبت به اکسید آهن برخوردار است. پوشش حاوی رنگدانه اکسید آهن تقریباً تمامی طول‌موج‌های فرابنفش تا مرئی را جذب کرد و نسبت رنگدانه به رزین تأثیر قابل توجهی بر میزان جذب پوشش نداشت. میزان جذب پوشش حاوی رنگدانه اکسید آهن برابر با ۰,۹۸ و نشر گرمایی آن برابر با ۰,۹۲ اندازه‌گیری شد.

واژه‌های کلیدی: پوشش کنترل گرمایی سیاه، رنگدانه، خواص نوری، ماهواره.

Preparation and Evaluation of Black Silicate Thermal Control Coating for Using on Satellite Surface

N. Kiomarsipour, R. Sh. Razavi*

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

Received: 24-11-2013

Accepted: 21-10-2014

Available online: 11-03-2015

Abstract

In this research, black silicate thermal control coatings were prepared with using two inorganic black pigments; copper oxide and iron oxide, in potassium silicate binder in three pigment to binder ratio then they were applied on aluminum substrate. The optical properties of coatings were measured by UV/vis spectrophotometer. Evaluation of the coatings general properties indicated that the adhesion of paint samples was equal to 5B. The bend and impact tests passed without any cracking and separating of coating from substrate and the coating weight loss after abrasion test was around three milligram. Evaluation of optical properties indicated that the coatings containing of copper oxide had lower absorptance than the coatings with iron oxide and later coatings were absorbed almost whole wavelengths from UV to VIS and pigment to binder ratio did not have significant effect on the coating absorptance. Its solar absorption and thermal emittance were 0.98 and 0.92 respectively. J. Color Sci. Tech. 8(2015), 283-293©. Institute for Color Science and Technology.

Keywords: Black thermal control coatings, Pigment, Optical properties, Satellite .

۱- مقدمه

پوشش‌های کنترل گرمایی گروهی خاص از پوشش‌های با ویژگی‌های منحصر به فرد هستند که بر سطح خارجی سامانه‌های فضایی به منظور حفظ آن‌ها در برابر اثرات مخرب محیط فضا (شامل تابش‌های فرابنفش خورشیدی، اکسیژن اتمی، پرتوهای الکترونی و پروتونی و تبخیر سطحی ناشی از خلاء موجود در فضا) اعمال می‌شوند [۱-۳]. یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های پیش روی سیستم‌های فضایی، تغییرات دمایی شدید و مداوم در حین انجام مأموریت است. این تغییرات مکرر دمایی که به عنوان سیکل حرارتی شناخته می‌شود از -80°C تا $+80^{\circ}\text{C}$ تقریباً هر ۹۰ دقیقه، تکرار می‌شود [۴]. دمای محیط فضا در حدود 273°C است در حالی که تجهیزات داخلی یک ماهواره برای فعالیت در دمای اتاق طراحی شده‌اند [۵]. از همین روی، حفاظت از یک سامانه و سرنشینان آن از اثرات خطرناک تغییرات شدید دمایی اجتناب ناپذیر است. به منظور کنترل و حفظ دمای یک سیستم فضایی در محدوده مناسب (0°C تا 100°C)، از سیستم‌های کنترل گرمایی استفاده می‌شود. پوشش‌های کنترل گرمایی سفید و سیاه از جمله شناخته‌شده‌ترین اعضاء سیستم‌های کنترل گرمایی هستند. سیستم‌های کنترل گرمایی به دو دسته غیرفعال^۱ و فعال^۲ تقسیم می‌شوند. کنترل گرمایی غیرفعال، شامل سطوح جذب کننده و بازتاب کننده نور و عایق‌های گرمایی، ساده‌ترین و معمولاً ارزان‌ترین روش برای کنترل دما است. به طور کلی پوشش‌ها و سطوح کنترل گرمایی غیرفعال به چهار دسته تقسیم می‌شوند. بازتاب کننده‌های خورشیدی، جذب کننده‌های خورشیدی، بازتاب کننده‌های مسطح و جذب کننده‌های مسطح. دو دسته اول بیشتر انرژی برخوردی خورشیدی را بازتاب و جذب می‌کنند؛ در حالی که دو دسته بعدی تقریباً تمامی انرژی برخوردی گرمایی یا خورشیدی را بازتاب یا جذب می‌کنند [۵]. رنگ‌های کنترل گرمایی سیاه و سفید بزرگ‌ترین گروه از خانواده سیستم‌های کنترل گرمایی غیرفعال هستند [۶-۱۱]. رنگ سیاه در طبقه‌بندی بالا در دسته جذب کننده مسطح قرار می‌گیرد زیرا تقریباً هر پرتویی را جذب و نشر می‌کند. علاوه بر کاربردهای خارجی آن، رنگ سیاه معمولاً بر روی سطوح داخلی ماهواره به منظور افزایش بازده تبدیل انرژی میان بخش‌هایی که تمایل به برابر ساختن دمای درونی دارند، استفاده می‌شود. منبع گرمایی را به رادیاتوری می‌چسبانند که کاملاً با رنگ سیاه پوشش داده شده است و سطح خارجی آن شامل آینه‌های سطحی ثانویه سخت یا یک ماده بازتاب کننده انعطاف‌پذیر است [۵]. پوشش‌های کنترل گرمایی سیاه به منظور جذب تمامی تابش برخوردی باید دارای جذب خورشیدی حدود ۰,۹ و نشر گرمایی حدود ۰,۹ باشند به گونه‌ای که نسبت جذب

به نشر نزدیک یک گردد [۵]. در تحقیقی که توسط بوآز^۳ انجام گرفت، یک نمونه رنگ سیاه با استفاده از ترکیب رنگ‌دانه‌های اکسید فلزی مانند اکسید مس، اکسید آهن، اکسید نیکل، اکسید کبالت و مخلوط‌هایی از آنها ساخته شد. رنگ‌دانه اکسید مس به عنوان یک رنگ‌دانه مرجح با مقدار ۲۰ تا ۴۵ درصد وزنی ترکیب، سبب ایجاد رنگ سیاه در پوشش گردید [۱۲]. در تحقیق دیگری، از رنگ‌دانه کربن سیاه همراه با اکسید مس استفاده شد. در این ترکیب، اکسید مس به منظور کنترل یکنواختی پوشش به عنوان یک رنگ‌دانه اضافی به کار رفت [۱۳]. برکت و همکارانش در تحقیقی اثر اکسیژن اتمی را بر روی رنگ‌های کنترل گرمایی سیاه که با استفاده از از رنگ‌دانه کربن سیاه و رزین سیلیکونی ساخته شده بودند بررسی کرد. در این بررسی میزان جذب خورشیدی و نشر گرمایی پوشش‌ها به ترتیب برابر با ۰,۹۵۵ و ۰,۹۲۰ اندازه‌گیری شد [۱۴]. در تحقیقی که توسط کامنتزی^۴ انجام گرفت، از ترکیب اکسیدهای آهن و مس در رزین سیلیکات پتاسیم برای تهیه رنگ سیاه مقاوم در برابر اکسیژن اتمی استفاده شد. جذب خورشیدی و نشر گرمایی پوشش‌ها به ترتیب برابر با ۰,۹۵ و ۰,۸۹ اندازه‌گیری شد. بررسی‌ها نشان داد که هیچ تغییر آشکاری در جذب و نشر پوشش پس از قرارگیری در برابر اکسیژن اتمی مشاهده نشد [۱۵]. دشپند^۵ نیز در تحقیقی با استفاده از رنگ‌دانه کربن سیاه و رزین سیلیکاتی رنگ کنترل گرمایی سیاه رسانا با جذب خورشیدی ۰,۹۵ را تولید و بررسی کرد [۱۶].

