

ارزیابی خواص نوری-حرارتی و چسبندگی پوشش‌های کنترل حرارتی در سامانه ماهواره

رضا شجاع رضوی، سید مسعود برکت، نرگس کیومرثی پور و کمال فانی

دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی مالک اشتر شاهین شهر، اصفهان

سعید باستانی

پژوهشگاه علوم و فناوری رنگ، تهران

(دریافت : ۸۹/۱۲/۱۳ - پذیرش : ۹۰/۲/۳۱)

چکیده

فضایما به سبب قرارگیری در برابر خورشید و یا فضای سرد در معرض تغییرات شدید دمایی قرار دارد. دمای تعادلی زیرسیستم فضایما توسط جذب خورشیدی و نشر مادون قرمز (خواص نوری-حرارتی) سطوح آن کنترل می‌شود. پوشش‌های سفید و سیاه کنترل حرارتی بر روی اجزا فضایما بکار می‌روند و نقش مهمی در کنترل حرارت به وسیله خواص نوری خود دارند. در این تحقیق خواص نوری-حرارتی و چسبندگی دو نوع پوشش کنترل حرارتی سیاه سیلیکونی و سفید سیلیکاتی بر پایه روش تاگوچی بررسی شد. نتایج نشان داد در پوشش سیاه سیلیکونی، آماده‌سازی سطح و استفاده از عوامل بهبود دهنده چسبندگی بر روی مقاومت به چسبندگی این پوشش‌ها بیشترین اثرگذاری را دارند. همچنین این پوشش‌ها دارای ضریب جذب ۰/۹۵۵ و شدت نشر ۰/۹۲۰ هستند. بررسی خواص نوری-حرارتی پوشش سفید سیلیکاتی بهینه شده نشان داد، نوع رنگدانه مؤثرترین عامل بر خواص نوری-حرارتی بوده و این پوشش دارای ضریب جذب ۰/۲۳۰، شدت نشر ۰/۹۰۷ و چسبندگی مناسب است. نتایج ارزیابی‌ها نشان داد هر دو پوشش بهینه شده در این تحقیق از خواص نوری-حرارتی و چسبندگی مطلوبی برخوردار بوده و می‌تواند به عنوان پوشش کنترل حرارتی بر روی ماهواره‌ها بکار روند.

واژه های کلیدی: پوشش کنترل حرارتی، خواص نوری-حرارتی، پوشش سیاه سیلیکونی، پوشش سفید سیلیکاتی.

Evaluation of thermo-optical and adhesion properties of thermal control coatings employed in spacecraft surfaces

R. Sh. Razavi, S. M. Barekat, N. Kiomarsipour and K. Ghani

Department of Materials Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Shahin shahr

S. Bastani

Institute for Color Science and Technology, Tehran

(Received 3 March 2011, accepted 21 May 2011)

Abstract

A spacecraft in orbit undergoes extreme temperature cycling due to the direct sun load on one side and deep cold space on the other side. The equilibrium temperature of any subsystem of the spacecraft is controlled by the solar absorptance (α_s) and infrared emittance (ϵ) of its surface. White and black thermal control coatings applied to the spacecraft components play an important role on thermal control by providing suitable optical properties. In the present paper, the thermo-optical and adhesion properties of black silicone and white silicate thermal control coatings based on taguchi design were studied. Results showed that the surface pretreatment and adhesion promoter type had important influence on the adhesion properties of the black silicone thermal control coatings. The thermo-optical testing showed that solar absorption and emittance coefficients of this coating were 0.955 and 0.920 respectively. The results also, indicated that the pigment type was most effective parameter on the thermo-optical properties of white silicate thermal control coatings. The solar absorption and infrared emittance of this coating were 0.230, 0.907 respectively. Overall conclusion indicated both of optimized coatings in this study had desirable thermo-optical and adhesion properties, therefore could use as thermal control coatings on the surfaces of spacecraft.

Keywords: Thermal Control Coatings, Thermo-Optical Properties, Black Silicone Coatings, White Silicate Coatings.

E-mail of corresponding author: shoja_r@mut-es.ac.ir

مقدمه

از جمله پارامترهایی که در طراحی سامانه‌های فضایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، مسأله کنترل حرارت و پایداری سازه در برابر شرایط دمایی سخت و متغیر موجود در فضا است. به منظور حفاظت از سیستم در برابر این تغییرات شدید دمایی استفاده از پوشش‌های کنترل حرارتی غیرفعال، اجتناب ناپذیر است. ساخت انواع پوشش‌های کنترل حرارتی به منظور کاهش آثار مخرب بر روی تجهیزات فضایی از ابتدای تولید اولین ماهواره‌ها از اهمیت بالایی برخوردار بوده است و تحقیقات مختلفی جهت تولید و بهینه‌سازی این پوشش‌ها انجام گرفته است [۱-۱۶]. گستره دمایی که یک ماده در طول سیکل حرارتی متحمل می‌شود، به خواص نوری-حرارتی (ضریب جذب و شدت نشر حرارتی) آن، بستگی دارد. پوشش‌های سفید دارای ضریب جذب پایین و شدت نشر بالا و پوشش‌های سیاه دارای ضریب جذب و شدت نشر بالا هستند [۱۷ و ۱۸]. پلیمرهای سیلیکونی به دلیل ساختار دارای انرژی پیوند بالا و خصوصیات یونی بالا از باندهای Si-O [۱۹] و رزین‌های غیرآلی سیلیکات پتاسیم به دلیل ایجاد ساختار آمورف سیلیکاتی پس از پخت، دارای پایداری حرارتی بالایی هستند [۱۴]. بنابراین این دو رزین گزینه‌های مناسبی جهت تولید پوشش‌های کنترل حرارتی می‌باشند. از ذرات کربن سیاه به عنوان رنگدانه در پوشش‌های سیاه استفاده می‌گردد. استفاده از ساختار کربن سیاه اسفنجی متخلخل به دلیل ذرات با حجم مؤثر بیشتر سبب گسترش و پخش‌شدگی بیشتر این رنگدانه در رزین می‌شود [۲۰ و ۲۱]. ذرات اکسید روی به دلیل مقاومت بسیار خوب این ماده در برابر تابش فرابنفش و همچنین حفظ رزین در مقابل تخریب، به طور گسترده در پوشش‌های کنترل حرارتی سفید به عنوان رنگدانه استفاده می‌شود [۴، ۶، ۱۴ و ۱۵]. پلیمرهای سیلیکونی خطی با انتهای هیدروکسیل، قابلیت پخت و سه‌بعدی شدن با عوامل شبکه‌ساز^۱ را دارند.

