

ساخت و اعمال رنگ کنترل حرارتی سیاه سیلیکونی بر آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ و ارزیابی خواص آن

سید صابر میرحسینی^{۱*}، رضا شجاع رضوی^۱، مرضیه آزاد فلاح^۲، مسعود برکت^۱، سید محمد جواد ناصری^۱

۱ دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، اصفهان

۲ دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه بین المللی امام خمینی، قزوین

چکیده

شرایط دمایی سخت و متغیر روی پوشش فضاییما اثرات مخربی دارد. رنگ‌های کنترل حرارتی برای محافظت از سطوح فضاییما در مقابل این عامل مخرب استفاده می‌شود. در تحقیق حاضر، رنگ سیاه کنترل حرارتی سیلیکونی با استفاده از رزین‌های سیلیکونی دو جزئی و مقادیر مختلف رنگدانه کربن سیاه ساخته و روی زیرلایه آلومینیوم ۶۰۶۱ با آماده‌سازی‌های اندایزینگ، سنباده‌زنی و شستشو با محلول قلیایی اعمال شد. به منظور بهبود چسبندگی از عوامل بهبوددهنده چسبندگی مختلف شامل عامل بهبوددهنده ۳-آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان، واش پرایمر و آستری DW۱۲۰۰ استفاده شد. طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی انجام شد. آزمون‌های چسبندگی، سایش، ضربه و خمش روی رنگ تولید شده انجام و نتایج آن‌ها نشان داد که رنگ ساخته شده با رزین RT۶۰۴، ۳ درصد رنگدانه و پاشش آستری دارای بهترین خواص سایشی و چسبندگی است. بررسی مقاومت به ضربه و خمش رنگ‌های تولید شده نشان داد این رنگ از انعطاف‌پذیری و مقاومت به ضربه بالایی برخوردار است.

تاریخ دریافت:

۹۵/۶/۲۰

تاریخ پذیرش:

۹۵/۱۲/۱۵

سیلیکون، رنگ کنترل حرارتی، مقاومت سایشی، چسبندگی،

رنگدانه کربن سیاه

واژگان کلیدی

۱) مقدمه

وقتی ماهواره در مدار قرار می‌گیرد، تحت اثر محیط مخرب فضا قرار دارد. به منظور جلوگیری از تخریب ماهواره بر اثر قرارگیری در این محیط، سیستم‌های مختلف و تجهیزات متنوعی در نظر گرفته می‌شود. سیستم‌های کنترل حرارت یکی از سیستم‌های محافظ ماهواره می‌باشد که از ابتدای تولید ماهواره مورد توجه بوده و استفاده شده است. در طراحی فضاپیما، سیستم کنترل حرارت (TCS)^۱ به منظور ثابت نگه داشتن دمای فضاپیما در محدوده ایمن و جلوگیری از سرد یا گرم شدن بیش از حد استفاده می‌شود. سیستم کنترل حرارت باید به قدری مقاوم باشد که در تمام مدت ماموریت فضاپیما تخریب نشود. همچنین یک سیستم کنترل حرارت باید در مقابل محیط مخرب فضا که شامل پرتوهای خورشیدی، اکسیژن اتمی و شارژ الکترواستاتیکی مقاوم باشد. سیستم‌های کنترل حرارت به دو نوع فعال و غیر فعال تقسیم می‌شوند [۱]. سیستم‌های کنترل حرارت غیرفعال (PTCS)^۲ شامل رنگ‌ها و پوشش‌ها و تجهیزاتی هستند که دارای خاصیت ذاتی بوده و کنترل حرارت را بر عهده دارند.

رنگ‌های کنترل حرارتی، از جمله سیستم‌های کنترل حرارت غیر فعال هستند که با تغییر خواص نوری-حرارتی سطح فضاپیما به عنوان سیستم کنترل حرارت ایفای نقش می‌کنند. این رنگ‌ها به دو زیرمجموعه کلی تحت عنوان رنگ‌های سفید و سیاه تقسیم بندی می‌شوند. رنگ‌های سفید دارای ضریب نشر بالا و جذب پایین و رنگ‌های سیاه دارای ضریب جذب و نشر بالا می‌باشند [۳و۲]. رنگ سیاه شامل یک رزین آلی مانند سیلیکون، پلی اورتان و یک رنگ دانه با ضریب جذب و نشر بالا مانند کربن سیاه است [۵و۴]. پلی اورتان‌ها ارزان تر بوده ولی تغییرات زیادی از خود نشان می‌دهند. سیلیکاتی‌ها پایدارتر بوده ولی گران تر و تردتر بوده و کاربرد سخت تری دارند [۶].

رنگ‌های سیاه سیلیکونی از دو قسمت اصلی رزین سیلیکونی و رنگدانه کربن سیاه تشکیل شده‌اند. رزین‌های سیلیکونی بر اساس مکانیزم و شرایط پخت به طور کلی به دو دسته اساسی تقسیم می‌شوند. در دسته اول، پخت در دمای محیط انجام می‌گیرد؛ به همین خاطر به این رزین‌ها، رزین‌های سیلیکونی پخت شونده در دمای محیط (RTV)^۳ گفته می‌شود.

دسته دوم شامل رزین‌هایی است که در دماهای بالاتر از $^{\circ}\text{C}$ ۱۰۰ پخت می‌شوند. این دسته اصطلاحاً رزین‌های پخت-شونده در دمای بالا (HTV)^۴ نامیده می‌شوند. رزین‌های RTV خود به دو دسته تک‌جزیی (RTV-۱) و دوجزییی (RTV-۲) تقسیم می‌شوند. تفاوت این دو نوع در عوامل پخت و مکانیزم پخت آن‌ها می‌باشد. در ۱ عوامل پخت و پلیمر سیلیکونی در یک مرحله با یکدیگر مخلوط شده و در شرایط مناسب نگهداری می‌گردد تا در زمان مورد نیاز استفاده شود. رزین‌های RTV-۲ از دو جزء، شامل عوامل پخت و جزء پلیمر تشکیل شده است. قبل از استفاده از این رزین دو جزء با نسبت‌های مشخص با یکدیگر مخلوط شده و استفاده می‌گردد. رزین‌های RTV-۱ علی‌رغم سهولت استفاده از آن‌ها، دارای شرایط نگهداری مشکلی می‌باشند [۷-۹]. از آنجا که تجهیزات ماهواره بسیار حساس بوده و نباید دمای بسیار بالا و یا بسیار پایین را تجربه کنند، لذا پلیمرهای سیلیکونی خطی با انتهای وینیل برای مصارف فضایی و ماهواره‌ها پوشش‌های پخت‌شونده در دمای محیط مورد توجه هستند. پلیمرهای سیلیکونی خطی با انتهای وینیل قابلیت پخت به صورت دو جزیی در دمای محیط را دارند [۱۰]. رزین سیلیکونی با داشتن انرژی پیوند بالا و خصوصیات یونی بالا از باندهای Si-O، پایداری حرارتی بالایی دارد [۱۱]. همچنین رزین سیلیکونی دارای دمای تحول شیشه‌ای پایین در حدود $^{\circ}\text{C}$ ۱۲۳- می‌باشد [۱۲]. این رزین به راحتی می‌تواند در محیط LEO^۵ با حداقل دمای $^{\circ}\text{C}$ ۱۰۰- بدون تخریب باقی بماند. این پوشش در اثر برخورد اکسیژن اتمی در LEO لایه محافظ سطحی SiO₂ را در سطح خود تشکیل می‌دهد؛ که از تخریب بیشتر پوشش جلوگیری می‌کند [۱۳].