در تحقیق حاضر، رنگ کنترل گرمایی سیاه سیلیکاتی با استفاده از رنگ‌دانه‌های اکسید مس و اکسید آهن سیاه و رزین سیلیکات پتاسیم تهیه و خواص عمومی و نوری آن به طور همزمان اندازه‌گیری و بررسی شد. ارزیابی هم‌زمان خواص نوری و عمومی رنگ‌های سیاه با پایه سیلیکاتی، کار پژوهشی جدیدی است که نخستین بار در این تحقیق انجام گرفت. بررسی وابستگی خواص نوری به نسبت رنگ‌دانه به رزین در رنگ‌های سیلیکاتی سیاه، تاکنون در هیچ مقاله‌ای گزارش نشده است. از طرف دیگر، ساخت رنگ بر پایه رزین‌های سیلیکاتی با خواص نوری ویژه و استفاده از آن به عنوان جذب کننده مسطح تابش خورشیدی؛ به منظور کاربرد در سطح ماهواره، دستاوردی نو بوده و می‌تواند گامی بلند در راستای بومی نمودن فناوری ساخت این رنگ‌ها باشد.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد

از اکسید مس و اکسید آهن سیاه به عنوان رنگ‌دانه‌های سیاه و از محلول سیلیکات پتاسیم شفاف به عنوان رزین، جهت تهیه نمونه‌های

3- Boaz
4 - Kamenetzky
5- Deshpand

1- Passive
2- Active

۳-۲- تجهیزات ارزیابی و شناسایی

پس از خشک شدن، ضخامت پوشش‌ها با استفاده از دستگاه الکومتر^۲ ۴۵۶ ساخت شرکت الکومتر انگلستان اندازه‌گیری شد. 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 [۱۷] استفاده شد. نتایج بر حسب میزان کاهش وزن پوشش به ازای ۵۰۰ دور، وزنه نیم کیلوگرمی و سنباده آلومینایی گزارش شد. به منظور بررسی چسبندگی از طریق آزمون نوار از دستگاه شین^۳ ۷۵۰، مطابق با استاندارد ASTM D3359 [۱۸] استفاده شد. مقاومت خمشی پوشش معیاری از انعطاف‌پذیری آن می‌باشد. آزمون خمش مطابق با استاندارد ASTM D-2794-93 [۱۹] انجام شد. در این آزمون که به آزمون مندرل^۴ 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 [۲۰] است. نتیجه این آزمون به صورت حاصل ضرب وزن در ارتفاع وزنه، بیان شده است. به منظور ارزیابی خواص نوری از طیف سنج نوری UV-VIS JASCO V-670 در محدوده طول موج ۲۲۰-۲۲۰۰ nm استفاده شد که میزان انعکاس را بر حسب درصد در محدوده طول موج مورد نظر به صورت یک طیف نشان می‌دهد. ضخامت و براقیت نمونه‌ها به صورت میانگینی از پنج مرتبه اندازه‌گیری، گزارش شدند.

- 1- M.S. Deshpande
3- Elcometer
3- Sheen
4- Mandrel

رنگ استفاده شد. تمامی مواد به صورت تجاری تهیه و به همان صورت خریداری شده، مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات فیزیکی و شیمیایی مواد اولیه مصرف شده در جدول ۱ خلاصه شده است.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی و شیمیایی مواد اولیه.

ماده اولیه مصرف شده	فرمول شیمیایی	رنگ	اندازه ذره‌ای	خلوص تقریبی	درصد جامد
اکسید آهن	Fe ₃ O ₄	سیاه	۲۰۰ nm	٪ ۹۵	-
اکسید مس	CuO	سیاه	۱۵۰ nm	٪ ۹۵	-
رزین سیلیکاتی	K ₂ SiO ₃	شفاف	-	۴۵٪، با نسبت =SiO ₂ :K ₂ O	۱،۹۲

۲-۲- روش کار

به منظور ساخت پوشش‌هایی با نسبت‌های مختلف رنگ‌دانه به رزین، با توجه به درصد جامد رزین، پودر اکسید مس و اکسید آهن 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 ۲ نشان داده شده است. نسبت‌های رنگ‌دانه به رزین با توجه به مقادیر گزارش شده توسط دسپند^۱، انتخاب شدند [۱۶]. ترکیبات آماده شده بر روی زیرلایه‌های آلومینیمی پاشیده شدند. قبل از پاشش، زیرلایه‌ها با سنباده ۸۰۰ سنباده زده شده و سپس با استن شستشو شدند. جهت اعمال پوشش‌ها از فشار پاشش ۳-۴ بار و فاصله ۱۵-۲۰ سانتی‌متر از سطح زیرلایه استفاده شد.

جدول ۲: ترکیب شیمیایی نمونه‌های رنگ.

نام نمونه	نسبت رنگ‌دانه به رزین	نوع رنگ‌دانه در نمونه	میزان رنگ‌دانه (g)	سیلیکات پتاسیم (g)	آب مقطر (g)
A1	۱:۱	اکسید آهن	۳۰	۳۰	۱۲
A2	۱/۵:۱	اکسید آهن	۳۰	۲۰	۲۲
A3	۲:۱	اکسید آهن	۳۰	۱۵	۳۵
B1	۱:۱	اکسید مس	۳۰	۳۰	۱۵
B2	۱/۵:۱	اکسید مس	۳۰	۲۰	۳۲
B3	۲:۱	اکسید مس	۳۰	۱۵	۵۷

اکسید آهن و اکسید مس به ترتیب در جداول ۳ و ۴ نشان داده شده است. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی مربوط به پودرها در شکل ۲ نشان داده شده است.

