

ارزیابی خواص نوری رنگ‌های کنترل گرمایی سفید پایه سیلیکاتی به کار رفته در ماهواره با استفاده از روش تاگوچی

نرگس کیومرثی پور^۱، رضا شجاع رضوی^۲، کمال قانی^۲

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، اصفهان، ایران، صندوق پستی: ۸۳۱۴۵/۱۱۵
۲- استادیار، 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: ۹۰/۳/۲ تاریخ پذیرش: ۹۰/۹/۲ در دسترس به صورت الکترونیکی از: ۱۳۹۱/۹/۲۰

چکیده

رنگ‌های کنترل گرمایی، پوشش‌هایی با خواص نوری و گرمایی ویژه هستند که بر سطوح خارجی سامانه‌های فضایی به منظور کنترل ورود و خروج گرما اعمال می‌شوند. در تحقیق حاضر، به منظور تعیین تأثیر عوامل مختلف بر خواص رنگ‌های کنترل گرمایی؛ با استفاده از رنگ‌دانه‌های اکسید روی، دی‌اکسید تیتانیوم و رنگ‌دانه تولید شده و رزین سیلیکات پتاسیم با دو ترکیب مختلف، پوشش‌هایی تهیه شده و بر روی زیرآیندهای آلومینیومی اعمال شدند. زیرآیندها در دو حالت سنباده زده و آندایز شده و پوشش‌ها در سه نسبت مختلف رنگ‌دانه به رزین تهیه شدند. جهت انجام و طراحی آزمایش‌ها از روش تاگوچی با تعداد نه آزمون استفاده شد. نتایج اندازه‌گیری جذب خورشیدی و نشر گرمایی پوشش‌های تهیه شده نشان داد که نوع رنگ‌دانه بالاترین تأثیر را بر خواص این رنگ‌ها دارد. به گونه‌ای که با انتخاب رنگ‌دانه مناسب، می‌توان خواص مورد نیاز یک رنگ کنترل گرمایی را به دست آورد. نوع آماده‌سازی زیرآیند نیز دارای تأثیر قابل ملاحظه‌ای است. رنگ‌دانه اکسید روی از بازتاب بالاتری نسبت به دو رنگ‌دانه دیگر برخوردار بوده و زیرآیند آندایز شده نیز دارای جذب خورشیدی پایین‌تر است. ترکیب رزین، هیچ تأثیری بر خواص نداشته و تأثیر نسبت رنگ‌دانه به رزین نیز بسیار اندک است. بررسی ریخت‌شناسی نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی نشان داد که هر سه نوع رنگ‌دانه دارای ریخت‌شناسی مشابه بوده و به خوبی در رزین پراکنده شده‌اند. نمونه حاوی رنگ‌دانه اکسید روی و رزین با درصد جامد ۴۴،۲۵ درصد و نسبت SiO_2/K_2O برابر با ۱،۹۲۵ و نسبت رنگ‌دانه به رزین ۴:۱، که بر روی زیرآیند آندایز شده اعمال شده بود، به عنوان نمونه بهینه معرفی شد. واژه‌های کلیدی: رنگ کنترل گرمایی، خواص نوری، رنگ‌دانه، روش تاگوچی.

Evaluation of Optical Properties of Silicate White Thermal Control Paints Employed in Spacecraft by Taguchi Method

N. Kiomarsipour¹, R. Sh. Razavi¹, K. Ghani²

¹ Department of Materials Engineering, Maleke-ashtar University of Technology, P.O.Box: 83145-115, Shahin shahr, Isfahan, Iran.

² Department of Chemistry, Malek Ashtar University of Technology, P.O.Box: 83145-115, Shahin shahr, Isfahan, Iran.

Received: 23-05-2011

Accepted: 23-11-2011

Available online: 10-12-2012

Abstract

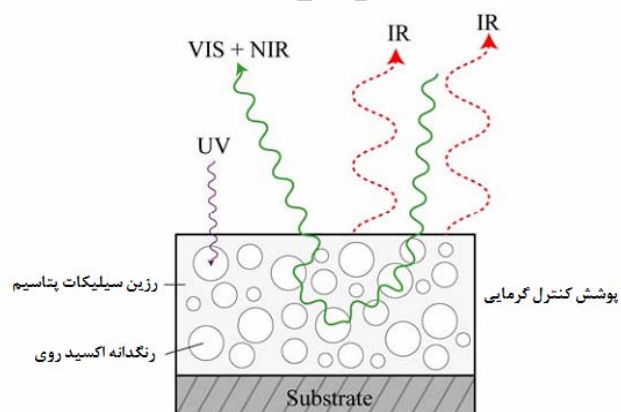
Thermal control paints are coatings with special thermo-optical properties that carried out on the outer surface of spacecraft to control the input and output heat. In the present study, to evaluate the effects of different factors on these coatings, ZnO, TiO₂ and synthesized pigments and two different compositions of potassium silicate binder with three pigment to binder ratios were used to produce different coatings. The fabricated coatings were applied on the grounded and anodized Al substrates. The design of experiment was performed by Taguchi method including nine experiments. The results of solar absorption and thermal emission indicated that the pigment type was the most important processing parameter and the type of substrate preparation had also a significant effect. In fact, the ZnO pigment had the higher thermal emission and the anodized substrate had the lower solar absorption. The binder composition and pigment to binder ratio had no significant effects on thermo-optical properties. The morphological analyses were carried out by FE-SEM, indicated that all pigments had the similar morphologies and suitable distribution in applied coatings. It can be concluded from the obtained results that the sample consisted of ZnO pigment, the resin with 44.25 solid percentage and SiO₂/K₂O equal to 1.925, pigment to resin ratio of 4:1 and anodized substrate, can be considered as an optimum specimen. *J. Color Sci. Tech.* 6(2012), 197-207 © Institute for Color Science and Technology.

Keywords: Thermal control paint, Optical properties, Pigment, Taguchi method.

۱- مقدمه

و نشر گرمایی ۰٫۹۰ بوده و قابلیت حفاظت از سامانه در برابر تمام عوامل مخرب بیرونی را داراست [۱۵]. در تحقیق حاضر سعی شد رنگ کنترل گرمایی Z-93 تهیه شود و خصوصیات آن با سایر رنگ‌های در بر دارنده دیگر رنگ‌دانه‌ها و نسبت‌های رنگ‌دانه به رزین، مقایسه شود و در پایان تأثیر عوامل مختلف بر خواص این قبیل رنگ‌ها و اهمیت هر یک از آنها بررسی شود. در شکل ۱ تصویری از یک پوشش کنترل گرمایی دارای رنگ‌دانه اکسید روی و رزین سیلیکات پتاسیم نشان داده شده است. همان طور که در شکل دیده می‌شود، این رنگ قادر است تمام تابش مرئی و زیر قرمز نزدیک را بازتاب نماید؛ ولی در طول موج فرابنفش، به دلیل قرار گرفتن نوار جذبی اکسید روی و اکثر اکسیدهای فلزی سفید، جذب قوی دارد [۱۸]. اکسید روی یک ماده نیمه هادی دارای شکاف نوار وسیع (۳٫۳۷eV) در دمای اتاق است. مقدار انرژی این شکاف نوار (انرژی مورد نیاز برای این که الکترون‌ها بتوانند از لایه ظرفیت به لایه هدایت بروند) دقیقاً با انرژی طول موج تابش فرابنفش (<۳۶۶nm) برابر است از همین روی این ماده و همچنین دی‌اکسید تیتانیم تمایل به جذب تقریباً کامل تابش فرابنفش دارند. اکسید روی در ناحیه زیر قرمز نزدیک بازتاب بسیار بالایی دارد [۶].