از آن‌ها در تهیه انواع رزین‌های سیلیکونی الاستومر پخت-شونده در دمای محیط^۲ (RTV) استفاده می‌شود [۲۲]. چسبندگی این پوشش‌ها به انواع زیرلایه ضعیف است؛ به همین منظور آماده‌سازی سطح و استفاده از عامل‌های چسبندگی سیلانی، روش‌های مهمی جهت افزایش چسبندگی این پوشش‌ها هستند [۲۳، ۲۴ و ۲۵]. در پوشش-های سفید سیلیکاتی دستیابی به ضریب جذب پایین و شدت نشر بالا بسیار مشکل است و تحقیقات مختلفی در این زمینه جهت کاهش ضریب جذب و افزایش شدت نشر انجام گرفته است [۳-۵، ۸، ۱۴ و ۱۵].

در تحقیق حاضر برای اولین بار در ایران پوشش‌های کنترل حرارتی سیاه سیلیکونی و سفید سیلیکاتی تولید و خواص نوری-حرارتی آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور بهبود چسبندگی پوشش سیاه سیلیکونی با استفاده از روش تاگوچی اثر پارامترهای مختلف بر روی چسبندگی بررسی و پارامترهای بهینه جهت حصول بالاترین چسبندگی معرفی گردید. در پوشش‌های سیلیکاتی سفید با استفاده از روش تاگوچی، میزان تأثیر عوامل مختلف بر ضریب جذب و شدت نشر پوشش تعیین و در نهایت با توجه به داده‌های موجود، پوشش با خواص بهینه تعیین شد. تولید پوشش-های کنترل حرارتی سیاه سیلیکونی و سفید سیلیکاتی و بهینه‌سازی آن‌ها گامی بلند در جهت بومی‌سازی دانش فنی تولید و اعمال پوشش کنترل حرارتی بر روی اعضای خارجی ماهواره در داخل ایران است. ترکیبات استفاده شده برای هر دو پوشش برای اولین بار در این تحقیق استفاده و بهینه‌سازی شده است. تأثیر همه عوامل ساختاری و عملیاتی تولید و اعمال پوشش سفید و سیاه کنترل حرارتی بر روی خواص نوری-حرارتی و چسبندگی این پوشش‌ها در این تحقیق برای اولین بار بررسی شده است که این بررسی همه جانبه در سایر مقالات مشابه قابل مشاهده نمی‌باشد.

^۱ - Cross-linker^۲ - Room Temperature Vulcanising

جدول ۱. عوامل مؤثر و سطوح انتخاب شده برای پوشش سیاه سیلیکونی.

فاکتور	نماد	واحد	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
وزن مولکولی پلیمر	A	gr/mol	۱۸۰۰۰	۳۶۰۰۰	-
رنگدانه کربن سیاه	B	درصد وزنی نسبت به وزن پلیمر	۲	۳	۴
عامل شبکه‌ساز	C	درصد وزنی نسبت به وزن پلیمر	۴	۸	۱۲
کاتالیست	D	درصد وزنی نسبت به وزن پلیمر	۰/۲	۰/۴	۰/۶
آماده‌سازی زیرلایه	E	-	آندایزینگ	سنباده‌زنی و شستشو با استون	غوطه‌وری در سود
عوامل بهبوددهنده چسبندگی	F	-	پاشش آستری DW1200	پاشش عامل چسبنده APTES	افزودن عامل APTES به مقدار ۱ درصد وزنی به پلیمر

مواد و روش آزمایش‌ها

۱- پوشش کنترل حرارتی سیاه سیلیکونی

از پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان^۱ با انتهای هیدروکسیل با دو وزن مولکولی ۱۸۰۰۰ و ۳۶۰۰، عامل شبکه‌ساز متیل‌تریس (۲-بوتانول‌اکسینو)سیلان^۲ و کاتالیست دی‌بوتیل‌تین‌دیلورات^۳ همگی محصول شرکت جیلست^۴ آمریکا، از رنگدانه کربن سیاه با نام تجاری Printex xe2 محصول شرکت دگوسای^۵ آلمان استفاده شد. به منظور بهبود چسبندگی پوشش سیلیکونی به زیرلایه آلومینیومی از آستری DW1200 محصول شرکت دوکورینگ^۶ آمریکا و عامل چسبندگی ۳-آمینوپروپیل‌تری‌اتوکسی سیلان^۷ (APTES) محصول شرکت جیلست آمریکا، استفاده شد. در جدول ۱ عوامل مؤثر و سطوح انتخاب شده برای پوشش سیاه سیلیکونی جهت انجام طراحی آزمایش مشخص گردیده است. با توجه به عوامل و سطوح انتخاب شده و با استفاده از نرم‌افزار Qualitek4 طراحی آزمایش‌ها انجام گرفت و آرایه متعامد L18 به دست آمد که در جدول ۲ خلاصه شده است. به منظور ساخت هر پوشش مطابق طراحی آزمایشات (جدول ۲)، ابتدا کربن سیاه به پلیمر پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان اضافه شده و برای مدت ۲ ساعت با دور آسیاب ۱۰۰۰ دور در دقیقه فرآیند آسیاب انجام گرفت. مخلوط پلیمر، کربن سیاه و حلال

زابلن^۸ که از آسیاب حاصل شده است؛ با عامل شبکه‌ساز اکسیم‌سیلان ترکیب شده و برای ۷۲ ساعت در دمای ۸۰-۷۰ °C به آهستگی تحت ریفلاکس قرار گرفت. سپس کاتالیست به مخلوط فوق اضافه شده و توسط همزن به مدت ۲ دقیقه با سرعت هم‌زدن ۵۰۰ دوربردقیقه در کل رزین پراکنده شد. زیرلایه‌ها مطابق استاندارد ASTM D1730-03 تحت فرآیند آماده‌سازی با توجه به طراحی آزمایشات قرار گرفت [۲۵]. عوامل بهبوددهنده چسبندگی توسط پیستوله بر روی نمونه‌ها با ضخامت ۱۰-۵ μm پاشش شده سپس پوشش با ضخامت حدود ۷۵ μm بر روی آن پاشش گردید. نمونه‌ها به مدت ۲۰ روز در دمای ۵۰ °C و رطوبت ۷۰ درصد قرار داده شد؛ تا پوشش‌ها کاملاً پخت گردد.