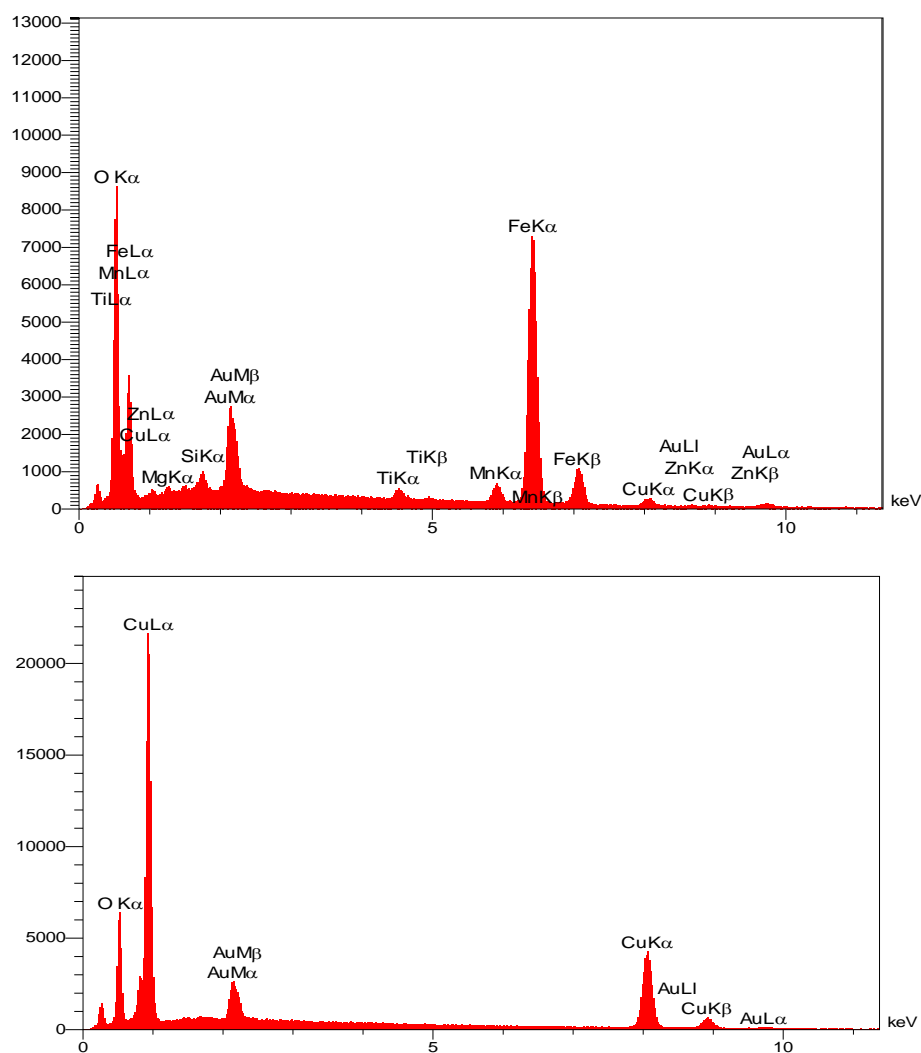
در تصاویر مشاهده می‌شود که تمامی ذرات دارای اندازه‌ای کمتر از ۲۰۰ نانومتر هستند، از طرف دیگر در پودر اکسید آهن به دلیل داشتن خاصیت مغناطیسی توده‌ای شدن و تجمع ذرات مشاهده می‌شود.

- 1- Scanning electron microscopy
- 2- Energy dispersion spectroscopy

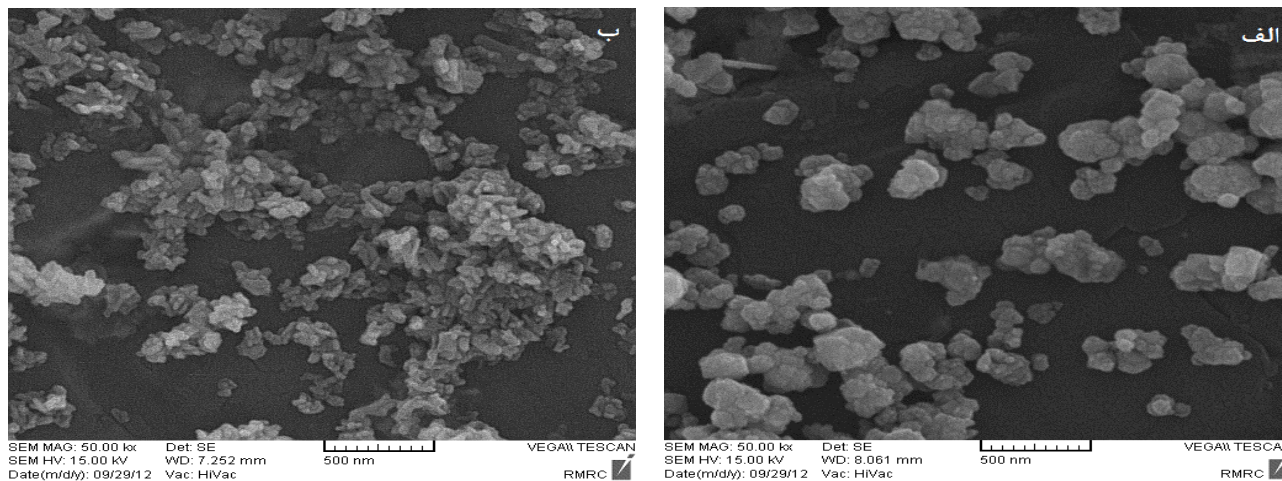
۳- نتایج و بحث

به منظور تعیین خلوص و درصد عناصر موجود در رنگ‌دانه‌ها، از آزمون نیمه کمی طیف‌سنجی تفکیک انرژی میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ استفاده شد. جهت تعیین اندازه و شکل ذرات، از تصویربرداری به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. الگوی پراش به دست آمده از آزمون EDS^۲ مربوط به پودرهای خریداری شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

همان‌گونه که در تصاویر مشاهده می‌شود، پیک‌های مربوط به K_{α} آهن، مس و اکسیژن و همچنین L_{α} آهن و مس بلندترین پیک‌های مشاهده شده در الگوها است. نتایج مربوط به آزمون EDS رنگ‌دانه‌های



شکل ۱: الگوی پراش به دست آمده از طیف‌سنجی تفکیک انرژی میکروسکوپ الکترونی روبشی: الف) رنگ‌دانه اکسید آهن، ب) رنگ‌دانه اکسید مس.



شکل ۲: تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از رنگدانه‌های: الف) اکسید آهن، ب) اکسید مس.