در تحقیق حاضر سعی شد با استفاده از روش تاگوچی [۱۹]، میزان تأثیر عوامل مختلف بر جذب خورشیدی و نشر گرمایی رنگ‌های کنترل گرمایی سفید تعیین شود و در نهایت با توجه به داده‌های موجود، رنگ دارای خواص بهینه تعیین شود. با استفاده از سه نوع رنگ‌دانه اکسید روی، دی اکسید تیتانیم و یک رنگ‌دانه تولید شده و رزین سیلیکات پتاسیم با دو ترکیب متفاوت، پوشش‌هایی تهیه شده و بر روی زیرآیندهای آلومینیومی سنباده زده شده و آندایز شده اعمال شدند. پس از وارد کردن تعداد مشخصه‌ها و سطوح در نظر گرفته شده برای هر یک از آنها، نرم‌افزار Qualitek4؛ آرایه متعامد L9، به معنی انجام ۹ آزمایش را ارائه کرد و در نهایت با استفاده از تحلیل‌های آماری، تأثیر هر یک از عوامل مؤثر، بررسی و ترکیب رنگ بهینه تعیین شد.



شکل ۱: مقطع عرضی یک پوشش کنترل گرمایی [۱۸].

شرایط بسیار مخرب موجود در فضا، باعث کاهش کارایی و انهدام سامانه‌های فضایی شده و از این رو محافظت از این سیستم‌ها پس از استقرار در مدار مربوطه و در حین انجام مأموریت، یکی از بزرگ‌ترین دغدغه‌های طراحان فضاپیما است [۵-۱]. یک سیستم فضایی در طول مدت زمان انجام مأموریت در معرض خطرات ناشی از تابش فرابنفش خورشیدی، میکروشهاب سنگ‌ها، اکسیژن اتمی، تابش ذرات باردار و خطر تبخیر سطحی ناشی از خلأ موجود در فضا قرار دارد که تمامی این مسائل باعث کاهش بازده و در نهایت عمر سازه می‌شوند [۸-۶]. مهم‌ترین مسأله‌ای که یک سازه فضایی در مدار با آن مواجه می‌شود، تغییرات شدید دمایی به واسطه تغییر موقعیت سامانه نسبت به خورشید است. سمتی از ماهواره که به طرف خورشید است به واسطه جذب مستقیم تابش خورشیدی گرم می‌شود و این در حالی است که سمت دیگر که به طرف فضای خالی است در حال نشر گرما است. این تفاوت در موقعیت می‌تواند باعث ایجاد اختلاف دمایی تا حدود 400°C میان قسمت‌های مختلف سیستم گردد که در نهایت سبب تغییر شکل و از کار افتادن سامانه می‌شود. به منظور حفاظت از سیستم در برابر این تغییرات شدید دمایی و همچنین شرایط سخت مواجه شده در فضا، استفاده از رنگ‌های کنترل گرمایی، اجتناب‌ناپذیر است [۱۵-۹]. رنگ‌های کنترل گرمایی، با داشتن خواص نوری و گرمایی خاص، گرمای ورودی به سامانه را کنترل کرده و دمای سیستم را همواره در محدوده مناسب ($0-100^{\circ}\text{C}$) حفظ می‌کنند. این رنگ‌ها با داشتن ضریب جذب خورشیدی (α) پایین، از جذب تابش خورشیدی جلوگیری کرده و با داشتن نشر گرمایی (ϵ) بالا، سبب کاهش دمای سیستم می‌شوند. رنگ‌های کنترل گرمایی سفید، با بازتاب نمودن نور برخوردی خورشید، از جذب و گرم شدن سامانه در اثر جذب این تابش جلوگیری می‌کنند. از طرف دیگر در پوشش‌های فوق، از رنگ‌دانه‌ها و رزین‌های خاص که دارای مقاومت کافی در برابر محیط فضا باشند، استفاده می‌شود [۱۶]. نور پس از برخورد به سطح فیلم، در اثر برخورد با ذرات رنگ‌دانه انتشار یافته^۱ و به عقب بر می‌گردد. هر چه غلظت رنگ‌دانه در پوشش بیشتر باشد؛ احتمال عبور نور از ضخامت فیلم و رسیدن به سطح زیرآیند کاهش می‌یابد [۱۷]. رنگ کنترل گرمایی سفید، حاوی رنگ‌دانه اکسید روی در رزین سیلیکات پتاسیم با نام تجاری Z-93، در دهه ۱۹۶۰ میلادی به عنوان اولین رنگ کنترل گرمایی، تهیه و مورد استفاده قرار گرفت و از آن زمان تاکنون، مطالعات گسترده‌ای بر روی آن انجام گرفته است. این رنگ در نسبت رنگ‌دانه به رزین ۴/۳:۱، دارای جذب خورشیدی ۰٫۱۵

۱- انتشار نور (Scattering) مجموعه‌ای از پدیده‌های diffraction، refraction و reflection است که در هنگام برخورد نور به رنگ‌دانه سبب بازگشت آن به عقب می‌شود.

است. از آن جایی که رنگ تهیه شده با استفاده از این ماده دارای جذب بالایی در ناحیه زیر قرمز نزدیک بود و این مسأله در رنگ‌های کنترل گرمایی نامطلوب است، برای بهبود قابلیت بازتاب در این ناحیه، از نمک روی اضافی در حین ساخت استفاده شد که باعث افزایش میزان اکسید روی در ساختار MCM-41 و کاهش جذب خورشیدی در ناحیه زیر قرمز نزدیک گردید و در نهایت به عنوان رنگ‌دانه نوع C معرفی شد. به منظور تهیه رنگ‌دانه نوع C، در مرحله اول، ۵۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر و ۴۷۵ میلی‌لیتر اتانول را در ظرف آزمایش ریخته و در حالی که محلول توسط هم‌زن مغناطیسی به هم می‌خورد ۱۳ گرم ستیل‌تری‌متیل‌آمونیم به آن اضافه شد. ۰٫۳ گرم نمک استات روی را در ۸۵ میلی‌لیتر محلول آبی آمونیاک ۲۸ درصد حل کرده و به محلول قبلی اضافه گردید. در مرحله دوم، ۳۶ میلی‌لیتر تترا اتیل اورتوسیلیکات را به تدریج و آرام آرام به محلول اضافه و اجازه داده شد تا به مدت دو ساعت در دمای اتاق هم بخورد. پس از دو ساعت، مخلوط سفید رنگ حاصل صاف شد و پس از خشک شدن در گرم‌خانه با دمای ۷۵ °C، به مدت هشت ساعت در دمای ۵۴۰ °C کلسینه شد. پودر سفید به دست آمده MCM-41 نام دارد [۲۰]. به منظور افزایش غلظت اکسید روی در این ماده، یک عملیات اضافی بر روی آن صورت گرفت. برای این کار، ابتدا ۸۴٫۳۴ گرم پودر MCM-41 را در ۸۴۳٫۴ میلی‌لیتر آب مقطر معلق ساخته و سپس در حالی که مخلوط توسط هم‌زن مغناطیسی به هم می‌خورد، ۱۱۳٫۷ گرم استات روی حل شده در ۷۳۳٫۸ میلی‌لیتر آب مقطر به آن اضافه شد. در صورت تغییر pH مخلوط از مقدار هفت، اکسید روی به دلیل داشتن خاصیت آمفوتریک حل خواهد شد، بنابراین به منظور ثابت نگه‌داشتن pH مخلوط در هفت، از آمونیاک رقیق شده استفاده شد. پس از تنظیم pH، مخلوط حاصل به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط هم زده شده و سپس صاف، در دمای ۷۵ °C خشک و در دمای ۳۰۰ °C به مدت هشت ساعت کلسینه شد. از پودر حاصل به عنوان رنگ‌دانه نوع C در طراحی آزمایش به روش تاگوچی استفاده شد.