۲- پوشش کنترل حرارتی سفید سیلیکاتی

به منظور انجام طراحی آزمایشات فاکتورهای آزمایش و سطوح آن‌ها تعیین شد. این فاکتورها و سطوح آن‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است. با استفاده از نرم‌افزار Qualitek4 طراحی آزمایش بر روی فاکتورها و سطوح آن‌ها انجام گرفت. در جدول ۴ طراحی آزمایشات نشان داده شده است. به منظور ساخت هر پوشش مطابق با جدول ۴، رنگدانه و سیلیکات پتاسیم با یکدیگر مخلوط شده و به مدت سه ساعت تا رسیدن به دانه‌بندی مناسب مخلوط شدند. پوشش‌های تولید شده بر روی زیرلایه‌های آلومینیومی اسپری شدند. قبل از اسپری کردن،

¹- Poly Dimethyl Siloxane

²- MethylTris(2-ButanoneOxino)Silane

³- DibutylTin Dilaurate

⁴- Gelest

⁵- Degussa

⁶- Dow Corning

⁷- 3-AminoPropylTriEthoxySilane

⁸- Xylene

جدول ۲. جدول طراحی آزمایش ها برای پوشش سیاه سیلیکونی با استفاده از روش تاگوچی L₁₈.

متغیرها (عوامل)						شماره آزمایش
F	E	D	C	B	A	
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲	۲	۲	۲	۱	۱	۲
۳	۳	۳	۳	۱	۱	۳
۲	۲	۱	۱	۲	۱	۴
۳	۳	۲	۲	۲	۱	۵
۱	۱	۳	۳	۲	۱	۶
۳	۱	۲	۱	۳	۱	۷
۱	۲	۳	۲	۳	۱	۸
۲	۳	۱	۳	۳	۱	۹
۲	۳	۳	۱	۱	۲	۱۰
۳	۱	۱	۲	۱	۲	۱۱
۱	۲	۲	۳	۱	۲	۱۲
۱	۳	۲	۱	۲	۲	۱۳
۲	۱	۳	۲	۲	۲	۱۴
۳	۲	۱	۳	۲	۲	۱۵
۳	۲	۳	۱	۳	۲	۱۶
۱	۳	۱	۲	۳	۲	۱۷
۲	۱	۲	۳	۳	۲	۱۸

و به محلول قبلی اضافه شد. در ادامه ۳۶ میلی لیتر تترائیل اورتوسیلیکات به تدریج و قطره قطره به ترکیب قبلی اضافه و به مدت دو ساعت در دمای اتاق هم زده شد. پس از دو ساعت، مخلوط حاصل صاف و در دمای ۷۵°C خشک شد. سپس در دمای ۵۴۰°C به مدت هشت ساعت کلسینه شد [۲۶]. تمام مواد مورد استفاده جهت تولید این رنگدانه، خالص بوده و از شرکت مرک آلمان تهیه شدند.

۳-تجهیزات

به منظور ارزیابی چسبندگی پوشش های سیاه سیلیکونی و سفید سیلیکاتی به ترتیب از دستگاه Pull off مدل F106 ساخت شرکت الکو متر انگلستان به همراه چسب سیلیکونی

جهت آماده سازی زیرلایه ها، از دو روش سنباده زنی معمولی و آندایز، استفاده شد. زیرلایه ها مدت ۳۰ ثانیه در محلول سود ۰/۱ نرمال فرو برده و سپس با آب مقطر به خوبی شستشو داده شدند. سپس زیرلایه ها ابتدا با سنباده شماره ۴۰۰ و سپس با سنباده شماره ۱۲۰۰ سنباده زده و در پایان با استون خالص شستشو شدند. آندایزینگ زیرلایه ها مطابق با استاندارد ASTM D1730-03 انجام شد [۲۵]. پس از اعمال پوشش، نمونه ها در رطوبت ۶۵-۴۵ درصد به مدت هفت روز قرار داده شده تا پخت شوند. به منظور تهیه رنگدانه C، ۵۰۰ میلی لیتر آب مقطر و ۴۷۵ میلی لیتر اتانول با یکدیگر مخلوط و سپس ۱۳ گرم ستیل تری متیل آمونیوم برومید به آن اضافه شد. ۵۰ گرم استات روی در ۱۱۹ میلی لیتر آمونیاک حل

جدول ۳. فاکتورهای انتخاب شده و سطوح آن ها برای ساخت پوشش سفید سیلیکاتی

فاکتور	نماد	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
نوع رزین	A	SiO ₂ :K ₂ O:۱/۸۵	SiO ₂ :K ₂ O:۱/۹۲	-
نوع آماده سازی زیرلایه	B	سنباده زنی	آندایز شده	-
نوع رنگدانه	C	اکسید روی	دی اکسید تیتانیم	C تولید شده
نسبت رنگدانه به رزین	D	۳:۱	۳/۵:۱	۴:۱

جدول ۴. جدول طراحی آزمایش ها برای پوشش سفید سیلیکاتی با استفاده از روش تاگوچی L9

کد نمونه	شماره آزمایش	A	B	C	D
S1	۱	۱	۱	۱	۱
S2	۲	۲	۲	۱	۲
S3	۳	۱	۱	۱	۳
S4	۴	۲	۱	۲	۱
S5	۵	۱	۱	۲	۲
S6	۶	۱	۲	۲	۳
S7	۷	۱	۲	۳	۱
S8	۸	۱	۱	۳	۲
S9	۹	۲	۱	۳	۳

فاکتور آماده سازی زیرلایه بزرگترین مجموع مربعات را دارا است. بنابراین این سه فاکتور حذف شدند.

به منظور درک بهتر از آنالیز کیفی، در شکل ۱ تصاویر گرفته شده از ناحیه تحت آزمون Pull off برای نمونه های با چسبندگی مختلف به عنوان مثال نشان داده شده است. در شکل ۱(الف) ناحیه تحت آزمون برای نمونه با کد ۶ مشخص شده است. همان گونه که مشاهده می شود، پوشش از زیرلایه جدا نشده و جداسازی از فصل مشترک بین چسب و پوشش اتفاق افتاده است. با توجه به جدول ۵ بار اعمالی جهت جداسازی برای این نمونه بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است. در شکل ۱(ب) ناحیه تحت آزمون برای نمونه با کد ۱۴ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود بخش هایی از پوشش به همراه چسب از زیرلایه جدا شده است؛ با این حال حدود ۸۰ درصد پوشش از زیرلایه جدا نشده است. در شکل ۱(پ) ناحیه تحت آزمون برای نمونه با کد ۴ مشخص شده است. در این ناحیه بخش زیادی از پوشش به همراه چسب از زیرلایه جدا شده است و تنها حدود ۳۰ درصد از پوشش همچنان به زیرلایه متصل است. در شکل ۲ اثر عوامل مختلف بر چسبندگی پوشش های سیاه سیلیکونی نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲ و جدول ۴ آماده سازی سطح بیشترین درصد اثر سهم را بر روی چسبندگی پوشش ها دارد. با توجه به شکل ۲ (الف، ب و ج) تغییر سطوح فاکتورهای درصد کربن سیاه، درصد شبکه ساز و درصد کاتالیست سبب تغییر نسبت S/N نشده است. بنابراین این فاکتورها بر روی چسبندگی پوشش تاثیرگذار نیستند.