جدول ۳: نتایج آزمون EDS پودر اکسید آهن.

Elt	Line	Int	K	Kr	W%	A%	ZAF	Pk/Bg
O	Ka	۱۰۰۲,۷	۰,۱۹۶۵	۰,۱۵۷۶	۲۷,۵۰	۶۰,۴۳	۰,۵۷۳۱	۴۲,۴۵
Mg	Ka	۲۰,۷	۰,۰۰۱۴	۰,۰۰۱۲	۰,۲۶	۰,۳۷	۰,۴۴۷۶	۲,۳۷
Si	Ka	۶۷,۴	۰,۰۰۴۸	۰,۰۰۳۹	۰,۵۴	۰,۶۸	۰,۷۱۷۱	۲,۹۵
Ti	Ka	۶۱,۵	۰,۰۱۰۸	۰,۰۰۸۷	۰,۸۹	۰,۶۶	۰,۹۶۷۳	۲,۹۴
Mn	Ka	۱۱۶,۴	۰,۰۳۲۸	۰,۰۲۶۳	۲,۷۷	۱,۷۷	۰,۹۴۸۵	۴,۵۱
Fe	Ka	۱۷۶۵,۳	۰,۶۰۱۴	۰,۴۸۲۳	۵۰,۴۵	۳۱,۷۶	۰,۹۵۶۰	۴۲,۳۳
Cu	Ka	۴۸,۴	۰,۰۳۳۴	۰,۰۲۶۸	۲,۹۹	۱,۶۵	۰,۸۹۸۱	۳,۴۹
Zn	Ka	۲,۳	۰,۰۰۲۱	۰,۰۰۱۷	۰,۱۹	۰,۱۰	۰,۹۰۷۵	۲,۰۹
Au	La	۱۵,۳	۰,۱۱۶۶	۰,۰۹۳۶	۱۴,۴۰	۲,۵۷	۰,۶۴۹۶	۲,۷۳
			۱,۰۰۰۰	۰,۸۰۲۰	۱۰۰,۰۰	۱۰۰,۰۰		

جدول ۴: نتایج آزمون EDS پودر اکسید مس.

Elt	Line	Int	K	Kr	W%	A%	ZAF	Pk/Bg
O	Ka	۷۴۳,۲	۰,۱۳۵۹	۰,۱۱۰۰	۲۲,۷۸	۵۷,۸۰	۰,۴۸۲۹	۳۳,۹۹
Cu	Ka	۱۱۲۷,۳	۰,۷۲۶۲	۰,۵۸۷۹	۶۰,۷۴	۳۸,۸۰	۰,۹۶۷۹	۳۳,۶۳
Au	La	۱۹,۴	۰,۱۳۷۹	۰,۱۱۱۶	۱۶,۴۸	۳,۴۰	۰,۶۷۷۴	۲,۷۲
			۱,۰۰۰۰	۰,۸۰۹۵	۱۰۰,۰۰	۱۰۰,۰۰		

نمونه‌های دارای نسبت‌های رنگ‌دانه به رزین بیشتر از حد بحرانی، مقاومت به سایش کمتری را نشان دادند [۱۰]. در غلظت‌های حجمی رنگ‌دانه بالاتر از حد بحرانی، حفرات هوای وارد شده در فیلم رنگ، انسجام پوشش را کاهش می‌دهد و مقاومت در برابر سایش نیز کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، ذرات از چسبندگی کافی با زیرلایه برخوردار نیستند و در اثر برخورد ساییده به آسانی از سطح جدا می‌شوند [۲۷]. از آنجایی که نمونه‌های تهیه شده در این تحقیق، همگی دارای میزان رنگ‌دانه پایین‌تر از غلظت حجمی بحرانی رنگ‌دانه (۱:۲.۵) هستند و رزین کافی برای ایجاد ارتباط و اتصال میان ذرات رنگ‌دانه وجود دارد و حفرات میان ذرات کاملاً پر شده‌اند. بنابراین امکان کنده‌شدن ذرات از لبه‌های حفرات و عمل کردن به عنوان یک ساییده وجود ندارد. در تمامی نمونه‌های رنگ تهیه شده میزان کاهش وزن اندازه‌گیری شده کمتر از پنج میلی‌گرم بود که این نشان‌دهنده مقاومت بسیار خوب پوشش‌ها در برابر سایش نسبت به پوشش‌های آلی با کاهش وزن حدود سی میلی‌گرم است.

آزمون ضربه، مقاومت پوشش‌های رنگ را در مقابل تغییر شکل سریع و ناگهانی نشان می‌دهد. رنگ‌های سیلیکاتی با داشتن پیوندهای محکم Si-O که در سه جهت امتداد دارد، انعطاف‌پذیری کمی دارند و به طور ذاتی ترد هستند و در مقایسه با پوشش‌های آلی با وزنه‌ها و ارتفاع‌های کمتر دچار شکست می‌شوند. در نسبت‌های رنگ‌دانه به رزین بالای حد بحرانی، رنگ انسجام خود را از دست می‌دهد و ذرات رنگ‌دانه از چسبندگی کافی با یکدیگر برخوردار نیستند و مقاومت در برابر ضربه کاهش می‌یابد. در این آزمون ارتفاعی که در آن رنگ دچار ترک‌خوردگی آشکار نشده، گزارش شده است. به منظور انجام این آزمون از وزنه نیم کیلوگرمی استفاده شد. نتایج نشان داد که در ارتفاع‌های حدود ۵۰ سانتی‌متر، سطح رنگ سالم مانده و هیچ‌کندگی و ترک‌خوردگی مشاهده نشد. در ارتفاع‌های بیشتر از ۵۰ سانتی‌متر، سطح رنگ دچار ترک خوردگی شد. از پوشش‌های با رزین‌های سیلیکاتی به طور کلی به عنوان پوشش‌های مقاوم در برابر ضربه نمی‌توان استفاده کرد.

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 خم‌شدن حول استوانه‌های با قطر کوچک، کم شده و رنگ به صورت پودر از سطح زیرلایه جدا می‌شود [۲۷، ۱۱]. در این آزمون مشاهده شد که رنگ‌ها قابلیت خم‌شدن حول استوانه‌های با قطرهای کوچک را دارند و قطر استوانه‌هایی که رنگ با خمش حول آنها سالم ماند و دچار ترک‌خوردگی نشد به عنوان نتیجه گزارش شده است. در استوانه‌های با قطرهای کمتر، رنگ قدرت خمش خود را از دست داده و دچار ترک‌خوردگی می‌شود.