به منظور ساخت رنگ‌هایی با نسبت‌های مختلف رنگ‌دانه به رزین، با توجه به درصد جامد رزین، پودر رنگ‌دانه و رزین سیلیکات پتاسیم با یکدیگر مخلوط شده و به مدت سه ساعت تا رسیدن به دانه‌بندی مناسب (دستیابی به عدد هگمان^۱ هفت در ارزیابی توسط دستگاه گریندومتر^۲) مخلوط شدند. رنگ‌های تولید شده بر روی زیرآیندهای آلومینیومی پاشیده^۳ شدند. فشار مورد استفاده برای پاشش، ۳-۴ بار و فاصله از سطح زیرآیند ۲۰-۱۵ سانتی‌متر انتخاب شد. قبل از پاشش برای آماده‌سازی زیرآیندها؛ از دو روش سنباده‌زنی معمولی و آندایز،

- 1- Hegman grind
- 2- Grinodometer
- 3- Spray

در این تحقیق از روش تاگوچی در طراحی آزمایش‌ها به منظور بررسی تأثیر عوامل مختلف بر خواص رنگ‌های کنترل گرمایی استفاده شد که در جهان تاکنون انجام نگرفته است. تولید رنگ بر پایه رزین‌های سیلیکاتی اولین بار است که در ایران انجام شده و استفاده از این رنگ به منظور کنترل گرمای ورودی به ماهواره تاکنون در کشور انجام نشده است. تولید رنگ با خواص نوری - گرمایی ویژه جهت استفاده در ماهواره، ضمن بومی نمودن فناوری تولید این قبیل پوشش‌ها در داخل و خارج نمودن آن از انحصار چندین کشور خاص، کشور را از واردات و وابستگی به سایرین بی‌نیاز می‌سازد.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد

مشخصات رنگ‌دانه‌های اکسید روی و دی‌اکسید تیتانیم روتایل در جدول ۱ و مشخصات رزین‌های سیلیکات پتاسیم استفاده شده، در جدول ۲ نشان داده شده است. تمام مواد مورد استفاده جهت تولید این رنگ‌دانه، خالص بوده و از شرکت مرک تهیه شدند.

جدول ۱: مشخصات رنگ‌دانه‌های اکسید روی و دی‌اکسید تیتانیم روتایل.

اندازه ذره‌ای	غلظت (%W/W)	ترکیب
۰٫۶-۲٫۰ μm	۹۹٫۴۲	ZnO
۰٫۱۸ μm	≥۹۴٪	Rutile TiO ₂

جدول ۲: مشخصات محلول‌های سیلیکات پتاسیم.

کد نمونه	ترکیب	SiO ₂	K ₂ O	محتوای جامد	SiO ₂ :K ₂ O
A1	غلظت (%W/W)	۶۰٫۲۶	۳۲٫۴۵	٪۳۱٫۷۴	۱٫۸۵۷
A2	غلظت (%W/W)	۵۸٫۳۰	۳۰٫۲۸	٪۴۴٫۲۵	۱٫۹۲۵

۲-۲- روش کار

در این تحقیق، علاوه بر ساخت رنگ دارای رنگ‌دانه اکسید روی (مشابه با رنگ Z-93 اصلی)، معرفی رنگ‌دانه‌ای که به بتوان از آن به جای اکسید روی استفاده کرد نیز مد نظر قرار گرفت. به همین علت ماده بسیار سفید و دارای ماهیت معدنی MCM-41 استفاده شد. ماده MCM-41 به عنوان میزبان برای بیشتر فلزات در کاربردهای کاتالیزوری استفاده می‌شود ولی تاکنون از آن به عنوان رنگ‌دانه استفاده نشده

نتایج جذب خورشیدی به دست آمده، محدوده مطلوب نسبت رنگدانه به رزین جهت انجام طراحی آزمایش به روش تاگوچی مشخص شد. تنها با استفاده از نسبت‌های مختلف رنگدانه به رزین، محدوده مناسب آنها تعیین شد. مقادیر انتخاب شده جهت انجام طراحی آزمایش‌ها و مبنای انتخاب آنها در جدول‌های ۴ و ۵ آورده شده است. مبنای انتخاب نوع رنگدانه‌ها، مقالات بررسی شده و ماهیت معدنی آنها که از مقاومت کافی در برابر محیط فضا برخوردار هستند، بوده است. انتخاب رزین، با توجه به محدودیت شدید ماده، دو ترکیب سیلیکات پتاسیم در نظر گرفته شد و از آن جایی که با بیشتر شدن نسبت سیلیکا به قلیا، قابلیت پذیرش رنگدانه افزایش می‌یابد، این دو نسبت متفاوت انتخاب شدند. مبنای انتخاب زیرآیند نیز با توجه به مراجع انتخاب شد. در جدول ۶ طراحی آزمایش به دست آمده از نرم‌افزار Qualitek 4 نشان داده شده است. پس از تهیه پوشش‌ها مطابق با این جدول، ضریب جذب خورشیدی رنگ‌ها با استفاده از دستگاه طیف‌سنج بازتابی^۱ مدل LPSR300 و نشر گرمایی توسط دستگاه TEMP 2000A ساخت شرکت AZ تکنولوژی اندازه‌گیری شدند. به منظور بررسی ریخت‌شناسی سطح نمونه‌های رنگ از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی^۲ مدل S4160 ساخت شرکت هیتاچی ژاپن، با ولتاژ ۱۵ کیلو ولت و پرتو الکترون ثانویه استفاده شد.

- 1- Spectroreflectometer
2- FE SEM

استفاده شد. از آن جایی که اکثر زیرآیندها آغشته به مواد روغنی هستند، آنها را به مدت ۳۰ ثانیه در محلول سود ۰٫۱ نرمال فرو برده و سپس با آب مقطر به خوبی شستشو داده شدند. سپس زیرآیندها ابتدا با سنباده‌های شماره ۴۰۰ و ۱۲۰۰ سنباده زده شده و در پایان با استون خالص شستشو شدند. آندایزینگ زیرآیندهای آندایز شده مطابق با استاندارد MIL-A-8625F انجام شد. در این روش، زیرآیندها در حمام اسید سولفوریک آندایز شدند. پس از اعمال، نمونه‌ها در رطوبت ۴۵-۶۵ درصد به مدت هفت روز قرار داده شدند تا پخت شوند. قبل از انجام طراحی آزمایش، لازم است محدوده مناسب رنگدانه به رزین مشخص شود (محدوده‌ای که در آن جذب خورشیدی زیر ۰٫۳ و نشر گرمایی بالای ۰٫۸۰ است). به این منظور، آزمون غربال‌گری با استفاده از رنگدانه اکسید روی و رزین سیلیکات پتاسیم نوع A1 (رزین با نسبت $\text{SiO}_2:\text{K}_2\text{O}$ برابر با ۱٫۸۵۷) انجام شد و نمونه‌های رنگ با نسبت‌های رنگدانه به رزین ۱/۵:۱ تا ۴:۱ تهیه شده و خواص نوری و گرمایی آنها مورد ارزیابی قرار گرفت. در جدول ۳، ترکیب شیمیایی نمونه‌های رنگ تهیه شده به منظور آزمون غربال‌گری نشان داده شده است. نمونه‌های رنگ با توجه به جدول ۳ تهیه شده و آنگاه خواص نوری (میزان جذب خورشیدی آنها) اندازه‌گیری شد. از آن جایی که در مورد رنگ‌های کنترل گرمایی، نشر گرمایی همواره در محدوده مناسب قرار دارد (بالای ۰٫۸۰) [۱۶] و میزان چسبندگی نیز قابل قبول است [۲۱]؛ معیار پذیرش بر مبنای میزان جذب خورشیدی قرار گرفت. بدین معنی که فقط نسبت‌های رنگدانه به رزین دارای جذب خورشیدی زیر ۰٫۳ انتخاب شدند. به عبارت دیگر، با توجه به