رنگدانه کربن سیاه^۶ نیز با داشتن خواص نوری-حرارتی مناسب، ضریب جذب و نشر قابل قبولی را برای رنگ سیاه فراهم می‌کند [۱۴]. رنگدانه کربن سیاه ماده‌ای رسانا است و این رسانایی را به پوشش سیاه نیز منتقل کرده و سبب پراکنده‌سازی و رفع بارهای الکترواستاتیکی ایجاد شده روی تجهیزات در محیط فضا می‌شود. این بارهای الکتریکی منجر به جرقه زدن در سطح و تخریب پوشش می‌شوند [۱۵و۱۶].

رزین‌های سیلیکونی با داشتن خواصی از قبیل انعطاف پذیری بالا، مقاومت به اکسیژن اتمی و اشعه ماورای بنفش، تحمل چرخه حرارتی و مقاومت به شوک حرارتی بالا در ساخت پوشش‌های

^۱ Thermal control system
^۲ Passive thermal control system
^۳ Room temperature vulcanizing
^۴ High temperature vulcanizing

^۵ Low earth orbit
^۶ Carbon black

تاثیر کرنش وارده به صورت تک محوری بر چسبندگی یک رابر طبیعی (NR)^۶ که به آن کربن سیاه اعمال شده بود و یک رابر (SBR)^۷ بررسی شد. انرژی های سطحی در نمونه های NR و SBR قبل از تغییر شکل و بعد از تغییر شکل اندازه گیری شد. و همچنین در نمونه NR به بررسی تاثیر افزایش رنگدانه کربن سیاه نیز پرداخته شد. نتایج حاکی از آن بود که چسبندگی نمونه NR بیشتر از نمونه SBR بوده و با اعمال تغییر شکل انرژی آزاد سطحی و به تبعیت از آن چسبندگی افزایش می یابد. و همچنین چسبندگی با مقدار کربن سیاه افزوده شده به رابر نسبت عکس دارد. نتایج بررسی چسبندگی رنگ های تولید شده توسط برکت و همکارانش [۱۰] نشان داد، چسبندگی پوشش به تغییرات درصد رنگدانه، درصد شبکه ساز و کاتالیست وابستگی چندانی ندارد و در نمونه هایی که از پلیمر با وزن مولکولی کمتر استفاده شد، چسبندگی افزایش یافت. شجاع رضوی و همکارانش [۲۴] خواص نوری-حرارتی و چسبندگی دو نوع پوشش کنترل حرارتی سیاه و سیلیکونی و سفید سلیکات پتاسیم را با استفاده از روش تاگوچی بررسی کردند. نتایج نشان داد در پوشش سیاه سیلیکونی، آماده سازی سطح و استفاده از عوامل بهبود دهنده چسبندگی روی مقاومت به چسبندگی این پوشش ها بیشترین تاثیر را دارند. رنگ های ساخته شده از رزین های دوجزئی امکان نگهداری طولانی در دمای محیط را دارند و در مرحله پخش رنگدانه عملکرد بهتری نسبت به پوشش های تک جزئی از خود نشان می دهند. چسبندگی ضعیف پوشش های سیلیکونی از نقاط ضعف این نوع از پوشش محسوب می شود. یکی از اهداف این تحقیق بهبود دادن چسبندگی پوشش روی زیرلایه با استفاده از عوامل چسبندگی مختلف می باشد. عامل چسبندگی با ترکیبات مختلف حلال و اسیدیته استفاده شد. اثرات متغیر حلال و اسیدیته در ترکیب عامل بهبوددهنده چسبندگی در تحقیقات مشابه، مشاهده نشده است. اثرات این متغیرها بررسی شده و با استفاده از ترکیب بهینه به چسبندگی بالاتری دست پیدا شد.

(۲) بخش تجربی

(۲) مواد

در این تحقیق از دو نوع پلیمر سیلیکونی دو جزئی محصول شرکت واکر^۸ آلمان به نام های تجاری A/B ELASTOSIL RT^{۶۰۴} و A/B ELASTOSIL RT^{۷۴۵} به منظور ساخت رنگ سیاه کنترل حرارتی دو جزئی، از زایلن^۹، متیل اتیل کتون و اتانول محصول شرکت مرک^{۱۰} آلمان به عنوان حلال، از کربن سیاه با نام تجاری

سامانه های فضایی بسیار مورد توجه است [۱۷]. رنگ کنترل حرارتی سیاه سیلیکونی با داشتن نسبت ضریب جذب به ضریب نشر نزدیک به یک، یکی از بهترین گزینه ها در بین رنگ های سیاه برای استفاده در سیستم کنترل حرارت فضاپیماها محسوب می شود [۲]. تحقیقات مختلفی جهت تولید و بهینه سازی رنگ های کنترل حرارتی و از جمله رنگ های سیلیکونی انجام گرفته است. میرحسینی و همکارانش [۱۸ و ۱۹] به ساخت و ارزیابی رنگ های کنترل حرارتی بر پایه رزین پلی اورتانی پرداختند. آن ها به بررسی تاثیر نوع پلی آل، نسبت NCO/OH و غلظت های مختلف رنگدانه کربن سیاه روی خواص چسبندگی و فضایی این پوشش پرداخته و در نهایت پوشش بهینه ای برای استفاده در ماهواره معرفی کردند. الگندی^۱ و همکارانش [۲۰] به بررسی اثرات درصد شبکه ساز روی استحکام کششی رزین سیلیکونی پرداختند. نتایج آزمایش های آن ها نشان داد که با افزایش درصد شبکه ساز از ۵/۷ به ۱۴/۳ درصد، استحکام کششی از ۳/۹ به ۱۰/۸ MPa افزایش می یابد. افزایش بیشتر درصد شبکه ساز منجر به کاهش استحکام به حدود ۴ MPa می گردد. ماروتان^۲ و همکارانش [۲۱] دو رزین اپوکسی و سیلیکونی را که قابلیت اختلاط در یکدیگر را ندارند با استفاده از عامل شبکه ساز و کاتالیست (فرآیند IPN^۳) در همدیگر حل کردند. فرآیند IPN خواص مکانیکی، شیمیایی، حرارتی و مقاومت خوردگی را نسبت به حالت فردی رزین ها افزایش می دهد. کیهان و همکارانش [۱۶] رنگ سفید سیلیکونی کنترل حرارتی را با استفاده از رزین سیلیکونی RTV-۲-۶۰۴ و رنگدانه اکسید روی با اندازه کوچکتر از ۴۰۰ نانومتر تهیه کردند. بررسی خواص عمومی رنگ نشانگر این واقعیت است که رنگ حاصل دارای مقاومت مکانیکی خوبی بوده و همچنین از انعطاف پذیری بالایی برخوردار است و می تواند در مقابل تغییرات شدید دمایی از خود مقاومت نشان دهد. اسفنده^۴ و همکارانش [۲۲] خواص چسبندگی الاستومر سیلیکونی پوشش داده شده روی یک زیرلایه آلومینیومی را بررسی کردند. این زیرلایه آلومینیومی با آستری اپوکسی پوشش داده شده بود. بهبود دهنده های چسبندگی پایه سیلانی و روش های متفاوتی برای بهبود چسبندگی پوشش روی آستری اپوکسی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزودن ترکیبات سیلانی چسبندگی پوشش سیلیکونی را روی آستری افزایش می دهد. میدا^۵ و همکارانش [۲۳] تاثیر تغییر شکل را روی چسبندگی بررسی کردند.