نتایج مربوط به آزمون‌های عمومی رنگ در جدول ۵ نشان داده شده است. همان‌گونه که در جدول ۵ اشاره شده است، نتایج آزمون سایش نمونه‌های رنگ نشان داد که رنگ‌های سیلیکاتی از مقاومت بسیار خوبی در برابر سایش برخوردار هستند. میزان کاهش وزن زیرلایه‌های آلومینیمی پوشش داده شده پس از انجام آزمون سایش بسیار ناچیز و محدود بود. مقایسه نتایج مربوط به آزمون سایش رنگ‌های سیلیکاتی با سایر رنگ‌های با پایه آلی (رنگ‌های با رزین‌های سیلیکونی و پلی‌یورتانی) نشان داد که میزان وزن کاهش یافته پس از این آزمون در رنگ‌های سیلیکاتی حدود ده برابر کمتر از رنگ‌های با رزین‌های آلی است [۲۲، ۲۱].

در بررسی‌های انجام شده توسط وانگ^۱ بر روی رنگ‌های کنترل گرمایی سفید سیلیکاتی، مشاهده شد که سطح رنگ‌دانه اکسید روی در هنگام مخلوط‌شدن با رزین سیلیکات پتاسیم، توسط سیلیکات به طور کامل پوشانده می‌شود [۲۳]. رنگ‌دانه حاصل با سطح سیلیکاتی، مقاومت به سایش بسیار خوبی را نشان می‌دهد. از آن جایی که رنگ‌های سیلیکاتی با پایه غیرآلی، مانند مواد سرامیکی، دارای سختی بالا و چقرمگی شکست پایین هستند؛ سازوکار سایشی پیشنهاد شده برای آنها، سایش ریز برش ترد^۲ است [۲۴]. در این سازوکار اثری از تغییر شکل پلاستیک وجود نداشته و مواد جدا شده از سطح نقش ساییده را بازی کرده و باعث ساییده و هموارشدن سطح می‌شوند. ذرات جدا شده در اثر برخورد ترک‌ها در رنگ، از سطح جدا شده و مانند یک ساییده سبب سایش و هموارشدن سطح می‌شوند. از سوی دیگر بررسی سازوکار سایش در شیشه‌های سودالایم نشان داد که لبه‌های حفرات موجود در سطح شیشه‌های سودالایم در اثر برخورد ساییده از سطح جدا شده و خود باعث افزایش ساییدگی و هموار شدن سطح می‌شوند [۲۵]. به عبارت دیگر به دلیل شباهت ساختار رنگ‌های سیلیکاتی به مواد سرامیکی (پیوندهای سه بعدی SiO₂)، این پوشش‌ها از مقاومت بالایی در برابر سایش برخوردار هستند. یک ویژگی معمول در بیشتر ساختارهای سرامیکی این است که سایش به واسطه یک فرآیند شکست در مقیاس کوچک (میکروشکست) رخ می‌دهد. ویژگی دوم مشاهده شده در بسیاری از سرامیک‌ها این است که واکنش‌پذیری بالای آن‌ها با بخار آب موجود در هوای محیط، لایه‌های سطحی اکسیدی و هیدروکسیدی می‌سازد. چنین واکنش‌هایی در طول آزمون سایش تسریع می‌شوند و بنابراین به عنوان واکنش‌های تریبولوژیکی شناخته می‌شوند [۲۶]. نتایج مربوط به سایش پوشش‌های سیلیکاتی سفید، که قبلاً توسط همین نویسندگان گزارش شده است، با نسبت‌های رنگ‌دانه به رزین مختلف نشان داد که تمامی نمونه‌های با نسبت رنگ‌دانه به رزین پایین‌تر از غلظت حجمی بحرانی رنگ‌دانه، از مقاومت به سایش خوبی برخوردار هستند ولی

1- X.D. Wang
2- Brittle micro - cutting

است. سطح رنگ‌های سیلیکاتی به صورت مات دیده می‌شود و از براقیت بسیار کمی برخوردار هستند.

یکی از مهم‌ترین عامل‌ها در کارایی و بازده رنگ‌های کنترل گرمایی، میزان جذب خورشیدی یا α_s است. در رنگ‌های کنترل گرمایی سیاه، به منظور داشتن بالاترین میزان جذب خورشیدی، مقدار α_s باید بالاتر از ۰٫۹ باشد از همین روی، رنگ‌های سیاه در زمره جذب‌کننده‌های تخت^۴ طبقه‌بندی می‌شوند [۱۵، ۱۶، ۳۱].

در شکل ۳ نمودار بازتابی مربوط به نمونه حاوی رنگ‌دانه اکسید مس با نسبت رنگ‌دانه به رزین ۱:۱ نشان داده شده است. رنگ‌دانه‌های اکسید مس و اکسید آهن به دلیل مقاومت بالا در برابر اکسیژن اتمی مورد استفاده قرار گرفتند [۱۵]. طیف بازتابی رنگ حاوی رنگ‌دانه اکسید مس، بازتاب حدود چهل درصدی را در محدوده مرئی و زیر قرمز نزدیک نشان داد و به همین علت میزان جذب کمتری از رنگ حاوی اکسید آهن خواهد داشت. این پوشش به دلیل داشتن جذب کم‌تر از ۰٫۹۰ (۰٫۶۷)، به عنوان یک پوشش کنترل گرمایی سیاه قابل استفاده نیست. میزان بازتاب رنگ‌دانه‌ها در کل بازه طول موجی به ماهیت ماده مربوط بوده و جزء خواص ذاتی مواد است. اکسید مس به طور ذاتی در ناحیه مرئی بازتاب بالاتری دارد و به همین سبب جذب آن کاهش می‌یابد و امکان استفاده از آن به عنوان یک پوشش کنترل گرمایی سیاه با مشکل مواجه می‌شود.

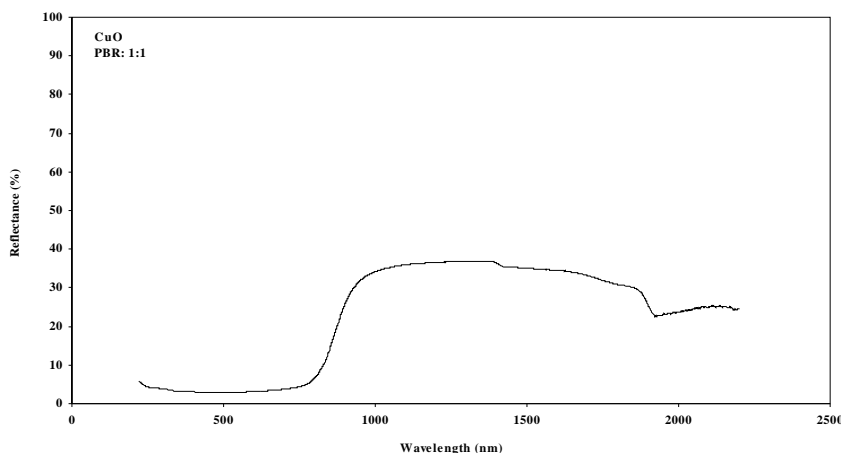
- 1- Cross Cut
- 2- Specular
- 3- Diffuse
- 4- Flat absorbers