جدول ۳: ترکیب شیمیایی نمونه‌های رنگ نوع Z مربوط به آزمون غربال‌گری.

نام نمونه	نسبت رنگدانه به رزین	اکسید روی (g)	سیلیکات پتاسیم (g)	آب مقطر (g)	PVC* %
Z1	۱٫۵:۱	۳۰	۶۳٫۰۱	۷	۳۹٫۱
Z2	۲:۱	۳۰	۴۷٫۲۵	۹	۴۶٫۱۲
Z3	۲٫۵:۱	۳۵	۴۴٫۱۱	۱۳٫۶۳	۵۱٫۷۳
Z4	۳:۱	۳۰	۳۱٫۵	۱۵	۵۶٫۳
Z5	۳٫۵:۱	۳۵	۳۱٫۵	۱۸	۶۰
Z6	۴:۱	۳۰	۲۳٫۶۳	۲۰	۶۳٫۱۲

*Pigment Volume Concentration

جدول ۴: نوع عامل و مبنای انتخاب آنها.

مراجع	توضیحات	نوع عامل
[۱۳، ۱۵، ۱۶]	نوع رنگ‌دانه با توجه به ضریب شکست و اختلاف آن با ضریب شکست رزین، بر میزان پراکنش نور از سطح رنگ و مقاومت در برابر فرابنفش تأثیر دارد.	۱ نوع رنگ‌دانه
[۱۶، ۱۷]	نسبت رنگ‌دانه به رزین از عوامل بسیار تأثیر گذار بر میزان پراکنش نور از سطح رنگ و کاهش میزان ضریب جذب پوشش است.	۲ نسبت رنگ‌دانه به رزین
[۱۸]	رزین با داشتن نسبت $SiO_2:K_2O$ متفاوت دارای قابلیت متفاوت برای پذیرش رنگ‌دانه است به صورتی که هر چه این مقدار بالاتر باشد حد پذیرش رنگ‌دانه نیز بالاتر است.	۳ ترکیب رزین
[۲۲، ۲۳]	با توجه به اینکه رنگ‌های سیلیکاتی غیرقابل انعطاف هستند، نوع آماده‌سازی زیرآیند بر چسبندگی و مقاومت در برابر سیکل حرارتی مؤثر است.	۴ نوع آماده‌سازی سطح

جدول ۵: سطوح انتخاب شده برای عوامل مختلف.

نوع عوامل	نماد	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
ترکیب رزین	A	$1,85SiO_2:K_2O$: درصد جامد: ۳۱,۷۴٪	$1,92SiO_2:K_2O$: درصد جامد: ۴۴,۲۵٪	-
نوع آماده‌سازی زیرآیند	B	سنباده‌زنی	آندایز شده	-
نوع رنگ‌دانه	C	اکسید روی	دی‌اکسید تیتانیم	تولید شده
نسبت رنگ‌دانه به رزین	D	۳:۱	۳,۵:۱	۴:۱

جدول ۶: جدول طراحی آزمایش‌ها 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

۳- نتایج و بحث

ذرات رنگ‌دانه است [۱۲]. نشر گرمایی نمونه‌ها، با افزایش نسبت رنگ‌دانه به رزین، افزایش می‌یابد.

در نهایت با توجه به نتایج به دست آمده، محدوده مناسب نسبت رنگ‌دانه به رزین، نسبت بین ۳:۱ تا ۴:۱ در نظر گرفته شد. نتایج به دست آمده از نمونه‌های رنگ ساخته شده مطابق با جدول ۶ در جدول ۸ نشان داده شده است.

با استفاده از نرم‌افزار 4 Qualitek، تحلیل نتایج مربوط به آزمایش‌های انجام شده مطابق با طراحی تاگوچی، انجام شد. مقادیر در نظر گرفته شده برای معیار ارزیابی کلی (OEC) در جدول ۹ و عوامل حاصل از محاسبات انجام شده در جدول ۱۰ آورده شده است.

نسبت F یا F ratio در جدول ۱۰، از نظر ریاضی برابر است با نسبت واریانس عامل مورد نظر به واریانس خطا. به عبارت دیگر این مقدار بیان می‌کند که از میزان تغییرات مشاهده شده در یک نتیجه به دست آمده، چه مقدار مربوط به تغییرات عامل مورد نظر و چه مقدار ناشی از وجود خطا در آزمایش بوده است و بزرگی تأثیر عامل مورد نظر را نسبت به خطا نشان می‌دهد [۱۹].

در شکل ۲ نمودار تأثیر عوامل مختلف بر روی خواص نوری رنگ‌های کنترل گرمایی نشان داده شده است.

پس از اتمام فرآیند پخت، جذب خورشیدی و نشر گرمایی پوشش‌های تهیه شده اندازه‌گیری شد. در جدول ۷ نتایج به دست آمده از آزمون غربال‌گری نشان داده شده است. همان گونه که در جدول ۷ مشاهده می‌شود ضریب جذب خورشیدی با افزایش نسبت رنگ‌دانه به رزین، به تدریج کاهش می‌یابد تا جایی که نسبت رنگ‌دانه به رزین به بالای نسبت ۲،۵:۱ می‌رسد. با استفاده از آزمون چسبندگی؛ غلظت حجمی بحرانی رنگ‌دانه برابر با ۵۱،۷۳ درصد (نسبت رنگ‌دانه به رزین ۲/۵:۱) اندازه‌گیری شد که در این نسبت میزان چسبندگی پوشش به سطح زیرآیند به دلیل حضور حفرات هوا از 5B به 3B؛ کاهش یافت که توسط نتایج جذب خورشیدی نیز حضور حفرات هوا در فیلم رنگ اثبات گردید. به منظور محاسبه غلظت حجمی رنگ‌دانه از رابطه ۱ استفاده شد.

$$(1) \quad PVC = 100 \times (\text{حجم رنگ‌دانه} + \text{حجم رزین} / \text{حجم رنگ‌دانه})$$

پس از نسبت ۲،۵:۱، کاهش ناگهانی در ضریب جذب مشاهده می‌شود. کاهش مشاهده شده در جذب نشان‌دهنده ورود حفرات هوا در داخل ساختار رنگ و کافی نبودن رزین برای پرکردن فواصل میان

جدول ۷: نتایج آزمون‌های جذب خورشیدی و نشر گرمایی نمونه‌های رنگ نوع Z آزمون غربال‌گری.