^۱ N. Elgindy

^۲ K. Maruthan

^۳ Interpenetrating Polymer Network

^۴ M. Esfandeh

^۵ K. Maeda

^۶ Natural Rubber

^۷ Styrene Butadiene Rubber

^۸ Wacker

^۹ Xylene

^{۱۰} Merck

پوشش دهی طلا نیز به وسیله دستگاه لایه گذاری مدل SCD۰۰۵ ساخت شرکت بالتک سوئیس انجام شد. همچنین برای بررسی ترکیب عناصر موجود روی سطح از دستگاه EDS مدل JEOL JSM LV۵۴۱۰ با انرژی اولیه ۲۵ کیلو الکترون ولت متصل به میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد.

۲ (۲) روش کار

۲ (۲) طراحی آزمایش

به منظور انجام سریع تر و بهتر آزمایش ها و همچنین کاهش هزینه ها، از روش طراحی آزمایش تاگوجی برای انجام مراحل مختلف تحقیق استفاده شد. برای انجام آزمون ها، دو آزمایش طراحی شد. آزمایش اول، به منظور تعیین بهترین ترکیب متشکل از عامل بهبود دهنده، حلال و میزان اسیدیته محلول ماده بهبوددهنده، طراحی شد. در این آزمایش از سه متغیر حلال، محلول و نوع آماده سازی، هر کدام در سه سطح استفاده شد. این آزمایش برای دو رزین واکر ۶۴۰ و واکر ۷۴۵ و ۴ درصد رنگدانه کربن سیاه انجام شد. با توجه به این که با افزایش مقدار کربن چسبندگی رنگ سیلیکونی کاهش می یابد، لذا ترکیب بهینه برای ۴ درصد کربن سیاه برای مقادیر کمتر کربن نیز کارایی دارد. هدف اصلی از این آزمون بدست آوردن نمونه ای با بهترین خواص چسبندگی بود که این نمونه بهینه در آزمون مرحله دوم مورد استفاده قرار گرفت. در طراحی دوم به بررسی بهترین ترکیب رنگ و بهترین زیرلایه پرداخته شد. برای بررسی این مهم از سه متغیر، رزین (در دو سطح)، درصد کربن (در سه سطح) و عامل بهبوددهنده چسبندگی (در سه سطح) استفاده شد. طراحی آزمایش مرحله اول

محلول متشکل از عامل بهبوددهنده چسبندگی (APTES) و حلال دارای pH در حدود ۱۲ برای اعمال تغییرات pH محلول از اسید استیک که یک اسید آلی می باشد استفاده شد. با توجه به عوامل و سطوح انتخاب شده و با استفاده از نرم افزار Qualitek^۴ طراحی آزمایش ها انجام گرفت و آرایه متعامد L_۹ به دست آمد که در جدول ۱ و ۲ خلاصه شده است.

جدول (۱) عوامل مؤثر و سطوح انتخاب شده برای انجام آزمایش ها

عوامل	نماد	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
آماده سازی سطح	A	سنباده زنی و شستشو با استون	اندازبزرگ	غوطه وری در سود
حلال	B	زایلین	اتانول	اتیل متیل کتون
PH محلول عامل بهبود دهنده	C	۴/۵	۶	۷/۵

^۱ Degussa

^۲ BYK

^۳ Dow Corning

^۴ Aminopropyltriethoxysilane

^۵ Gelest

^۶ Elcometer

^۷ Tescan

^۸ Energy Dispersive Spectroscopy

Printex V تولید شرکت دگوسای^۱ آلمان به عنوان رنگدانه و دیسپریک P1۰۴S شرکت بی وای کی^۲ آلمان به عنوان ترکنده و پخش کننده رنگدانه، آستری DW۱۲۰۰ شرکت دوکورنینگ^۳ آمریکا، ۳- آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان (APTES)^۴ با نام تجاری SIA۰۶۱۰،۰ محصول شرکت جیلست^۵ آمریکا به عنوان عامل چسبندگی و از آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ به عنوان زیرلایه استفاده شد. همچنین برای کنترل pH محلول بهبوددهنده چسبندگی از اسید استیک با فرمول شیمیایی CH₃COOH محصول شرکت مرک آلمان استفاده شد.

۲ (۲) تجهیزات و روش کار

۲ (۲) تجهیزات

برای انجام آزمون چسبندگی از آزمایش چسبندگی Pull off مدل PosiTestAT-A ساخت شرکت DeFelsko آمریکا و چسب سیلیکونی RTV استفاده شد. روش اندازه گیری چسبندگی مطابق با استاندارد ASTM D۳۳۵۹ [۲۵] صورت گرفت. به منظور بررسی مقاومت به خمش رنگ از دستگاه آزمون خمش استوانه ای ساخت شرکت مکس تکنیک کانادا مطابق با استاندارد ASTM D۵۲۲-۹۳ [۲۶] استفاده شد. به منظور بررسی مقاومت رنگ در برابر ضربه از دستگاه آزمون ضربه با وزنه یک کیلوگرم و ارتفاع یک متر ساخت شرکت مکس تکنیک کانادا مطابق استاندارد ASTM D۲۷۹۴-۹۳ [۲۷] استفاده شد. از دستگاه سایش مدل RAI-۱ شرکت مکس تکنیک کانادا و جسم ساینده CS۱۰ مطابق با استاندارد ASTM D۴۰۶۰ [۲۸] استفاده شد. این آزمون با وزنه ۱۰۰۰ گرمی و تعداد دور ثابت ۲۰۰ دور انجام گرفت. به منظور بررسی ضخامت رنگ از دستگاه ضخامت سنج فیلم خشک با نام الکومتر ۴۵۶ ساخت شرکت الکومتر^۶ انگلستان مطابق استاندارد ASTM B۵۳۰ استفاده شد [۲۹]. برای بررسی سطوح از میکروسکوپ الکترونی روبشی گرمایونی مدل وگا^۷ و ساخت شرکت تسکان^۷ استفاده شد. ولتاژ به کار گرفته شده ۱۵ کیلو ولت بود.