به منظور ارزیابی چسبندگی پوشش‌ها از آزمون کراس‌کات^۱ استفاده شد. نتایج این آزمون در جدول ۵ آورده شده است. نتایج به دست آمده از آزمون کراس‌کات نشان داد که چسبندگی پوشش‌های حاوی اکسید آهن بسیار خوب بوده و پوشش‌های حاوی اکسید مس نیز از چسبندگی مناسب برخوردار هستند. اندازه‌گیری چسبندگی پوشش‌ها نشان داد که پوشش‌ها از چسبندگی خوبی برخوردار هستند. از آن جایی که یکی از مهم‌ترین خصوصیات فیزیکی متأثر از غلظت حجمی بحرانی رنگ‌دانه؛ چسبندگی است [۲۸]، در غلظت حجمی بحرانی رنگ‌دانه، رزین تنها برای پر کردن فواصل میان ذرات رنگ‌دانه وجود دارد و بالاتر از این حد، رزین کافی برای پر کردن فواصل میان ذرات رنگ‌دانه وجود ندارد و به جای رزین، هوا در بین ذرات رنگ‌دانه قرار می‌گیرد. در این حالت عملاً ذرات رنگ‌دانه اتصال با یکدیگر و با زیرلایه ندارند و این امر باعث کاهش میزان چسبندگی رنگ به زیرلایه می‌شود. در رنگ‌های کنترل گرمایی سیاه سیلیکاتی به دلیل پایین‌تر بودن میزان رنگ‌دانه از غلظت حجمی بحرانی، چسبندگی خوبی حاصل شد.

در جدول ۵ میزان براقیت نمونه‌های رنگ نشان داده شده است. براقیت رنگ‌های سیلیکاتی به دلیل متخلخل بودن سطح آنها ذاتاً پایین است. نور در هنگام برخورد با سطح رنگ‌های سیلیکاتی، بازتاب منظم^۲ نمی‌یابد؛ بلکه به صورت نامنظم در جهات مختلف پراکنده می‌شود و از این رو سازوکار انعکاس نور از سطح این قبیل رنگ‌ها، پراکنده^۳ بوده [۲۹، ۳۰] و میزان انعکاس مستقیم و منظم در این رنگ‌ها بسیار کم است [۱۰]. از همین روی با توجه به نتایج نشان داده شده در جدول ۵ میزان براقیت نمونه‌های رنگ بسیار کم و پایین

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

نام نمونه	براقیت در زاویه ۶۰°	استحکام چسبندگی Cross Cut	آزمون خمش قطر استوانه (mm)	آزمون ضربه ارتفاع وزنه (cm)	آزمون سایش کاهش وزن (mg)	ضخامت پوشش‌ها (μm)
A1	۱۴٫۲	۵B	۶	۴۵	۱٫۵±۰٫۲	۱۵٫۶±۱
A2	۱۳٫۵	۵B	۶	۴۳	۱٫۸±۰٫۲	۱۸٫۲±۱
A3	۱۶٫۶	۵B	۶	۳۸	۱٫۷±۰٫۲	۲۰٫۳±۱
B1	۳٫۷	۴B	۸	۵۳	۲٫۴±۰٫۲	۲۸٫۸±۱
B2	۲٫۱	۴B	۸	۴۷	۳٫۷±۰٫۲	۲۱٫۴±۱
B3	۴٫۳	۴B	۸	۴۴	۶٫۲±۰٫۲	۱۶٫۷±۱



شکل ۳: نمودار بازتابی مربوط به نمونه حاوی اکسید مس با نسبت رنگدانه به رزین ۱:۱.

سطحی ناصاف و زبر است [۲۶، ۲۵].

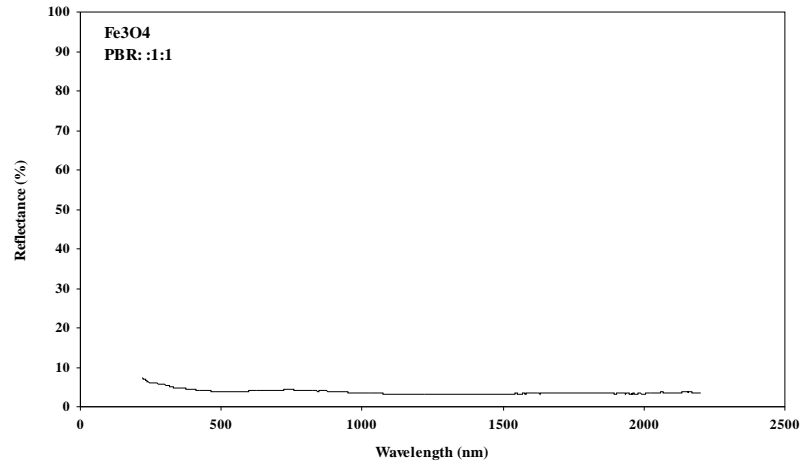
یکی دیگر از عامل‌های بسیار مهم در کارایی و بازده یک پوشش کنترل گرمایی، میزان نشر گرمایی آن در ناحیه زیر قرمز دور است. به طور کلی رنگ‌های کنترل گرمایی، ذاتاً دارای نشر گرمایی بالایی هستند [۲۵] و بنابراین نیاز به صرف وقت و انرژی در زمینه پوشش‌ها نشان داده شده است. اندازه‌گیری میزان نشر گرمایی برای بهینه‌سازی نشر گرمایی نیست. در جدول ۶، مقادیر نشر گرمایی پوشش‌ها نشان داده شده است. اندازه‌گیری میزان نشر گرمایی برای نشر گرمایی بالاتری نسبت به رنگ‌های کنترل گرمایی سیاه معرفی شده در مراجع برخوردار هستند [۳۲-۳۴]. جان هنینگر^۱ در مقاله‌ای، نشر گرمایی چندین پوشش کنترل گرمایی سیاه را گزارش کرد [۳۳]. تمامی پوشش‌هایی که او معرفی کرد، از نشر گرمایی پایین‌تر از ۰٫۹۵ برخوردار بودند. به طور کلی در رنگ‌های کنترل گرمایی سیاه، نسبت جذب خورشیدی به نشر گرمایی باید برابر با ۰٫۹۵ / ۰٫۹۲ [۳۲]، و یا در حالت بهینه نزدیک به یک باشد. رنگ‌های سیاه تهیه شده در این پژوهش، همگی دارای نشر گرمایی بالاتر از ۰٫۹۲ بودند.