نام نمونه	نسبت رنگ‌دانه به رزین	PVC %	آزمون چسبندگی	نشر گرمایی (ε)	جذب خورشیدی (α _s)
Z1	۱،۵:۱	۳۹،۱	5B	۰،۸۱۹	۰،۴۲۱
Z2	۲:۱	۴۶،۱۲	5B	۰،۸۹۲	۰،۳۴۴
Z3	۲،۵:۱	۵۱،۷۳	5B	۰،۸۹۴	۰،۳۲۶
Z4	۳:۱	۵۶،۳	3B	۰،۹۰۶	۰،۲۴۳
Z5	۳،۵:۱	۶۰	3B	۰،۹۰۷	۰،۲۳۶
Z6	۴:۱	۶۳،۱۲	3B	۰،۹۰۷	۰،۲۳۰

جدول ۸: مقادیر جذب خورشیدی و نشر گرمایی پوشش‌های معرفی شده در طراحی آزمایش تاگوچی.

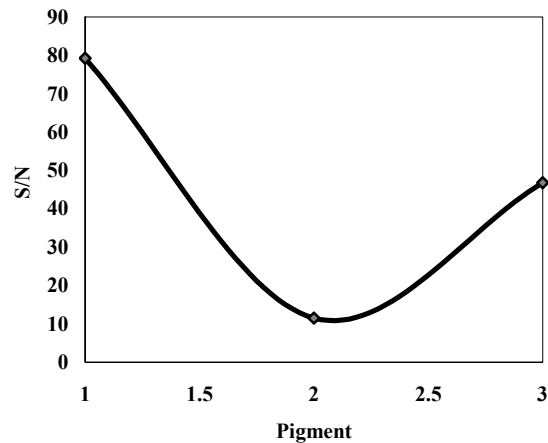
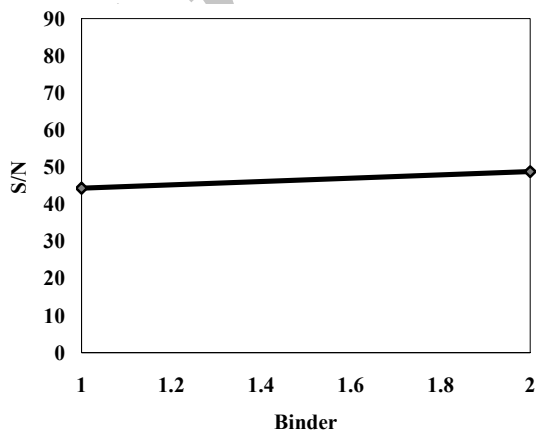
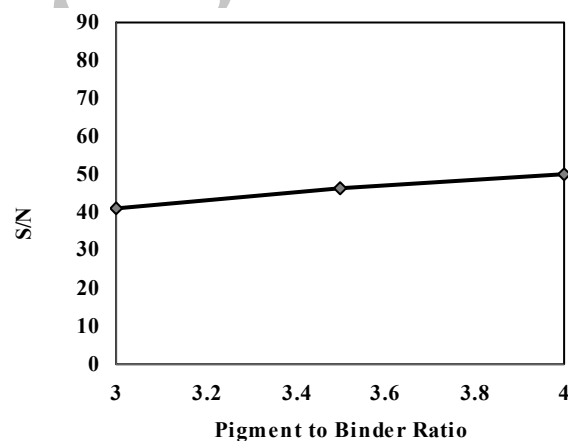
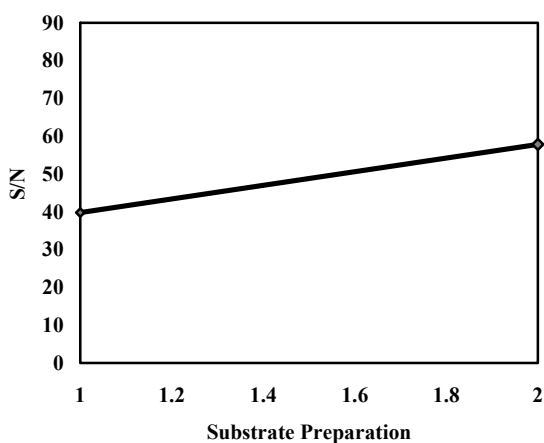
شماره آزمایش	کد نمونه	نشر گرمایی (ε)	جذب خورشیدی (α _s)
۱	S1	۰،۹۰۶	۰،۲۴۳
۲	S2	۰،۹۰۵	۰،۲۱۰
۳	S3	۰،۹۰۷	۰،۲۳۰
۴	S4	۰،۸۸۳	۰،۲۹۸
۵	S5	۰،۸۷۰	۰،۲۹۶
۶	S6	۰،۸۷۴	۰،۲۷۰
۷	S7	۰،۹۱۰	۰،۲۶۰
۸	S8	۰،۹۱۷	۰،۲۷۳
۹	S9	۰،۹۱۴	۰،۲۶۸

جدول ۹: مقادیر در نظر گرفته شده برای معیار ارزیابی کلی (OEC).

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

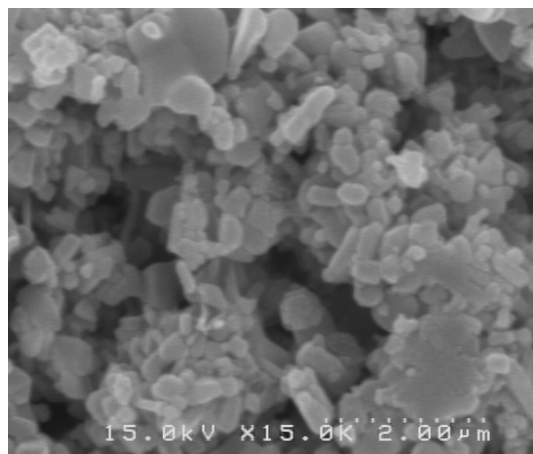
جدول ۱۰: تحلیل واریانس (ANOVA) مربوط به اثر عوامل فرآیندی بر روی خواص نوری پوشش.

عامل	نشانه	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	نسبت F	درصد سهم
ترکیب رزین	A	۱	۳۹,۶۳۴	۳۹,۶۳۴	۲,۶۵۱	۰,۳۱۸
آماده سازی زیرآپند	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			

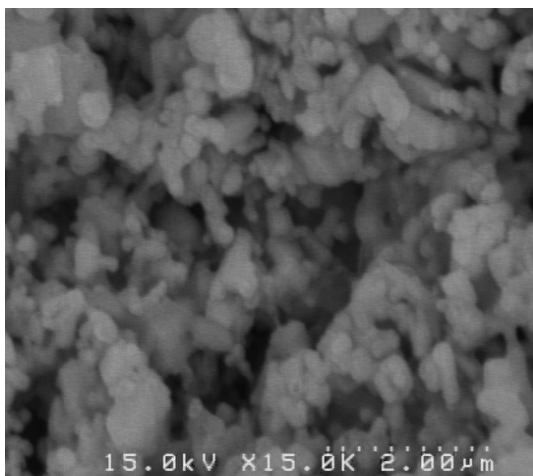


شکل ۲: نمودار تأثیر عوامل مختلف بر روی خواص نوری رنگ‌های کنترل گرمایی.