RTV و از دستگاه کراس کات ساخت شرکت شیین^۱ انگلستان استفاده شد. از دستگاه های اسپکتروفلکتومتر^۲ و رفلکتومتر مادون قرمز^۳ برای بررسی خواص نوری- حرارتی نمونه ها مطابق استانداردهای ASTM E903-96 و ASTM E408-71 استفاده گردید.

نتایج و بحث

۱- پوشش کنترل حرارتی سیاه سیلیکونی

نمونه های پوشش پس از انجام کلیه آزمایش ها در شرایط طراحی شده (جدول ۲)، تحت آزمون چسبندگی قرار گرفتند. نتایج کمی و کیفی حاصل شده برای همه ۱۸ نمونه در جدول ۵ آورده شده است. نمونه های با بار اعمالی بالاتر چسبندگی بالاتری دارند. آنالیز واریانس از نتایج چسبندگی با استفاده از نرم افزار Qualiteck4 در جدول ۶ نشان داده شده است. نتایج آنالیز واریانس نشان می دهد؛ عوامل آماده سازی زیرلایه و عوامل بهبوددهنده چسبندگی به ترتیب با توجه به اثرگذاری بالا بر روی شرایط فصل مشترک بین زیرلایه و پوشش، بالاترین اثرگذاری را بر روی چسبندگی دارند و پس از آن ها نیز وزن مولکولی پلیمر مورد استفاده، بر روی نتایج اثرگذار است. مجموع مربعات هر یک از سه فاکتور درصد رنگدانه (B)، درصد شبکه ساز (C) و درصد کاتالیست (D) کمتر از ۱۰ درصد مجموع مربعات فاکتور آماده سازی زیرلایه (E) است.

¹-Sheen

²- Spectroreflectometer

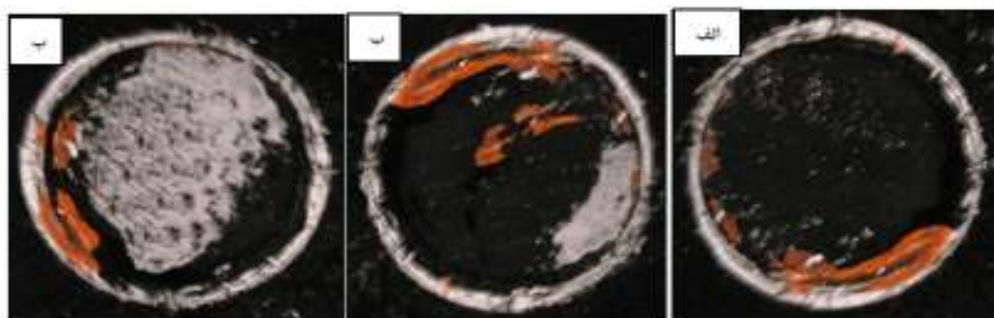
³- Infrared Reflectometer

جدول ۵. نتایج حاصل شده از آزمون چسبندگی به صورت کمی و کیفی برای پوشش سیاه سیلیکونی.

شماره آزمایش	بار اعمالی (lb/in ²)		آنالیز کیفی
	آزمایش ۱	آزمایش ۲	
۱	۴۳۰	۴۲۰	پوشش از زیرلایه جدا نشده است.
۲	۳۰۰	۲۸۰	حدود ۴۰ درصد از پوشش از زیرلایه جدا نشده است.
۳	۲۸۰	۳۰۰	حدود ۴۰ درصد از پوشش از زیرلایه جدا نشده است.
۴	۲۸۰	۲۷۰	حدود ۳۰ درصد از پوشش از زیرلایه جدا نشده است.
۵	۳۰۰	۳۰۰	حدود ۴۰ درصد از پوشش از زیرلایه جدا نشده است.
۶	۴۴۰	۴۶۰	پوشش از زیرلایه جدا نشده است.
۷	۳۳۰	۳۴۰	حدود ۶۰ درصد از پوشش از زیرلایه جدا نشده است.
۸	۳۶۰	۳۴۰	حدود ۶۰ درصد از پوشش از زیرلایه جدا نشده است.
۹	۳۴۰	۳۳۰	حدود ۶۰ درصد از پوشش از زیرلایه جدا نشده است.
۱۰	۳۱۰	۲۹۰	حدود ۴۰ درصد از پوشش از زیرلایه جدا نشده است.
۱۱	۳۲۰	۳۱۰	حدود ۴۰ درصد از پوشش از زیرلایه جدا نشده است.
۱۲	۳۰۰	۳۰۰	حدود ۴۰ درصد از پوشش از زیرلایه جدا نشده است.
۱۳	۳۵۰	۳۵۰	حدود ۶۰ درصد از پوشش از زیرلایه جدا نشده است.
۱۴	۳۷۰	۳۹۰	حدود ۸۰ درصد از پوشش از زیرلایه جدا نشده است.
۱۵	۱۹۰	۲۱۰	پوشش کاملاً از زیرلایه جدا شده است.
۱۶	۲۱۰	۲۰۰	پوشش کاملاً از زیرلایه جدا شده است.
۱۷	۳۷۰	۳۷۰	حدود ۸۰ درصد از پوشش از زیرلایه جدا نشده است.
۱۸	۳۹۰	۳۷۰	حدود ۹۰ درصد از پوشش از زیرلایه جدا نشده است.

جدول ۶. جدول آنالیز واریانس (ANOVA) از نتایج چسبندگی پوشش سیاه سیلیکونی.