^۱ - John H. Henninger

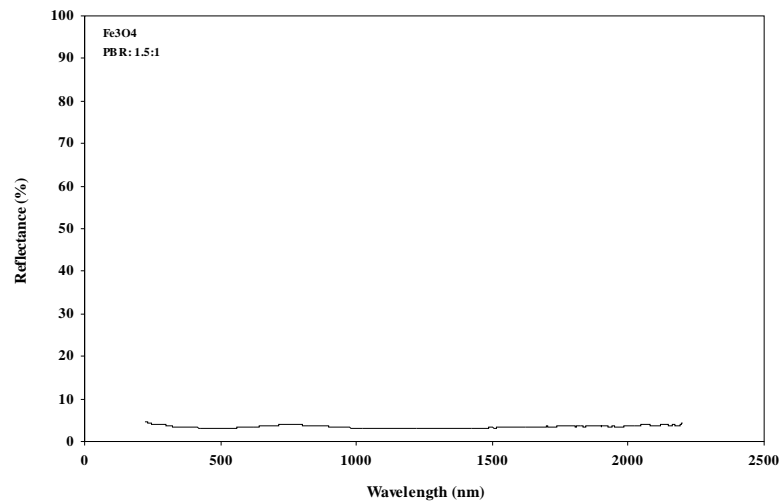
در شکل‌های ۴، ۵ و ۶؛ نمودارهای بازتابی رنگ‌های حاوی رنگدانه اکسید آهن با نسبت‌های رنگدانه به رزین ۱:۱، ۱٫۵:۱ و ۲:۱ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود رنگ حاوی اکسید آهن تقریباً تمامی طول‌موج‌های تابیده شده را جذب می‌کند. مقایسه نتایج به دست آمده با مراجع [۳۲، ۱۶]، نشان داد که پوشش‌های حاوی اکسید آهن تهیه شده در این پژوهش، با نسبت رنگدانه به رزین کمتر (۱:۱) در مقایسه با مراجع (۲:۱)، جذب بالاتری را نشان می‌دهند. میزان جذب خورشیدی اندازه‌گیری شده برای رنگ‌های تهیه شده، برابر با ۰٫۹۸ محاسبه شد. با توجه به این که میزان جذب خورشیدی رنگ‌های حاوی رنگدانه اکسید آهن بالاتر از ۰٫۹ بود، این رنگ‌ها به عنوان رنگ‌های کنترل گرمایی سیاه قابل قبول هستند. در شکل ۷ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی به دست آمده از رنگ حاوی رنگدانه اکسید آهن با نسبت رنگدانه به رزین ۲:۱ نشان داده شده است. اکسید آهن با وجود داشتن خاصیت مغناطیسی و تمایل ذرات به جذب یکدیگر، در رنگ به خوبی پخش شده و توده‌های رنگدانه مشاهده نشدند. در تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی با بزرگنمایی بالاتر که به شکل ۷ الصاق شده است توزیع مناسب ذرات مشاهده می‌شود. سطح ناصاف رنگ، به خاصیت ذاتی رزین‌های سیلیکاتی باز می‌گردد که رنگ حاصل از آنها دارای

جدول ۶: مقادیر نشر گرمایی اولیه و نهایی پوشش‌ها و نسبت جذب به نشر.

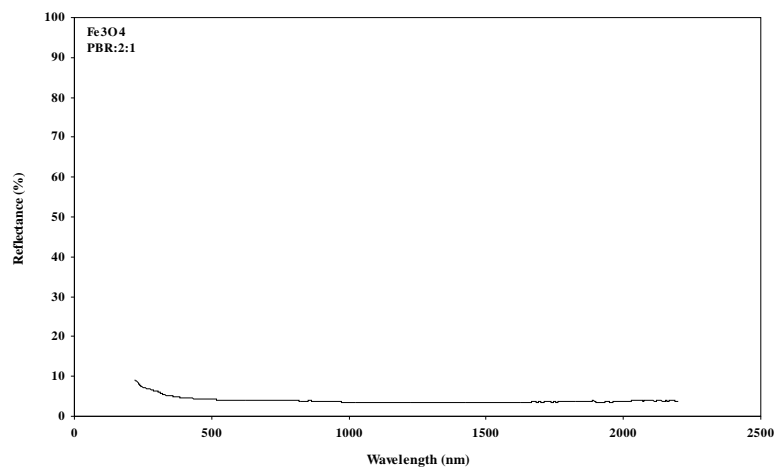
نام نمونه	نوع رنگدانه در نمونه	نسبت رنگدانه به رزین	نشر گرمایی
A۱	اکسید آهن	۱:۱	۰٫۹۵۶
A۲	اکسید آهن	۱٫۵:۱	۰٫۹۶۶
A۳	اکسید آهن	۲:۱	۰٫۹۶۸
B۱	اکسید مس	۱:۱	۰٫۹۳۳
B۲	اکسید مس	۱٫۵:۱	۰٫۹۲۳
B۳	اکسید مس	۲:۱	۰٫۹۴۰



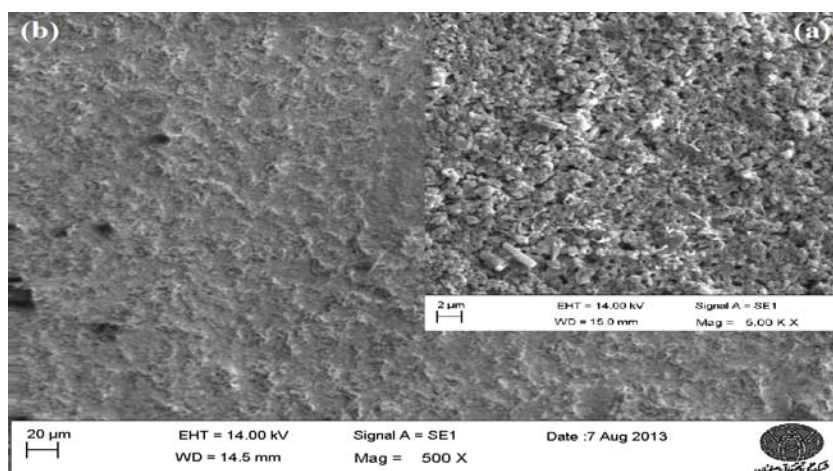
شکل ۴: نمودار بازتابی رنگ حاوی رنگدانه اکسید آهن با نسبت رنگدانه به رزین ۱:۱.



شکل ۵: نمودار بازتابی رنگ حاوی رنگدانه اکسید آهن با نسبت رنگدانه به رزین ۱.۵:۱.