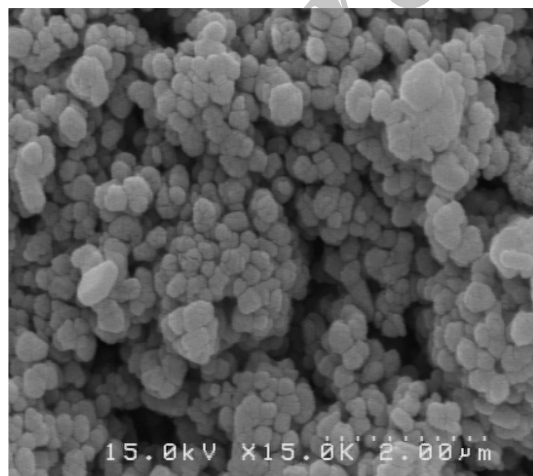
استفاده قرار می‌گیرد. این نسبت با تبدیل تکرار داده‌ها به یک مقدار واحد، اندازه تغییر را مشخص می‌سازد. در تحقیق حاضر، خواص نوری و گرمایی نمونه‌های رنگ به عنوان پاسخ در محاسبات در نظر گرفته شده‌اند.



الف



ب



ج

شکل ۳: تصاویر FESEM سطح رنگ الف: S2، ب: S5، ج: S8.

با توجه به نتایج به دست آمده از جدول ۹ و شکل ۲، تأثیر عوامل مختلف بر روی خواص نوری رنگ‌های کنترل گرمایی را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

ترکیب رزین > نسبت رنگ‌دانه به رزین > نوع آماده‌سازی زیرآیند > نوع رنگ‌دانه در شکل ۳ تصاویر FESEM از سطح رنگ‌های S2، S5 و S8 نشان داده شده است. در این تصاویر نقاط سفید، ذرات رنگ‌دانه بوده و جاهای خالی نشان دهنده رزین سیلیکات پتاسیم است. این تصاویر نشان می‌دهند که این سه نوع رنگ‌دانه از شکل و اندازه ذره‌ای کم و بیش مشابهی برخوردار هستند و از این روی جذب خورشیدی و نشر گرمایی به دست آمده مستقل از شکل، سطح ویژه و زبری سطح رنگ‌دانه شرکت‌کننده در بازتاب نور است و شکل رنگ‌دانه‌ها تأثیری بر خواص نوری و گرمایی پوشش‌ها ندارد. به عبارت دیگر جذب خورشیدی و نشر گرمایی رنگ‌های کنترل گرمایی تحت تأثیر مستقیم نوع رنگ‌دانه و ساختار شیمیایی آن است. از طرف دیگر، تصاویر FESEM نشان می‌دهند که پراکندگی مناسب ذرات رنگ‌دانه وجود دارد و هیچ انباشتی در ذرات دیده نمی‌شود و از آن جایی که ذرات انباشته باعث افزایش جذب خورشیدی می‌شوند، مدت زمان مورد استفاده برای ساخت رنگ کافی بوده است.

۳-۱- اثر نوع رنگ‌دانه

طبق نتایج به دست آمده از تحلیل نرم‌افزار 4 Qualitek، نوع رنگ‌دانه بیشترین تأثیر را بر خواص نوری رنگ‌های کنترل گرمایی دارد. از آن جایی که مؤثرترین جزء در بازتاب و پراکنش نور در یک پوشش، رنگ‌دانه است، لذا تأثیر سایر عوامل قابل چشم‌پوشی است. رنگ‌دانه با ایجاد پراکنش در پرتو نور برخوردی به سطح پوشش، مسیر نور را تغییر داده و از جذب آن جلوگیری می‌کند. عملی که سایر عوامل توانایی انجام آن را ندارند. نوع رنگ‌دانه، از نظر داشتن خواص نوری خاص در تمام گستره طول موج، مانند ضریب شکست و همچنین اندازه ذره‌ای، جذب خورشیدی را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. نوع رنگ‌دانه با داشتن ضریب شکست بالا و قابلیت انعکاس نور و همچنین مقاومت در برابر شرایط سخت مواجه شده در فضا، از اهمیت زیادی برخوردار است [۱۵]. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان دریافت که در فرمولاسیون رنگ‌های کنترل گرمایی با تمرکز و دقت در انتخاب رنگ‌دانه، می‌توان خواص مورد نظر را به دست آورد. همان طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، با تغییر نوع رنگ‌دانه از اکسید روی به دی‌اکسید تیتانیوم، نمودار سیگنال به نویز (S/N) بر حسب نوع رنگ‌دانه با کاهش مواجه می‌شود. در روش تاگوچی، نسبت S/N به عنوان پاسخ تبدیل شده به منظور تعیین بزرگی تغییرات پاسخ (به واسطه تغییر عوامل قابل کنترل) نسبت به بزرگی خطا مورد

1- Signal-to-noise ratio

خورشیدی کاهش می‌یابد. در مورد نوع رنگ‌دانه، سطح یک تأثیر بیشتری نسبت به دو سطح دیگر دارد. رنگ‌دانه اکسید روی، در واقع میزان جذب کمتری نسبت به دو رنگ‌دانه دیگر ایجاد می‌کند. اکسید روی در تمام گستره طول موج، به استثنای محدوده طول موج فرابنفش، دارای جذب پایین‌تری نسبت به دو رنگ‌دانه دیگر بوده و انعکاس بالاتری را سبب می‌شود. این نکته نشان می‌دهد که اکسید روی بهترین گزینه برای رنگ‌دانه در رنگ‌های کنترل گرمایی است. در شکل ۴ طیف‌های انعکاسی سه نمونه رنگ مذکور نشان داده شده است. همان گونه که در شکل دیده می‌شود، هر سه نوع رنگ‌دانه دارای جذب یکسانی در ناحیه فرابنفش هستند ولی در سایر نواحی، رفتار رنگ‌دانه‌های مختلف در انعکاس نور متفاوت است. رنگ دارای رنگ‌دانه اکسید روی (رنگ S2) در تمامی نواحی طول موج به غیر از ناحیه فرابنفش انعکاس بالایی دارد در صورتی که رنگ دارای رنگ‌دانه دی‌اکسید تیتانیوم (رنگ S5) در ناحیه زیر قرمز نزدیک جذب بیشتری را نشان می‌دهد و نمودار درصد انعکاس بر حسب طول موج به مقادیر کمتر انعکاس ختم می‌شود و به همین علت جذب این رنگ نیز بالاتر است. رنگ دارای رنگ‌دانه تولید شده (رنگ S8) رفتار بسیار مشابهی را با رنگ دارای رنگ‌دانه اکسید روی (رنگ S2) نشان می‌دهد ولی میزان انعکاس کلی این رنگ کمتر از رنگ S2 است.