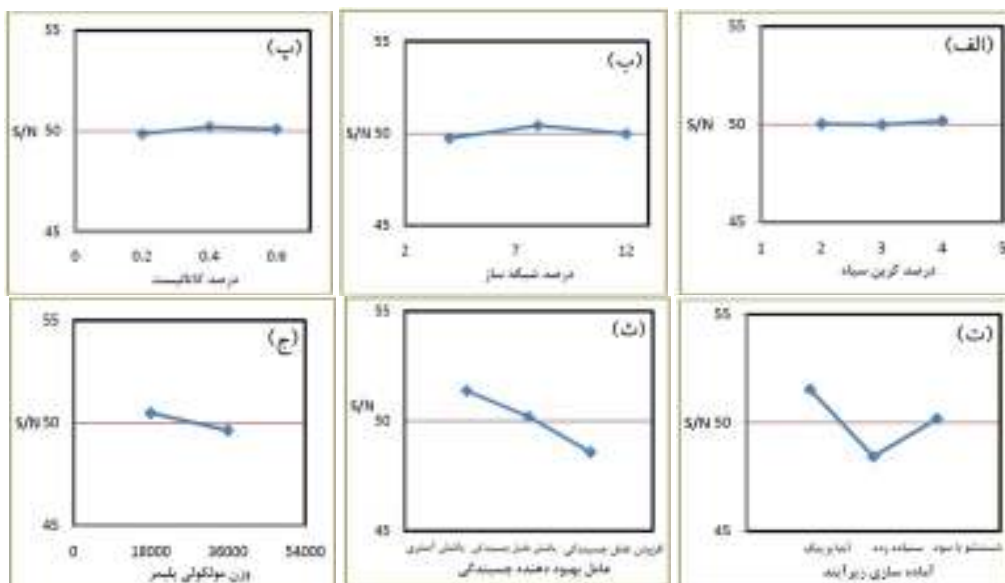
عوامل	نماد	درجه آزادی (F)	مجموع مربعات (S)	واریانس (V)	نسبت F (F)	درصد اثر فاکتور (P)
وزن مولکولی پلیمر	A	۱	۳/۲۱۷	۳/۲۱۷	۱۶/۰۲۵	۵/۱۶۲
درصد کربن سیاه	B	(۲)	(۰/۱۳۲)	-	حذف	-
درصد شبکه ساز	C	(۲)	(۱/۴۲۹)	-	حذف	-
درصد کاتالیست	D	(۲)	(۰/۳۸۴)	-	حذف	-
نوع آماده سازی زیرلایه	E	۲	۲۹/۰۰۹	۱۴/۵۰۴	۷۲/۲۳۴	۴۸/۹۴۹
عوامل بهبوددهنده چسبندگی	F	۲	۲۳/۸۰۷	۱۱/۹۰۳	۵۹/۲۸	۴۰/۰۴۸
خطا	-	۱۲	۰/۴۶۱	۰/۲	-	۵/۸۴۱
کل	-	۱۷	۵۸/۴۴۳	-	-	۱۰۰



شکل ۱. تصاویر گرفته شده از ناحیه تحت آزمون Pull off برای نمونه های با چسبندگی مختلف شامل الف) نمونه با کد ۶، ب) نمونه با کد ۱۴ و پ) نمونه با کد ۴.

زیرلایه سبب بهبود چسبندگی پوشش گردند [۲۳]. همان گونه که نتایج شکل ۲ (ت) نشان می دهد نمونه هایی که تحت فرآیند آماده سازی آندایزینگ قرار گرفته اند چسبندگی بالاتری نسبت به نمونه های مشابه دارند. به نظر می رسد، این امر به دلیل ایجاد پیوند شیمیایی و مکانیکی به طور هم زمان در نمونه های آندایز است. نتایج تحلیل واریانس نشان می دهد بعد از آماده سازی سطح، عوامل بهبوددهنده چسبندگی سهم بالایی در بهبود مقاومت چسبندگی دارند.

در فرآیند سنباده زنی (عملیات مکانیکی)، پیوند مکانیکی با زیرلایه و در فرآیند شستشوی زیرلایه با محلول قلیایی سود، پیوند شیمیایی بین زیرلایه و پوشش سبب بهبود چسبندگی پوشش می گردد. در فرآیند آندایزینگ بدون آب بندی، یک لایه Al_2O_3 کنترل شده با خلل و فرج یکنواخت تشکیل می شود. نفوذ پوشش به این خلل و فرج باعث ایجاد پیوند مکانیکی بین پوشش و زیرلایه می گردد [۲۷]. از طرفی چون فرآیند آب بندی در زیرلایه انجام نگرفته، عوامل OH موجود در سطح می توانند با ایجاد پیوند شیمیایی بین پوشش و



شکل ۲. اثر عوامل الف) درصد کربن سیاه، ب) درصد شبکه ساز، پ) درصد کاتالیست، ت) آماده سازی زیرلایه، ث) عوامل بهبود دهنده چسبندگی و ج) وزن مولکولی پلیمر بر روی چسبندگی پوشش سیاه سیلیکونی.

مجاورت رطوبت هیدرولیز می گردند. در مرحله دوم الیگومرهای تشکیل شده به یکدیگر متصل شده و پلیمریازسیون رخ می دهد. در مرحله سوم بین سیلانول موجود در سطح و گروه های سیلانول باقی مانده از عامل سیلانی، پیوند هیدروژنی تشکیل می گردد و در مرحله آخر در حین خشک شدن یا پخت شدن، اتصال کوالانسی بین زیرلایه و عامل سیلانی تشکیل می گردد. در همین حین گروه های عاملی در انتهای دیگر از مولکول سیلان مانند گروه های وینیل، کلروپروپیل، اپوکسی، متاکریلیک و آمینو با پوشش پلیمری پیوند شیمیایی تشکیل می دهند [۲۳]. با توجه به مکانیزم های

با توجه به شکل ۲ (ث)، آستری DW1200 بهترین چسبندگی را برای نمونه نسبت به نمونه های مشابه فراهم می آورد. در این آستری سه عامل اتوکسی با انجام فرآیند هیدرولیز باعث ایجاد پیوند بین عامل سیلانی و زیرلایه می شوند. حضور سه اتم کربن در زنجیره عامل سیلانی نقش مهمی را در پایداری حرارتی و همسان سازی ضریب انبساط حرارتی زیرلایه و پوشش دارند. عامل آمین موجود در ترکیب، پیوند کوالانسی و یا فیزیکی بین پوشش سیلیکونی و عامل چسبندگی را برقرار می کند. واکنش عوامل سیلانی بین زیرلایه و پوشش دارای چهار مرحله است: در مرحله اول گروه های قابل هیدرولیز در

با کمک نرم افزار Qualiteck4 نمونه بهینه تعیین گردید. در جدول ۷ مشخصات نمونه بهینه مشخص شده است. نمونه بهینه معرفی شده با نمونه با شماره ۶ مطابقت دارد. مقاومت چسبندگی در نمونه با کد ۶ برابر ۴۶۰ lb/in^2 است که تقریباً با مقاومت چسبندگی پیش‌بینی شده برای نمونه بهینه برابر است. پوشش تولید شده و تعدادی پوشش سیاه سیلیکونی محصول شرکت‌های تولیدکننده پوشش‌های کنترل حرارتی در جدول ۸ نشان داده شده است. مقایسه نتایج جذب خورشیدی، نشر مادون قرمز پوشش تولید شده و تعدادی پوشش سیاه سیلیکونی نشان می‌دهد که پوشش‌های تهیه شده در این تحقیق دارای مقادیر جذب و نشر مشابه و در بعضی موارد بهتر از پوشش‌های سیاه کنترل حرارتی معمول می‌باشد.