با توجه به عوامل و سطوح انتخاب شده و با استفاده از نرم افزار Qualitek^۴ طراحی آزمایش انجام گرفت و آرایه متعامد L_۹ به دست آمد که در جدول ۳ و ۴ خلاصه شده است.

جدول ۴ جدول طراحی آزمایش اول با استفاده از روش تاگوچی L_۹

متغیرها (عوامل)			شماره آزمایش
A	B	C	
۱	۱	۱	۱
۲	۲	۱	۲
۱	۳	۱	۳
۱	۱	۲	۴
۱	۲	۲	۵
۲	۳	۲	۶
۲	۱	۳	۷
۱	۲	۳	۸
۱	۳	۳	۹

۲) ۲) ۲) ساخت رنگ سیاه سیلیکونی دو جزئی

رزین هایی که برای ساخت رنگ انتخاب شد، دو جزئی بودند. افزودن رنگدانه کربن سیاه، عامل پخش کننده و حلال به رزین، برای جزء اول انجام شد. جزء دو رزین در مرحله آخر، قبل از اعمال رنگ روی زیرلایه افزوده شد. زیرا با افزودن جزء دوم رزین، عملیات پخت رزین فعال شده و برای پخش کردن رنگدانه و اعمال آن روی زیرلایه دچار مشکل می شود. ترکیب رنگدانه، جزء اول رزین و عامل پخش کننده به منظور ساخت رنگ با ۴ درصد رنگدانه در جدول ۵ آورده شده است. برای هر نمونه، ابتدا مقدار کربن سیاه محاسبه شده به همراه ۳ درصد وزنی عامل پخش کننده BYK P104S، ۶۰ درصد وزن نهایی رنگ، حلال زایلن و گوی های شیشه ای (پرل) مخلوط شده و جهت آسیاب و پخش کردن رنگدانه با دور آسیاب ۱۰۰۰ دور در دقیقه آسیاب گردید.

جدول ۳ عوامل مؤثر و سطوح انتخاب شده برای انجام آزمایش ها

عوامل	نماد	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
رنگدانه کربن سیاه (درصد وزنی نسبت به وزن پلیمر)	A	۲	۳	۴
آماده سازی زیرلایه	B	پاشش آستری	واش پرایمر	زیرلایه بهینه مرحله اول
رزین	C	RT۷۴۵	RT۶۰۴	-

۱ Pearl

در طراحی مرحله اول، فقط آزمون چسبندگی روی نمونه ها انجام شد و توسط نرم افزار Qualitek^۴ مورد ارزیابی قرار گرفت. نمونه بهینه تعیین شده در این مرحله به عنوان یکی از سطوح عامل بهبوددهنده چسبندگی در طراحی آزمایش دوم، در نظر گرفته شد.

جدول ۲) جدول طراحی آزمایش اول با استفاده از روش تاگوچی L_۹

متغیرها (عوامل)			شماره آزمایش
A	B	C	
۱	۱	۱	۱
۲	۲	۱	۲
۳	۳	۱	۳
۲	۱	۲	۴
۳	۲	۲	۵
۱	۳	۲	۶
۳	۱	۳	۷
۱	۲	۳	۸
۲	۳	۳	۹

طراحی آزمایش دوم

در این مرحله از هر دو رزین استفاده شد تا بهترین رزین برای رنگ بهینه مشخص گردد. همچنین در این مرحله از درصد کربن های مختلف به عنوان متغیر استفاده شد. در طراحی اول، چون به بررسی خواص چسبندگی پرداخته شد، از بیشترین درصد کربن انتخابی برای طراحی دوم (۴ درصد) استفاده گردید.

دلیل این انتخاب به این دلیل بود که با بالا رفتن درصد کربن چسبندگی رنگ سیاه سیلیکونی کاهش

می یابد [۳۰]. لذا با انتخاب بیشترین درصد کربن، تضمین افزایش چسبندگی برای مقادیر کمتر کربن وجود خواهد داشت. متغیر بعدی این مرحله عامل بهبوددهنده چسبندگی بود، که در سه سطح بررسی شد. نمونه ای که در مرحله اول بهینه سازی شده بود به عنوان یکی از سطوح این متغیر مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۵) مقادیر اجزاء رنگ با ۴ درصد کربن سیاه و ۳ درصد عامل پخش کننده

نسبت جزء اول به دوم (A:B)	عامل پخش کننده (gr)	جزء اول رزین (gr)	کربن سیاه (gr)	رزین
۱:۱	۱/۵	۲۵	۲	RT۷۴۵
۹:۱	۱/۵	۴۵	۲	RT۶۰۴

در این فرایند عوامل چسبندگی توسط پیستوله روی نمونه‌ها با ضخامت ۵-۱۰ میکرومتر پاشش گردید. به منظور اعمال رنگ روی کلیه زیرلایه‌ها از دستگاه پاشش با فشار هوای ۱۵۰ psi و فاصله پیستوله تا نمونه ۲۵ سانتی متر استفاده شد.

۲) ۲) ۲) شرایط پخت نمونه‌های رنگ

به منظور پخت نمونه‌های رنگ، نمونه‌ها پس از اعمال رنگ به مدت ۱ ساعت در دمای محیط قرار گرفتند؛ تا حلال آن‌ها تبخیر گردد. سپس کلیه نمونه‌ها با توجه به مکانیزم پخت پوشش‌های سیلیکونی

دو جزئی پخت شونده در دمای محیط، در محفظه کنترل قرار داده شد. دما و زمان پخت با توجه به مکانیزم پخت رزین‌ها انتخاب شد [۳۲ و ۳۶].

۳) نتایج و بحث

۳) ۱) نتایج طراحی مرحله اول

۳) ۱) ۱) نتایج اندازه‌گیری میزان چسبندگی رنگ‌ها

نمونه‌های رنگ در شرایط طراحی شده روی زیرلایه آلومینیومی پاشیده شدند و بعد از خشک شدن و پخت نمونه‌ها تحت آزمون چسبندگی Pull-off قرار گرفتند. نتایج حاصل شده برای پوشش‌های ساخته شده با رزین RT745 در جدول ۶ آورده شده است. به منظور درک بهتر از آنالیز کیفی انجام گرفته، در شکل ۱ تصاویر گرفته شده از ناحیه تحت آزمون Pull off برای نمونه‌های ۳، ۵ و ۶ به عنوان مثال نشان داده شده است. آنالیز واریانس از نتایج با استفاده از نرم افزار Qualiteck4 در جدول ۷ نشان داده شده است.