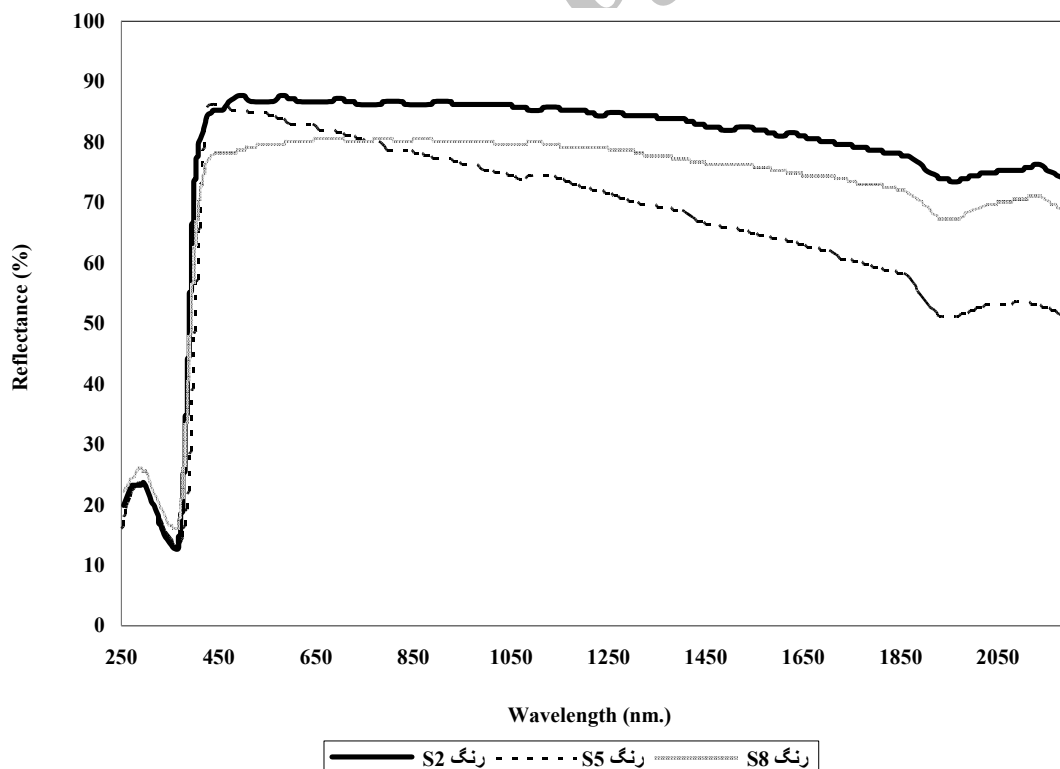
به منظور بیشینه‌سازی ضریب نشر کلی، از رابطه ۲ برای محاسبه نسبت S/N استفاده شده است.

$$S/N = -10 \times \text{Log} \left(\frac{1/y_1^2 + 1/y_2^2 + \dots + 1/y_n^2}{n} \right) \quad (2)$$

که مقدار اندازه‌گیری شده برای ضریب نشر کلی بوده و n تعداد تکرارها برای هر آزمایش می‌باشد. برای کمینه‌سازی ضریب جذب خورشیدی نیز از رابطه ۳ استفاده شد.

$$S/N = -10 \times \text{Log} \left(\frac{y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2}{n} \right) \quad (3)$$

در واقع این مقدار، بزرگی تأثیر یک عامل بر نتیجه مورد نظر نسبت به خطای وارد شده در تکرار آزمایش‌ها را نشان می‌دهد [۱۹]. از آن جایی که وزن بالایی برای ضریب جذب خورشیدی در نظر گرفته شده، رفتار نمودار بیشتر تحت تأثیر ضریب جذب خورشیدی رنگ‌دانه‌ها قرار دارد و با تغییر نوع رنگ‌دانه از اکسید روی به دی‌اکسید تیتانیوم، به علت جذب بالاتر دی‌اکسید تیتانیوم در محدوده طول موج زیر قرمز نزدیک، نمودار کاهش پیدا می‌کند و دوباره با تغییر نوع رنگ‌دانه از دی‌اکسید تیتانیوم به رنگ‌دانه نوع C، انعکاس افزایش یافته و جذب



شکل ۴: نمودارهای انعکاسی رنگ‌های S2، S5 و S8.

کوچک تر از یک اندازه مشخص نمی‌توانند در پراکنش نور دخالت کنند و غلظت‌های رنگ‌دانه خیلی کم یا زیاد نیز در پراکنش تأثیر ندارند و چنانچه اختلاف میان ضرایب شکست رنگ‌دانه‌ها و واسطه از یک حدی کمتر باشد، نمی‌توانند مسیر نور را تغییر دهند [۲۵]. نتایج به دست آمده از تحلیل نرم‌افزاری نشان می‌دهند که نوع آماده‌سازی زیرآیند تأثیر بیشتری بر خواص نوری رنگ‌های کنترل گرمایی در مقایسه با نسبت رنگ‌دانه به رزین یا به عبارت دیگر غلظت حجمی رنگ‌دانه دارد. با افزایش نسبت رنگ‌دانه به رزین میزان جذب خورشیدی کاهش می‌یابد، ولی در تحقیق حاضر به دلیل این که تمامی نسبت‌های رنگ‌دانه به رزین بالاتر از حد بحرانی است و حفرات هوا درون رنگ حاضر هستند، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی جذب خورشیدی ندارد. چنانچه رنگ‌دانه انتخاب شده دارای ضریب شکست بالا و اندازه ذره‌ای مناسب باشد، می‌تواند با مقدار کم نیز مؤثر واقع شود و رنگ‌دانه‌های بیشتر تنها باعث کاهش خواص مکانیکی پوشش می‌گردد.

۳-۴- اثر ترکیب رزین (نسبت $\text{SiO}_2:\text{K}_2\text{O}$)

رزین مورد استفاده در رنگ‌های کنترل گرمایی، با داشتن ضریب شکست پایین و بالا بردن اختلاف میان ضرایب شکست رنگ‌دانه و رزین، در انعکاس نور تأثیر دارد [۲۰]. در تحقیق حاضر نشان داده شد که ترکیب رزین، هیچ تأثیری بر خواص نوری ندارد. با توجه به این که دو نوع رزین انتخاب شده، هر دو از نوع سیلیکات پتاسیم بودند، ضریب شکست آنها با یکدیگر تفاوتی ندارد. از آن جایی که نسبت $\text{SiO}_2:\text{K}_2\text{O}$ رزین‌های فوق تفاوت قابل ملاحظه‌ای با یکدیگر ندارد، توانایی آنها برای پذیرش رنگ‌دانه نیز یکسان بوده و احتمال این که حد بحرانی رنگ‌دانه در آنها متفاوت باشد، وجود ندارد. به عبارت دیگر، هر دو رزین تأثیر یکسان بر خواص نوری می‌گذارند. با استفاده از تحلیل نرم‌افزاری، ترکیب شیمیایی رنگ بهینه تعیین شد که در جدول ۱۱ مشخصات آن نشان داده شده است. پس از تهیه رنگ مورد نظر و اعمال آن؛ جذب خورشیدی و نشر گرمایی مربوط به آن به ترتیب برابر با ۰,۲۰۶ و ۰,۸۷۶ اندازه‌گیری شد.

جدول ۱۱: مشخصات نمونه بهینه.