جدول ۷. مشخصات نمونه بهینه نسبی تعیین شده توسط نرم‌افزار برای حداکثر مقاومت چسبندگی پوشش سیاه سیلیکونی.

عوامل	نماد	سطح	مشخصات سطح
وزن مولکولی پلیمر	A	۱	۱۸۰۰۰
آماده‌سازی زیرلایه	E	۱	آندازینگ
عوامل بهبوددهنده چسبندگی	F	۱	پاشش آستری
نتیجه S/N مورد انتظار برای مقدار بهینه		۵۳/۲۹۱	
نتیجه مورد انتظار برای مقدار بهینه		۴۶۱/۹۰۲	

ذکر شده برای آستری DW1200 در نمونه‌هایی که زیرلایه تحت فرایند آماده‌سازی آندازینگ قرار گرفته‌اند؛ به دلیل ایجاد عوامل هیدروکسیل بیشتر و توزیع و پراکندگی یکنواخت‌تر آن‌ها در سطح نمونه، موقعیت‌ها برای انجام واکنش بین عامل چسبندگی و زیرلایه بیشتر فراهم شده و چسبندگی در این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های مشابه افزایش یافته است. نتایج نشان می‌دهد، چسبندگی پوشش در مواردی که عامل سیلانی بر روی زیرلایه پاشش شده است، نسبت به نمونه‌های مشابه بیشتر است؛ که این امر می‌تواند به دلیل تماس با اتمسفر و جذب رطوبت بیشتر و در نتیجه هیدرولیز و پلیمریزاسیون بهتر عامل سیلانی باشد. نتایج جدول ANOVA نشان می‌دهد، اثر وزن مولکولی بر روی مقاومت چسبندگی کم است، با این وجود با توجه به شکل ۲ (ج) با افزایش وزن مولکولی پلیمر، چسبندگی پوشش به زیرلایه کاهش یافته است. نتایج سایر تحقیقات نیز نشان می‌دهد با افزایش وزن مولکولی پلیمر پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان، پیوستگی درون پلیمر افزایش و چسبندگی پلیمر به زیرلایه کاهش می‌یابد [۲۸]. بنابراین نتایج این تحقیق با نتایج سایر تحقیقات هم‌خوانی دارد.

جدول ۸. مقادیر α_s و ϵ برای پوشش سیاه سیلیکونی تولید شده و تعدادی پوشش سیاه سیلیکونی محصول شرکت‌های تولیدکننده

نام تجاری	شرکت سازنده	ترکیب شیمیایی پوشش	α_s	ϵ	α/ϵ	مرجع
پوشش تولید شده	-	-	۰/۹۵۵	۰/۹۲۰	۱/۰۳۸۰۴۳	-
PN	MAP	رزین سیلیکونی+کربن سیاه	۰/۹۵۰	۰/۹۰	۱/۰۵۵۵۵۶	[۲۹]
PNC	MAP	رزین سیلیکونی+کربن سیاه	۰/۹۸۰	۰/۹۱۰	۱/۰۷۶۹۲۳	[۲۹]
PNAS	MAP	رزین سیلیکونی+کربن سیاه	۰/۹۶۰	۰/۹۰	۱/۰۶۶۶۶۷	[۲۹]
PGN7991	-	رزین سیلیکونی+کربن سیاه	۰/۹۶۰	۰/۸۸۰	۱/۰۹۰۹۰۹۱	[۳۰]
PGN AS	-	رزین سیلیکونی+کربن سیاه	۰/۹۶۰	۰/۸۸۰	۱/۰۹۰۹۰۹۱	[۳۰]
S2	-	رزین سیلیکونی+کربن سیاه	۰/۹۶۰	۰/۸۹۰	۱/۰۷۸۶۵۲	[۳۰]

مختلف بر روی خواص نوری-حرارتی پوشش‌های کنترل حرارتی به صورت زیر است:

نوع رزین نسبت رنگدانه به رزین/نوع آماده سازی زیرلایه
نوع رنگدانه

۲- پوشش کنترل حرارتی سفید سیلیکات پتاسیم

نتایج مربوط به جذب خورشیدی و نشر گرمایی پوشش‌های تهیه شده در جدول ۹ آمده است. مقادیر در نظر گرفته شده برای معیار ارزیابی کلی (OEC) در جدول ۱۰ و پارامترهای حاصل از محاسبات انجام شده در جدول ۱۱ آورده شده‌اند. با توجه به نتایج به دست آمده از جدول ۱۱، تأثیر فاکتورهای

جدول ۹. مقادیر جذب خورشیدی و نشر گرمایی پوشش های سفید سیلیکاتی

شماره آزمایش	کد نمونه	نشر گرمایی (ε)	جذب خورشیدی (α _s)
۱	S1	۰/۹۰۶	۰/۲۴۳
۲	S2	۰/۹۰۵	۰/۲۱۰
۳	S3	۰/۹۰۷	۰/۲۳۰
۴	S4	۰/۸۸۳	۰/۲۹۸
۵	S5	۰/۸۷۰	۰/۲۹۶
۶	S6	۰/۸۷۴	۰/۲۷۰
۷	S7	۰/۹۱۰	۰/۲۶۰
۸	S8	۰/۹۱۷	۰/۲۷۳
۹	S9	۰/۹۱۴	۰/۲۶۸

جدول ۱۰. مقادیر در نظر گرفته شده برای معیار ارزیابی کلی (OEC) پوشش سفید

وزن	بدترین مقدار	بهترین مقدار	مشخصه کیفیت	پاسخ
۲۰	۰/۸۷۰	۰/۹۱۷	بیشتر - بهتر	ضریب نشر کلی
۸۰	۰/۲۹۸	۰/۲۱۰	کمتر - بهتر	ضریب جذب خورشیدی