لازم به ذکر است کربن سیاه قبل از استفاده به منظور حذف رطوبت به مدت ۲ ساعت در آون با درجه حرارت 100°C خشک شد [۳۱ و ۳۲]. آسیاب تا حصول اندازه ذرات کمتر از $5\mu\text{m}$ ادامه یافت. اندازه ذرات بر اساس استاندارد D_{10}^{121} به وسیله گریندومتر اندازه‌گیری شد [۳۳]. مخلوط جزء اول رزین، کربن سیاه و حلال زایلین بعد از آسیاب، با جزء دوم رزین بر اساس نسبت ذکر شده در جدول ۵ مطابق با محاسبات انجام شده و به منظور پخش شدن عامل دوم رزین به مدت کوتاهی آسیاب شد.

۲) ۲) ۲) روش‌های آماده‌سازی زیرلایه

آماده‌سازی کلیه زیرلایه‌های آلومینیومی به کار رفته در این تحقیق مطابق استاندارد آماده‌سازی سطوح آلومینیوم و آلیاژهای آن برای رنگ آمیزی مطابق استاندارد ASTM D ۱۷۳۰-۰۳ [۳۴] و استاندارد نظامی MIL-C-۵۵۴۱ [۳۵] انجام گرفت. به طور کلی معمولاً چهار نوع عملیات تمیز کاری با حلال، عملیات شیمیایی، عملیات آندی و عملیات مکانیکی جهت آماده‌سازی زیرلایه آلومینیومی برای رنگ آمیزی به کار می‌رود [۳۴]. در این تحقیق، عملیات مکانیکی، شیمیایی و آندی برای آماده‌سازی زیرلایه‌ها استفاده شد.

۲) ۲) ۲) اعمال عامل بهبوددهنده چسبندگی (APTES)

ترکیب عامل بهبود دهنده و حلال، دارای pH در حدود ۱۲ می‌باشد. با افزودن تدریجی اسید استیک و اندازه‌گیری pH محلول با استفاده از pH سنج، محلول‌هایی با اسیدیته‌های تعیین شده در طراحی آزمایش بدست آمد. محلول‌های حاصل با ضخامت ۵-۱۰ میکرومتر روی زیرلایه پاشش شد.

۲) ۲) ۲) روش اعمال رنگ روی زیرلایه

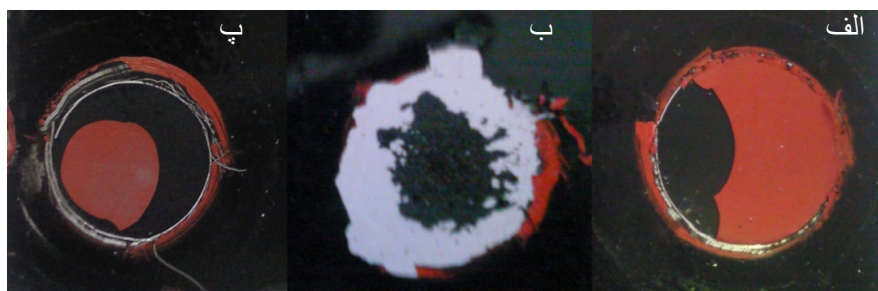
در تعدادی از نمونه‌ها قبل از اعمال رنگ روی زیرلایه‌ها مطابق جدول طراحی آزمایش‌ها، عوامل بهبوددهنده چسبندگی نظیر DW۱۲۰۰ و عامل چسبندگی APTES روی نمونه‌ها اعمال گردید.

نتایج نشان می‌دهد چسبندگی برای زیرلایه‌هایی که با حلال اتانول ساخته شده بودند بالاتر است و در $PH=7/5$ چسبندگی بهبود پیدا کرده است. نتایج آنالیز واریانس نشان می‌دهد؛ عوامل آماده سازی زیرلایه و مقدار pH محلول بهبوددهنده چسبندگی اثر کمتری را روی چسبندگی نمونه‌ها دارند و سهم اثر حلال بسیار بیشتر از دو متغیر دیگر است.

نتایج حاصل از آزمون چسبندگی برای رنگ‌های ساخته شده با رزین RT604 در جدول ۸ آورده شده است. همچنین تصاویر گرفته شده از ناحیه آزمون آزمون Pull-off برای نمونه‌های ۳، ۵ و ۷ با چسبندگی‌های مختلف به عنوان مثال در شکل ۲ نشان داده شده است. آنالیز واریانس از نتایج چسبندگی با استفاده از نرم‌افزار Qualitek4 در جدول ۹ نشان داده شده است.

جدول ۶) نتایج حاصل شده از آزمون چسبندگی برای رزین RTV45

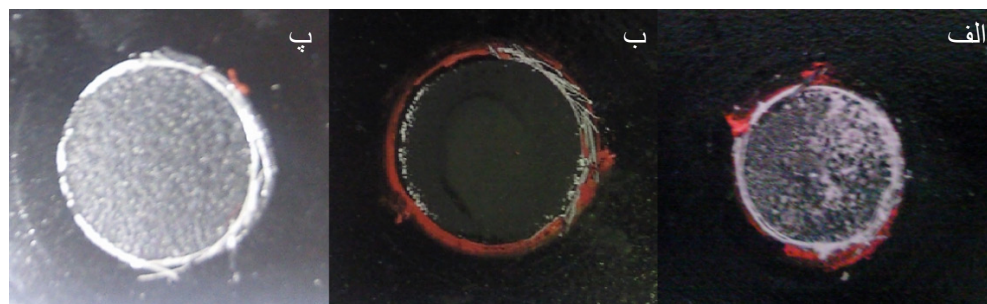
شماره آزمایش	بار اعمالی (psi)
۱	۷۲/۵۲
۲	۷۲/۵۲
۳	۱۴۰/۶۸
۴	۷۲/۵۲
۵	۱۵۰/۸۳
۶	۱۱۸/۹۳
۷	۱۲۰/۳۸
۸	۹۱/۳۷
۹	۶۲/۲۶



شکل ۱: تصاویر ناحیه آزمون Pull-off رزین RTV45 از نمونه‌های الف) نمونه شماره ۵ (ب) نمونه شماره ۶ (پ) نمونه شماره ۳