عامل	سطح بهینه
نوع رنگ‌دانه	اکسید روی
نوع آماده‌سازی زیرآیند	آندایز شده
نسبت رنگ‌دانه به رزین	۴:۱
نوع رزین	A2

۳-۲- اثر نوع آماده‌سازی زیرآیند

پس از نوع رنگ‌دانه، آماده‌سازی زیرآیند در درجه دوم اهمیت قرار دارد. آماده‌سازی زیرآیند بر روی جذب خورشیدی پوشش تأثیر می‌گذارد [۲]. زیرآیندهای آندایز شده دارای جذب خورشیدی پایین‌تری نسبت به زیرآیند سنباده زده شده هستند. زیرآیند آندایز شده به دلیل داشتن لایه سطحی اکسید آلومینیوم، باعث انعکاس بیشتر نور شده و جذب خورشیدی را کاهش می‌دهد. از این رو، حتی در صورت عبور نور از لابه‌لای ذرات و رسیدن آن به زیرآیند، زیرآیند از جذب آن جلوگیری می‌کند و باعث انعکاس آن می‌گردد. به طور کلی در رنگ‌های کنترل گرمایی با افزایش ضخامت، به علت افزایش ذرات رنگ‌دانه و افزایش میزان برخورد؛ جذب خورشیدی کاهش می‌یابد. از آن جایی که ضخامت رنگ‌های تهیه شده (حدود $80 \mu\text{m}$) نسبت به رنگ‌های اعمال شده در مراجع ($180 \mu\text{m}$) پایین‌تر است [۱۵]، اکسید آلومینیوم موجود در سطح نیز در انعکاس نور مؤثر واقع می‌شود. اکسید آلومینیوم دارای ضریب جذب خورشیدی ۰,۱۳ و نشر گرمایی ۰,۲۳ است در حالی که آلیاژ آلومینیوم ۰,۶۱ (زیرآیند سنباده زده شده) دارای جذب خورشیدی ۰,۱۶ و نشر گرمایی ۰,۰۶ است [۲۴]. تأثیر دو عامل جذب و نشر با هم سبب می‌شود که در مجموع آزمایش‌ها، زیرآیند آندایز شده بسیار تأثیرگذار معرفی شود. از طرف دیگر سطح متخلخل و دارای ماهیت اکسیدی زیرآیند آندایز شده، باعث بهبود چسبندگی رنگ‌های با پایه سیلیکاتی شده و خطر ترک خوردن رنگ را در حین سیکل حرارتی کاهش می‌دهد [۲۲].

۳-۳- اثر نسبت رنگ‌دانه به رزین

نسبت رنگ‌دانه به رزین، در درجه سوم اهمیت قرار دارد و میزان تأثیر آن نیز بسیار اندک است. از این نکته می‌توان نتیجه گرفت که پراکنش نور بیشتر تحت تأثیر نوع رنگ‌دانه و ضریب شکست آن است و کمتر از میزان رنگ‌دانه تأثیر می‌پذیرد. به عبارت دیگر، تأثیر ضریب شکست خیلی بیشتر از تأثیر غلظت رنگ‌دانه است، این بدین معنی است که می‌توان با نسبت رنگ‌دانه به رزین کمتر و با یک رنگ‌دانه مناسب (رنگ‌دانه‌ای که با نسبت کم، جذب خورشیدی پایین را فراهم سازد)، جذب خورشیدی مورد نظر را به دست آورد. به بیان دیگر، رنگ‌دانه‌ای با ضریب شکست بالا و اندازه ذره‌ای مناسب (در رنگ‌های کنترل گرمایی اندازه مناسب برای رنگ‌دانه در محدوده $1.5 - 0.25 \mu\text{m}$ قرار دارد [۱۲])، مؤثرتر از رنگ‌دانه‌ای با غلظت بالا عمل می‌کند. طبق تئوری مای^۱، سه عامل در بهبود بازده پراکنش پوشش‌های کنترل گرمایی نقش دارند. این عوامل عبارتند از: افزایش مقدار نسبت ضرایب شکست رنگ‌دانه‌ها و رزین، بهینه کردن قطر رنگ‌دانه و بهینه کردن غلظت حجمی رنگ‌دانه [۲۱]. به عبارت دیگر ذرات بزرگ‌تر یا

1- Mie Theory

۴- نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده نشان داد که نوع رنگدانه مؤثرترین عامل بر خواص نوری رنگ‌های کنترل گرمایی است. اکسید روی، رنگدانه‌ای دارای جذب خورشیدی پایین‌تر نسبت به سایر رنگدانه‌ها بوده و گزینه بسیار مناسبی است. زیرآیند آندایز شده، در مقایسه با زیرآیند سنباده زده شده، خواص نوری بهتری را فراهم می‌کند و جذب خورشیدی پایین‌تری دارد. ترکیب رزین‌های سیلیکاتی (نسبت

۴:۱ و رزین نوع A2 که بر روی زیرآیند آندایز شده اعمال شده است، معرفی شد.

۵- مراجع

1. J. Dever, B. Banks, K. D. Groh, S. Miller, Degradation Of Spacecraft Materials, NASA Glenn Research Center, 1998.
2. W. Xiaohong, White Anodized Thermal Control Coating on LY12 Aluminium Alloy. *J. Mater. Process. Technol.* 200(2008), 405-409.
3. L. E. Long, Thermal control coating, US Pat. 5589274, 1996.
4. L. E. Long, Radiator using thermal control coating, US Pat. 5884868, 1999.
5. R. Cumberland, Flexible thermal control coatings and methods for fabricating the same, US Pat. 2008/0045639 A1, 2008.
6. H. Xiao, Optical degradation of silicone in zno/silicone white paint irradiated by < 200 keV Protons. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A.* 266(2008), 3375-3380.
7. C. P. Torre, Thermal control coatings and method for improving atomic oxygen resistance, US Pat. 4939031, 1990.
8. M. B. Brown, High reflectance paint for high intensity optical applications, US Pat. 6974498 B2, 2005.
9. J. G. Keller, Thermal control coatings, US Pat. 2008/0038454 A1, 2008.
10. D. A. Jaworske, Correlation of predicted and observed optical properties of multilayer thermal control coatings, *Thin Solid Films.* 332(1998), 30-33.
11. T. Horie, Thermal control coating composition, US Pat. 4741778, 1988.
12. S. Berman, Spacecraft materials development programs for thermal control coatings and space environmental testing. *Amptiac Q.* 8(2004), 59-68.
13. J. B. Schutt, Alkali-metal silicate binders and methods of manufacture, US Pat. 4162169, 1979.
14. J. B. Schutt, Potassium silicate- zinc coatings, US Pat. 3620784, 1971.
15. Y. Harada, M. Deshpande, Requalification of white thermal control coatings, IIT Research Institute, Chicago, 1994.
16. J. A. Johnson, A multiple-scattering model analysis of zinc oxide pigment for spacecraft thermal control coatings. *Prog. Org. Coat.*, 47(2003), 432-442.
17. M. E. Sibert, Inorganic surface coatings, US Pat. 3222197, 1962.
18. A. I. Davis, Development of improved and novel thermal control coatings, air force research laboratory, AFRL-ML-WP-TP-2007-484, 2007.
19. K. R. Roy, Design of experiments using Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement, John Wiley & Sons, New York, 2001.
20. S. Velu, Characterization of MCM-41 mesoporous molecular Sieves containing copper and zinc and their Catalytic performance in the selective oxidation Of alcohols to aldehydes. *Microporous Mesoporous Mater.* 54(2002), 113-126.
21. O. Berger, Commercial White Paint as Back Surface Reflector for Thin-Films Solar Cells. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 91(2007), 1215-1221.
22. S.A. Daneman, Selection rationale, application, optical properties and life verification of z-93 for the space station, McDonnell Douglas Aerospace, Report 94H0632, 1994.
23. H. W. Babel, H. G. Lee, High Emitance Low Absorptance Coatings, US Pat. 5296285, 1994.
24. J. H. Henninger, Solar absorptance and thermal emittance of some common spacecraft thermal control coatings, NASA Reference Publication 1121, 1984.
25. E. J. Davis, Light scattering by small particles, University of Washington, CHEM E 515, 2010.