جدول ۱۱. تحلیل واریانس (ANOVA) مربوط به اثر عوامل فرآیندی بر روی خواص نوری پوشش

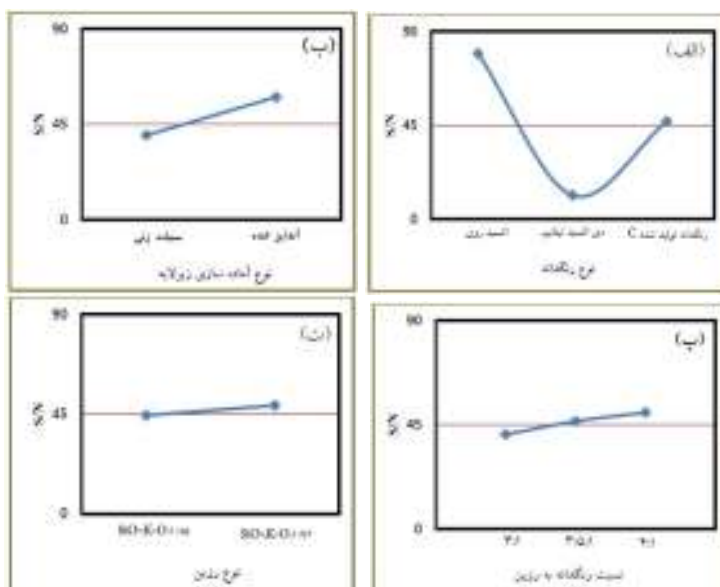
عامل	نشانه	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	نسبت F	درصد سهم
نوع رزین	A	۱	۳۹/۶۳۴	۳۹/۶۳۴	۲/۶۵۱	۰/۳۱۸
آماده سازی زیرلایه	B	۱	۶۵۱/۳۶۵	۶۵۱/۳۶۵	۴۳/۵۸۲	۸/۲۱۵
نوع رنگدانه	C	۲	۶۸۹۰/۲۶۷	۳۴۴۵/۱۳۳	۲۳۰/۵۱	۸۸/۵۶۱
نسبت رنگدانه به رزین	D	۲	۱۳۵/۳۱۱	۶۷/۶۵۵	۴/۵۲۶	۱/۳۶
خطا و سایر عوامل		۲	۲۹/۸۹	۱۴/۹۴۵		۱/۵۴۶
کل		۸	۷۷۴۶/۴۶۹			

در شکل ۳ نمودار تأثیر عوامل مختلف بر روی خواص نوری پوشش های کنترل حرارتی نشان داده شده است. با توجه به شکل ۳ (الف) نوع رنگدانه بیشترین تأثیر را بر خواص نوری پوشش های کنترل حرارتی دارد. با تغییر نوع رنگدانه از اکسید روی به دی اکسید تیتانیم، مقدار S/N کاهش می یابد. از آن جایی که وزن بالایی برای ضریب جذب خورشیدی در نظر گرفته شده، رفتار نمودار بیشتر تحت تأثیر ضریب جذب خورشیدی رنگدانه ها قرار دارد، و با تغییر نوع رنگدانه از اکسید روی به دی اکسید تیتانیم، به علت جذب بالاتر دی اکسید تیتانیم در محدوده طول موج مادون قرمز نزدیک، مقدار S/N کاهش یافته است. با تغییر نوع رنگدانه از دی اکسید تیتانیم به رنگدانه نوع C، نمودار افزایش یافته و جذب خورشیدی کاهش می یابد. رنگدانه اکسید روی

در شکل ۳ (ب) با تغییر نوع رنگدانه از اکسید روی به دی اکسید تیتانیم، مقدار S/N کاهش می یابد. از آن جایی که وزن بالایی برای ضریب جذب خورشیدی در نظر گرفته شده، رفتار نمودار بیشتر تحت تأثیر ضریب جذب خورشیدی رنگدانه ها قرار دارد، و با تغییر نوع رنگدانه از اکسید روی به دی اکسید تیتانیم، به علت جذب بالاتر دی اکسید تیتانیم در محدوده طول موج مادون قرمز نزدیک، مقدار S/N کاهش یافته است. با تغییر نوع رنگدانه از دی اکسید تیتانیم به رنگدانه نوع C، نمودار افزایش یافته و جذب خورشیدی کاهش می یابد. رنگدانه اکسید روی

(سطح ۱)، در واقع میزان جذب کمتری نسبت به دو رنگدانه دیگر ایجاد می کند. اکسید روی در تمام گستره طول موج، به استثنای محدوده طول موج فرابنفش؛ دارای جذب پایین تری نسبت به دو رنگدانه دیگر بوده و بازتاب بالاتری را سبب می شود. این نکته نشان می دهد که اکسید روی بهترین گزینه برای رنگدانه در پوشش های کنترل حرارتی است.

آماده سازی زیرلایه بر روی جذب خورشیدی پوشش تأثیر می گذارد [۲]. با توجه به شکل ۳ (ب)، نتایج نشان می دهد؛ زیرلایه های آندایز شده نسبت به زیرلایه سنباده زده شده دارای جذب خورشیدی پایین تری هستند. زیرلایه آندایز شده با داشتن لایه سطحی اکسید آلومینیوم، باعث بازتاب بیشتر نور شده و جذب خورشیدی را کاهش می دهد. از این رو، حتی در صورت عبور نور از لایه لای ذرات و رسیدن آن به



شکل ۳. نمودار تاثیر عوامل الف) نوع رنگدانه، ب) نوع آماده سازی زیرلایه، پ) نسبت رنگدانه به رزین و ت) نوع رزین بر روی خواص نوری پوشش سفید سیلیکاتی

است، می باشد. ارزیابی چسبندگی پوشش بهینه با روش کراس کات نشان داد میزان چسبندگی برابر 4B است. این میزان چسبندگی نشان دهنده آن است که با وجود بالا بودن نسبت رنگدانه به رزین این پوشش از چسبندگی مطلوبی برخوردار است.

نتیجه گیری

۱- بررسی چسبندگی پوشش های سیاه سیلیکونی تولید شده نشان داد، چسبندگی پوشش به تغییرات درصد رنگدانه، درصد شبکه ساز و کاتالیست وابستگی چندانی ندارد. در نمونه هایی که از پلیمر با وزن مولکولی کمتر استفاده شد، چسبندگی افزایش یافت. آماده سازی سطح و استفاده از عوامل بهبود دهنده چسبندگی بر روی مقاومت به چسبندگی این پوشش ها بیشترین تاثیرگذاری را داشت؛ به طوری که، آندایز زیرلایه ها و استفاده از آستری DW1200 بهترین چسبندگی را فراهم کرد.

۲- بررسی خواص نوری-حرارتی پوشش سیاه سیلیکونی بهینه شده نشان داد، این پوشش دارای ضریب جذب ۰/۹۵۵ و ضریب نشر ۰/۹۲۰ بوده و برای کاربرد در فضا مناسب است.

زیرلایه، از جذب آن جلوگیری می کند و باعث انعکاس آن می گردد. همانگونه که در شکل ۳ (ت) نشان داده شده، با افزایش نسبت رنگدانه به رزین، میزان جذب خورشیدی کاهش یافته است. با این حال این تغییرات کم است. با توجه به اینکه نسبت های رنگدانه به رزین انتخاب شده تمامی پوشش ها بالاتر از نسبت بحرانی است بنابراین حفرات هوا در تمامی پوشش ها وجود دارد. در نتیجه تغییر نسبت رنگدانه به رزین در این تحقیق تأثیر قابل ملاحظه ای بر روی ضریب جذب خورشیدی ندارد. با توجه به شکل ۳ (ت) نوع رزین، هیچ تأثیری بر خواص نوری ندارد. دلیل این امر می تواند یکسان بودن نوع رزین و در نتیجه ضریب شکست یکسان آن ها باشد. همچنین نسبت $SiO_2:K_2O$ رزین های فوق تفاوت قابل ملاحظه ای با یکدیگر ندارد بنابراین توانایی آن ها برای پذیرش رنگدانه یکسان است در نتیجه احتمال این که حد بحرانی نسبت های رنگدانه به رزین مربوط به آن ها متفاوت باشد، وجود ندارد.