جدول ۷) جدول آنالیز واریانس (ANOVA) از نتایج چسبندگی رزین RTV45

عوامل	نماد	درجه آزادی (F)	مجموع مربعات (S)	واریانس (V)	نسبت (F)	درصد اثر هر فاکتور (P)
آماده سازی زیر لایه	A	۲	۰/۵۸	۰/۰۲۹	۹/۱۰۱	۸/۶۰۱
حلال برای محلول بهبود دهنده	B	۲	۰/۴۹۴	۰/۲۴۷	۷۶/۴۴۹	۸۰/۱۰۴
مقدار PH محلول بهبود دهنده چسبندگی	C	۲	۰/۰۴۹	۰/۰۲۴	۷/۶۲۷	۷/۰۴۷
خطا	-	۲	۰/۰۰۶	۰/۰۰۳	-	۴/۴۲۸
کل	-	۸	۰/۶۰۹	-	-	۱۰۰



شکل ۲) تصاویر ناحیه آزمون pull-off رزین RT604 از نمونه‌های الف) نمونه شماره ۳ (ب) نمونه شماره ۵ (پ) نمونه شماره ۷

۳) نتایج طراحی مرحله دوم

۳) (۱) ضخامت رنگها

با توجه به این که ضخامت رنگها جزء پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق نیست، لازم است در تمامی نمونهها مقدار آن یکسان باشد. بعد از خشک شدن و پخت نمونه مطابق شرایط ذکر شده ضخامت نمونهها مورد اندازه گیری قرار گرفت. اندازه گیری سه بار تکرار شد. نتایج حاصل از اندازه گیری ضخامت و محاسبه مقدار میانگین در جدول ۱۰ آورده شده است.

نتایج نشان می دهد نمونه بهینه توسط نرم افزار برای هر دو رزین شامل حلال اتانول، $PH=7/5$ و آماده سازی به روش آندایزینگ می باشد. نتایج آنالیز واریانس نشان می دهد؛ عوامل آماده سازی زیر لایه و مقدار pH محلول بهبوددهنده چسبندگی اثر کمتری را روی چسبندگی نمونه ها دارند و سهم اثر حلال بسیار بیشتر از دو متغیر دیگر است. در کل، با مقایسه نتایج آزمون چسبندگی برای دو رزین مشخص می شود رزین RT604 از چسبندگی بهتری نسبت به RT745 برخوردار است.

جدول ۸) نتایج حاصل شده از آزمون چسبندگی برای رزین RT604

بار اعمالی (psi)	شماره آزمایش
۱۲۰/۳۸	۱
۱۱۶/۰۳	۲
۲۳۰/۶۱	۳
۱۱۶/۰۳	۴
۲۴۲/۲۱	۵
۲۰۰/۱۵	۶
۱۹۴/۳۵	۷
۱۱۴/۵۸	۸
۱۱۶/۰۳	۹

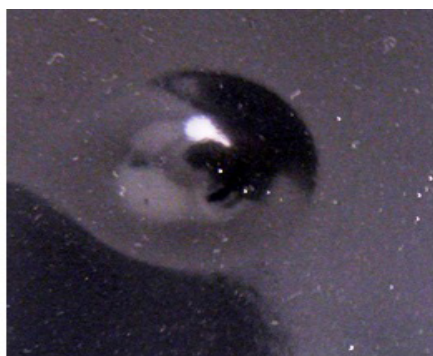
جدول ۹) جدول آنالیز واریانس (ANOVA) از نتایج چسبندگی رزین RT604

عوامل	نماد	درجه آزادی (F)	مجموع مربعات (S)	واریانس (V)	نسبت (F)	درصد اثر هر فاکتور (P)
آماده سازی زیر لایه	A	۲	۰/۳۰۴	۰/۱۵۲	۷/۷۴۳	۱۰/۲۷۲
حلال برای محلول بهبود دهنده	B	۲	۱/۹۸۷	۰/۹۹۳	۵۰/۶۰۹	۷۵/۵۹
مقدار PH محلول بهبود دهنده چسبندگی	C	۲	۰/۲۴۶	۰/۱۲۳	۶/۲۷۶	۸/۰۳۹
خطا	-	۲	۰/۰۳۹	۰/۰۰۳	-	۶/۰۹۷

جدول ۱۰) نتایج حاصل از اندازه گیری ضخامت نمونه های رنگ

ضخامت میانگین نمونه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
ضخامت (μm)	۲۳/۱	۲۴/۲	۲۲/۶	۲۱/۸	۲۲/۴	۲۵/۱	۲۴/۵	۲۳/۸	۲۳/۲

در شکل ۴ به عنوان مثال تصویر نمونه با کد ۷ که سطح آن تحت ضربه با ارتفاع ۴۵ cm قرار گرفته نشان داده شده است. همان گونه که در شکل نشان داده شده سطح ضربه و اطراف آن دچار هیچ گونه ترک خوردگی یا کندگی نشده است. زیرلایه آلومینیومی در آزمون ضربه با ارتفاع بیش از ۴۵ سانتیمتر دچار پارگی می شد. لذا در ارتفاع بیش از ۴۵ سانتیمتر آزمون ضربه انجام نشد. پلیمر سیلیکونی به دلیل انعطاف پذیری بالا و درصد ازدیاد طول زیاد، مقاومت به ضربه مناسبی دارد.



شکل ۴) تصویر نمونه با کد ۷ بعد از آزمون ضربه با ارتفاع ۴۵cm

جدول ۱۲) نتایج آزمون مقاومت به ضربه

شماره آزمایش	نتایج آزمون ضربه		
	۲۰cm	۳۵cm	۴۰cm
۱	قبول	قبول	قبول
۲	قبول	قبول	قبول
۳	قبول	قبول	قبول
۴	قبول	قبول	قبول
۵	قبول	قبول	قبول
۶	قبول	قبول	قبول
۷	قبول	قبول	قبول
۸	قبول	قبول	قبول
۹	قبول	قبول	قبول

۳) ۲) ۴) مقاومت به سایش رنگها

نمونه‌های رنگ در شرایط طراحی شده، تحت آزمون سایش قرار گرفتند. سپس کاهش جرم نمونه‌ها توسط ترازو تعیین گردید. نتایج حاصل شده در جدول ۱۳ آورده شده است. نمونه‌های با جرم کاهش یافته کمتر، مقاومت به سایش بالاتری از خود نشان داده اند. پس از طراحی آزمایش‌ها با استفاده از نرم افزار Qualiteck، آنالیز واریانس (ANOVA) به منظور تعیین درصد سهم اثرات اصلی فاکتورها، تعیین سهم اثرات متقابل، تعیین درصد سهم خطا

۳) ۲) ۲) مقاومت به خمش رنگها

نمونه‌های پاشش شده روی زیرلایه طبق طراحی آزمایش دوم بعد از پخت شدن تحت آزمون خمش قرار گرفتند و در جدول ۱۱ نتایج این آزمون آورده شده است. نمونه‌ها با سه میله استوانه‌ای ۴ و ۳ و ۲ میلیمتری آزمایش شدند که همه نمونه‌ها در مقابل هر سه میله مقاومت خوبی از خود نشان دادند و هیچ گونه ترک یا کشیدگی سطحی از خود نشان ندادند. در شکل ۳ نمونه ۴ رزین RT604 که تحت آزمون خمش با میله ۲ میلیمتر قرار گرفته شده، نشان داده شده است.