شکل ۶: نمودار بازتابی رنگ حاوی رنگدانه اکسید آهن با نسبت رنگدانه به رزین ۲:۱.



شکل ۷: تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح رنگ حاوی رنگدانه اکسید آهن با نسبت رنگدانه به رزین (۲:۱، a) بزرگنمایی بالاتر و (b) بزرگنمایی پایین تر.

خواص عمومی مطلوب تری نسبت به پوشش حاوی اکسید مس برخوردار است. جذب تابش برخوردی در نمونه حاوی رنگدانه اکسید آهن تقریباً کامل بوده و تمامی طول موج‌های موجود در محدوده مرئی تا زیر قرمز نزدیک را جذب می‌کند. پوشش حاوی رنگدانه اکسید آهن دارای جذب خورشیدی و نشر گرمایی به ترتیب برابر با ۰,۹۸ و ۰,۹۲ بود. از این روی، پوشش حاوی رنگدانه اکسید آهن به عنوان رنگ کنترل گرمایی سیاه مورد استفاده قرار گرفت.

۴- نتیجه گیری

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمون‌های نوری و عمومی، نتایج کلی زیر حاصل شد: خواص عمومی تمامی نمونه‌های تهیه شده به عنوان رنگ، مناسب و قابل قبول است. مقاومت به سایش نمونه‌های تهیه شده بسیار مناسب (کمتر از پنج میلی گرم پس از ۵۰۰ دور) است. مقاومت به ضربه و توانایی خمش نمونه‌ها در حد قابل قبول است. تمامی نمونه‌ها از چسبندگی قابل قبولی (۵B) برخوردار هستند. رنگ حاوی رنگدانه اکسید آهن با نسبت رنگدانه به رزین ۲:۱، از

۵- مراجع

1. A. P. Kulshreshtha, UV irradiation effect on the electrical properties of ZnO thermal control coating pigment. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* 6(1970), 468-472.
2. C. P. Torre, Thermal control coatings and method for improving atomic oxygen resistance, US Pat. 4939031, 1990.
3. J. I. Kleiman, Z. Iskanderova, Protection of materials and structures from space environment, Second edition, Kluwer Academic Publishers, 5, 2004, 193.
4. E. S. Berman et al., Spacecraft materials development Programs for thermal control coatings and space environmental testing. *Amptiac Q.* 8 (2004) 59-68.
5. M. Williamson, Spacecraft thermal design. *Phys. Technol.* 18(1987), 120-127.
6. 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(2012), 79-89.
7. N. Kayhan, R. Sh. Razavi, Preparation and evaluation of white silicone thermal control paint properties. *J. Color.Sci. Tech.* 6(2012), 233-239.
8. 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(2012), 197-207.
9. 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.
10. N. Kiomarsipour, R.Sh. Razavi, K. Ghani, Evaluation of Pigment to Binder Ratio Effect on Properties of White Silicate Thermal Control Paints Used on Satellite. *J. Color. Sci. Tech.* 7(2013), 113-121.
11. N. Kiomarsipour, R. Shoja Razavi, K. Ghani, Improvement of spacecraft white thermal control coatings using the new synthesized Zn-MCM-41 pigment. *Dyes Pigm.* 96(2013), 403-406.
12. P. T. Boaz, L. Mich, Water-based paint including glass particulate, U.S. Patent, No. 5698026, 1997.
13. J. B. Schutt, S. Spring, C.M. Shai, Alkali-metal silicate protective coatings, U.S. Patent, No. 3454410.
14. 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(2012), 177-186.
15. R. R. Kamenetzky, J. A. Vaughn, M. M. Finckenor, R.C. Linton, Evaluation of thermal control coatings and

- polymeric materials exposed to ground simulated atomic oxygen and vacuum ultraviolet radiation, *NASA Technical Paper 3595*. 1995.
16. M. S. Deshpande, Y. Harada, Development of Tailorable Electrically Conductive Thermal Control Material Systems, *NANA/CR-1998-208474*. 1998.
 17. Standard test method for abrasion resistance of organic coatings by the taber abraser, ASTM Standard, D4060-01, 2008.
 18. Standard test methods for measuring adhesion by tape test, ASTM Standard, D-3359, 2002.
 19. Standard test methods for mandrel bend test of attached organic coatings, ASTM Standard, D522-93a, 2008.
 20. Standard test method for impact flexibility of organic coatings, ASTM Standard, D6905-03, 2008.
 21. M. Taheran, A. H. Navarchian, R. Shoja Razavi, Optimization of wear resistance of PU/TiO₂ coatings on aluminum surfaces. *Prog. Org. Coat.* 72(2011), 486–491.
 22. M. Barekat, R. Shoja Razavi, S. Bastani, Wear behavior of silicone rubber/carbon black coatings on 6061 aluminum alloy surfaces. *Prog. Org. Coat.* 76(2013), 277–285.
 23. X. D. Wang, A study of electron exposure effects on ZnO/K₂SiO₃ thermal control coatings. *Mater. Chem. Phys.* 78(2008), 38–42.
 24. D. S. Mao, Study of abrasion behavior of an advanced Al₂O₃-TiC-Co Ceramic. *Wear.* 209(1997), 153-159.
 25. J. K. Lancaster, Material specific wear mechanisms: relevance to wear modelling. *Wear.* 141(1990), 159-183.
 26. G. W. Stachowiak, *Wear materials, mechanism and practice*, John Wiley & Sons Ltd, 2005, 170.
 27. Z. W. Wicks, *Organic coatings, science and technology*, Wiley & Sons Publishing, New York, 2007.
 28. S. Paul, *Surface coating, science and technology*, John Wiley & Sons, New York, 1985.
 29. J. A. Johnson, A multiple-scattering model analysis of zinc oxide pigment for spacecraft thermal control coatings. *Prog. Org. Coat.* 47(2003), 432-442,
 30. D. Stoye, *Paints, coatings and solvents*, WILEY-VCH, New York, 1998.
 31. T. Heslin, J. Heuney, M. Harper, The effects of particle size on the optical properties and surface roughness of a glass-balloun filled black paint, *NASA Technical Note, D-7643*. 1974.
 32. D. G. Gilmore, *Spacecraft Thermal Control Handbook, Vol. I: Fundamental Technologies*, American Institute of Aeronautics and Astronautics. Inc. Reston, Virginia, 2002.
 33. J. H. Henninger, Solar absorptance and thermal emittance of some common spacecraft thermal control coatings, *NASA reference publication 1121*. 1984.
 34. C. H. Clatterbuck, J.J. Scialdone, An evaluation of two flat-black silicone paints for space application, *NASA technical memorandum 100768*. 1990.