با کمک نرم افزار Qualiteck4 نمونه بهینه تعیین گردید. نمونه بهینه، نمونه ای با رنگدانه اکسید روی، نسبت رنگدانه به رزین ۴:۱ و رزین نوع A_2 که بر روی زیرلایه آندایزشده اعمال شده

منابع

- 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*, Journal Of Materials Processing Technology, 200 (2008) 405-409.
- L. E. Long, *Thermal Control Coating*, U. S. Patent, No. 5589274, 1996.
- L. E. Long, *Radiator Using Thermal Control Coating*, U.S. Patent, No. 5884868, 1999.
- R. Cumberland, *Flexible Thermal Control Coatings and Methods for Fabricating the Same*, U.S. Patent, No. 2008/0045639 A1, 2008.
- H. Xiao, *Optical Degradation of Silicone in ZnO/Silicone White Paint Irradiated by < 200 keV Protons*, Journal of Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 266 (2008) 3375-3380.
- C. P. Torre, *Thermal Control Coatings and Method for Improving Atomic Oxygen Resistance*, U.N. Patent, No.4939031, 1990.
- M. B. Brown, *High Reflectance Paint for High Intensity Optical Applications*, U.S. Patent, No. 6974498 B2, 2005.
- J. G. Keller, *Thermal Control Coatings*, U. S. Patent, 0038454 A1, 2008.
- D. A. Jaworske, *Correlation of Predicted and Observed Optical Properties of Multilayer Thermal Control Coatings*, Journal of Thin Solid Films, 332 (1998) 30-33.
- T. Horie, *Thermal Control Coating Composition*, U. S. Patent, No. 4741778, 1988.
- S. Berman, *Spacecraft Materials Development Programs For Thermal Control Coatings And Space Environmental Testing*, Amptiac Quarterly, 8 (2004) 108-115.
- A. I. Davis, *Development Of Improved And Novel Thermal Control Coatings*, Air Force Research Laboratory, AFRL-ML-WP-TP-2007-484, 2007.
- J. B. Schutt, *Potassium Silicate- Zinc Coatings*, U. S. Patent, No. 3620784, 1971.
- Y. Harada and M. Deshpandee, *Requalification of White Thermal Control coatings*, IIT Research Institute, Chicago, 1994.
- B. A. Campbell and S.W. Mccandless, *Introduction of space sciences and spacecraft applications*, 1rd edition, Gulf Publishing Company Houston, Texas, 1996, 2-20.
- C. J. Savage, *Thermal control of spacecraft systems engineering*, 3rd edition, John Wiley & Son, New York, 2004.
- K. R. Uleck, P. J. Biermann, J. C. Roberts and B. M. Hilditch, *Spacecraft applications of advanced composite materials*, Handbook of Materials Selection, M. Kutz, John Wiley & Sons Inc., New York, 2002.
- ۳- در پوشش های سفید سیلیکاتی نوع رنگدانه مؤثرترین عامل بر خواص نوری است. اکسید روی دارای جذب خورشیدی پایین تر نسبت به سایر رنگدانه ها است. زیرلایه آندایز شده، در مقایسه با زیرلایه سنباده زده شده، خواص نوری بهتری را فراهم می کند و جذب خورشیدی پایین تری دارد. ترکیب رزین های سیلیکاتی (نسبت $\text{SiO}_2:\text{K}_2\text{O}$) تأثیری بر خواص نوری این پوشش ها ندارند. نسبت رنگدانه به رزین، در مقایسه با نوع رنگدانه، عامل مهمی نبوده و تأثیری بر خواص نوری ندارد.
- ۴- بررسی خواص نوری-حرارتی پوشش سفید سیلیکاتی بهینه شده نشان داد، این پوشش دارای ضریب جذب 0.23 ، ضریب نشر 0.907 و چسبندگی 4B بوده بنابراین برای کاربرد در فضا مناسب است.
- J. T. Sun, Y. D. Huang, H. L. Cao and G. F. Gong, *Effects of ambient-temperature curing agents on the thermal stability of poly(methylphenylsiloxane)*, Polymer Degradation and Stability, 85 (2004) 725-731.
- L. E. Long and M. R. Gallardo, *Electrically conductive black silicone paint having spacecraft application*, U. S. Patent, No. 5665274, 1997.
- L. E. Long and R.L. Reynolds, *Black thermal control film and thermally controlled microwave device containing porous carbon pigments*, U. S. Patent, No. 6139943, 2000.
- P. Jerschow, *Silicone elastomers*, Rapra review reports, Report 137, Volume 12, Number 5, 2001.
- Gelest, *Silane coupling agents: connecting across boundaries*, Gelest Inc, United States of America, <http://www.Gelest.com/literature.asp>, Last modified: 2011.
- H. Chen, J. Wang, Q. Huo, *Self-assembled monolayer of 3-amino propyl trimethoxy silane for improved adhesion between aluminum alloy substrate and polyurethane coating*, Thin Solid Films, 515 (2007) 7181-7189.
- ASTM D 1730-03, *Preparation of aluminum and aluminum alloy surface for painting*, ASTM International (2003).
- S. Velu, *Characterization of MCM-41 mesoporousmolecular Sieves containing copper and zinc and their Catalytic performance in the selective oxidation Of alcohols to aldehydes*, Microporous and Mesoporous Materials, 54 (2002) 113-126.

27. F. S. Pettit, *Surface engineering of aluminum and aluminum alloy*, ASM Handbook, Vol. 5, Surface engineering, The ASM Handbook Committee, ASM international, 9th edition, (1991) 62-122.
28. D. J. Kim, Y. J. Park, H. J. Park and B.W. Lee, *Mechanical properties of alkoxy type silicone sealants*, Journal of Industrial and Engineering Chemistry ., 8 (2002) 241-246.
29. Map Space, *Thermal control paints*, Map Company, France, <http://www.map-space.com/12-29343-Paints.php>, Last modified: 2011.
30. S. Remaury, J. C. Guillaumon and P. Nabarra, *Behaviour Thermal Control Coatings under Oxygen and Ultraviolet Radiation*, Protection of Materials and Structures from Space Environment, Vol. 5, J. I. Kleiman, Z. Iskanderova, Kluwer Academic Publishers, 1th edition, (2003), 193-201.