شکل ۳) نمونه شماره ۴ بعد از آزمون خمش توسط میله با قطر ۲ میلیمتر

جدول ۱۱) نتایج حاصل از آزمون خمش استوانه ای با قطر میله ۲، ۳ و ۴ mm.

شماره آزمایش	نتایج آزمون خمش		
	قطر میله ۴mm	قطر میله ۳mm	قطر میله ۲mm
۱	قبول	قبول	قبول
۲	قبول	قبول	قبول
۳	قبول	قبول	قبول
۴	قبول	قبول	قبول
۵	قبول	قبول	قبول
۶	قبول	قبول	قبول
۷	قبول	قبول	قبول
۸	قبول	قبول	قبول
۹	قبول	قبول	قبول

۳) ۲) ۳) مقاومت به ضربه رنگها

نمونه‌های رنگ پس از انجام کلیه آزمایش‌ها در شرایط طراحی شده روی زیرلایه آلومینیومی پاشش گردید. بعد از خشک شدن و پخت نمونه تحت آزمون ضربه با وزنه ۱ کیلوگرم با ارتفاع بیشینه ۴۵ cm قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمون ضربه در جدول ۱۲ آورده شده است. مشاهده می‌شود هر ۹ نمونه از مقاومت به ضربه خوبی برخوردارند و همگی این آزمون را با موفقیت پشت سر گذاشتند.

نتایج آنالیز واریانس نشان می دهد؛ درصد رنگدانه و رزین، به ترتیب بیشترین اثر را روی مقاومت سایش دارند و آماده سازی زیر آیند تاثیر چندانی بر مقاومت به سایش ندارد. با استفاده از نتایج جدول ANOVA و با کمک نرم افزار Qualiteck نمونه بهینه همان نمونه شماره ۷ معرفی شده در جدول ۲ طراحی آزمایش بود. اثر درصد رنگدانه و نوع رزین بر سایش در شکل ۵ نشان داده شده است.

در آزمایشات و تعیین شرایط بهینه و تخمین نتایج در شرایط بهینه توسط نرم افزار انجام گرفت. آنالیز واریانس از نتایج سایش در جدول ۱۴ نشان داده شده است. در جدول ۱۵ جدول ANOVA بعد از حذف فاکتور آماده سازی زیر آیند نشان داده شده است.

جدول ۱۳) نتایج کاهش جرم حاصل از سایش نمونه های رنگ

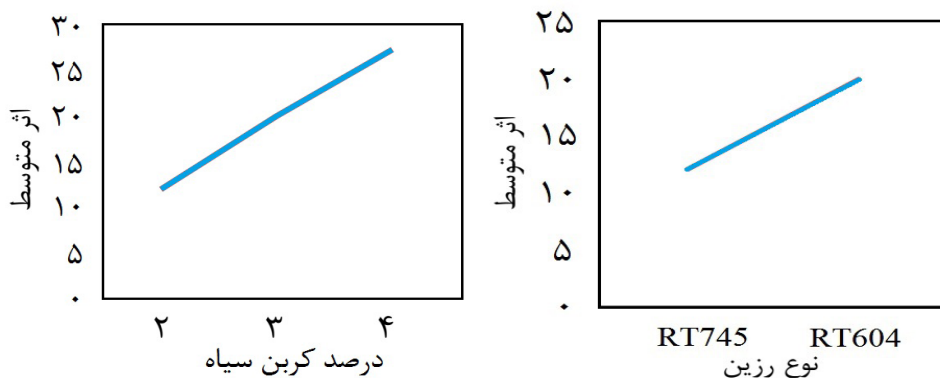
شماره آزمایش	کاهش جرم (میلی گرم)		
	نمونه اول	نمونه دوم	میانگین
۱	۲۸/۸	۳۰/۰	۲۹/۴
۲	۲۰/۱	۲۱/۴	۲۰/۷
۳	۳۱/۵	۳۳/۱	۳۲/۳
۴	۲۲/۱	۲۳/۵	۲۲/۸
۵	۲۴/۳	۲۲/۷	۲۳/۵
۶	۱۳/۴	۱۴/۱	۱۳/۷
۷	۲/۵	۱/۹	۲/۲
۸	۱۶/۷	۱۵/۷	۱۶/۲
۹	۱۷/۲	۱۸/۰	۱۷/۶

جدول ۱۴) جدول آنالیز واریانس (ANOVA) از نتایج سایش

عوامل	نماد	درجه آزادی (F)	مجموع مربعات (S)	واریانس (V)	نسبت (F)	درصد اثر هر فاکتور (P)
رنگدانه	A	۲	۳۵۸/۸۴۶	۱۷۹/۴۲۳	۲۴۷/۳۳۳	۵۴/۷۶۲
عامل بهبود دهنده چسبندگی	B	۲	۱۱/۵۵۳	۵/۷۷۶	۷/۹۶۲	۱/۵۴۷
رزین	C	۱	۲۸۰/۰۴۷	۲۸۰/۰۴۷	۳۸۶/۰۴۲	۴۲/۷۹۹
خطا	-	۳	۲/۱۷۵	۰/۷۲۵	-	۰/۸۹۲
کل	-	۸	۶۵۲/۶۲۳	-	-	۱۰۰

جدول ۱۵) جدول آنالیز واریانس (ANOVA) از نتایج سایش بعد از حذف فاکتور B

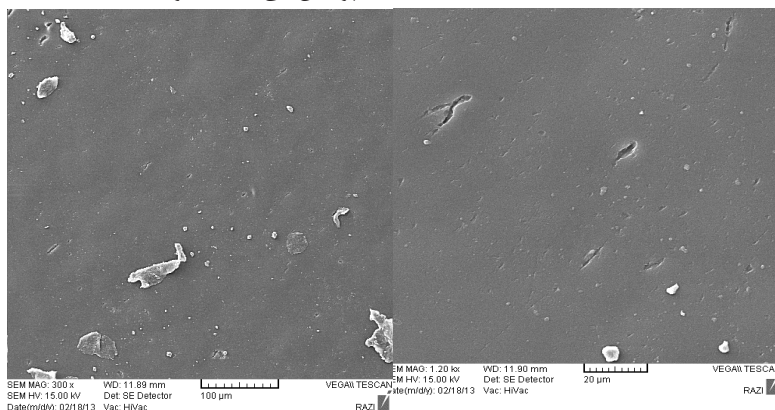
عوامل	نماد	درجه آزادی (F)	مجموع مربعات (S)	واریانس (V)	نسبت (F)	درصد اثر هر فاکتور (P)
رنگدانه	A	۲	۳۵۸/۸۴۶	۱۷۹/۴۲۳	۲۴۷/۳۳۳	۵۴/۱۴۳
عامل بهبود دهنده چسبندگی	B	۲	۱۱/۵۵۳	-	Pooled	-
رزین	C	۱	۲۸۰/۰۴۷	۲۸۰/۰۴۷	۳۸۶/۰۴۲	۴۲/۴۹
خطا	-	۳	۱۳/۷۲۹	۲/۴۴۵	-	۳/۳۶۷
کل	-	۸	۶۵۲/۶۲۳	-	-	۱۰۰



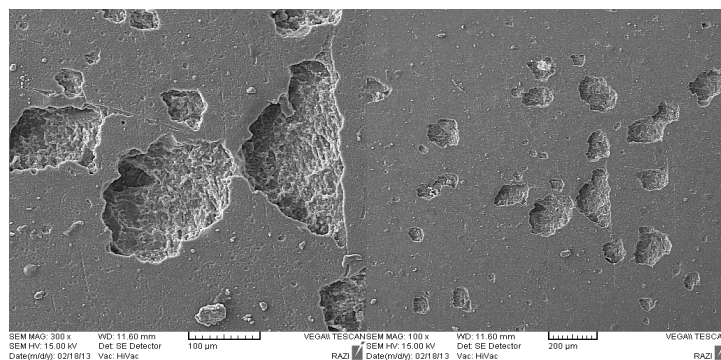
شکل ۵) اثر عامل رنگدانه و نوع رزین روی سایش رنگ‌ها

داشته و تکه‌های جدا شده از سطح ریز تر و کمتر از نمونه با ۳ درصد کربن می‌باشد. در شکل ۸ تصاویر میکروسکوپی از ذرات ساییده شده نمونه بهینه سایش (نمونه ۷) نشان داده شده است. دانه های درشت که در شکل با «A» مشخص شده است دارای ساختار پله ای می باشند که در اثر رشد ترک در اثر فرایند خستگی تشکیل شده و بر اثر باز و بسته شدن دهانه ترک به این شکل درآمدند؛ که حاکی از وجود مکانیزم خستگی در سایش این پوشش می‌باشد [۳۷ و ۳۸].

در شکل های ۶ و ۷ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح ساییده شده با بزرگنمایی های مختلف از سطوح نمونه بهینه آزمون سایش (نمونه ۷) و نمونه ای با ۳ درصد کربن (نمونه ۵) نشان داده شده است. با توجه به ایجاد شدن حفره ها که حاکی از کنده شدن قسمت‌هایی از پلیمر توسط جسم ساینده سخت است که باعث تشکیل یک تکه انتقالی می‌شود که نشان دهنده مکانیزم سایش در اثر چسبندگی می باشد [۳۷ و ۳۸]. در تصاویر مشخص است که نمونه با درصد کربن بیشتر (نمونه ۷) سایش کمتری

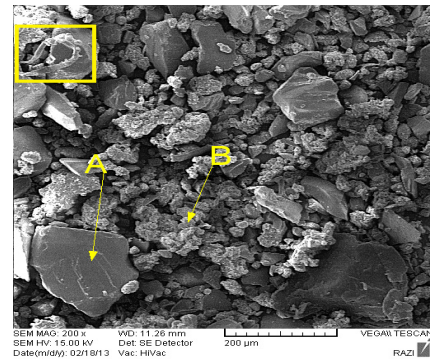


شکل ۶) تصاویر میکروسکوپی مربوط به نمونه ۷ با ۴ درصد کربن



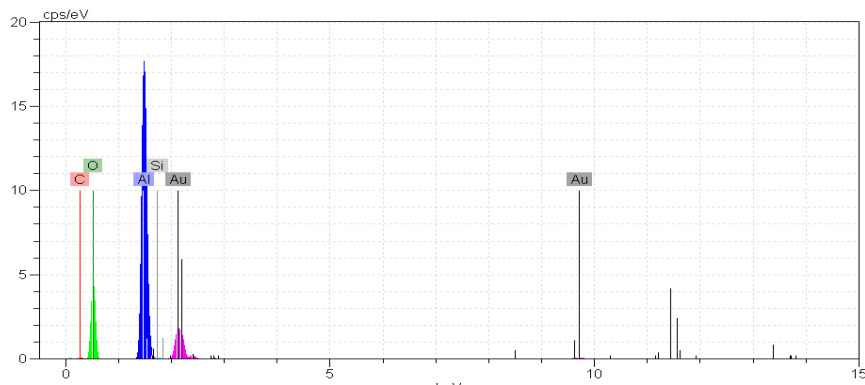
شکل ۷) تصاویر میکروسکوپی مربوط به نمونه بهینه با ۳ درصد کربن

نتایج آنالیز عنصری EDS از ذرات سایش که در شکل ۹ و ۱۰ و جدول های ۱۶ و ۱۷ آورده شده است. نتایج نشان می دهد درصد عنصر آلومینیوم در ذرات درشت نسبت به ذرات ریز بسیار بیشتر بوده است. با توجه به این که در ساختار جسم ساینده از آلومینا استفاده شده است، حضور آلومینیوم در ساختار این ذرات میتواند ناشی از انتقال معکوس از جسم ساینده به پلیمر باشد که در اثر ترکیب شدن سطح مقابل با لایه انتقالی صورت گرفته است که حاکی از وجود فرایند سایش فصل مشترکی می باشد. در ترکیب ذرات ریزتر عناصری نظیر تیتانیوم، سدیم و پتاسیم و... دیده می شود. به نظر می رسد در ترکیب اصلی رزین مصرفی وجود داشته اند. عدم وجود این عناصر در ذرات درشت نشان از ترکیب شدگی زیاد پلیمر با سطح مقابل می باشد.



شکل ۸) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ذرات ناشی از سایش از نمونه بهینه

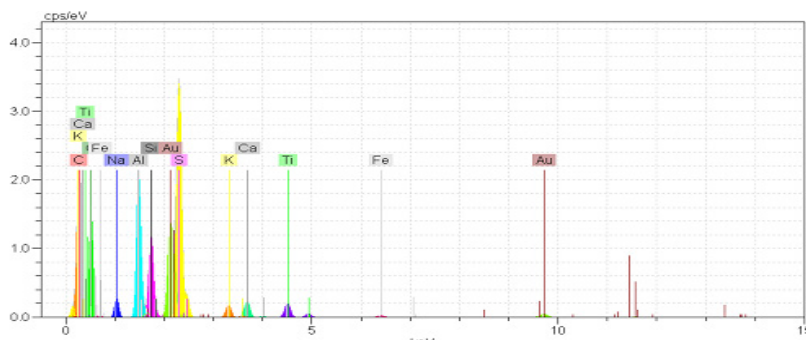
در اثر سایش پیوستگی، ذرات با غلتیدن بین سطوح لغزان به شکل کشیده شده و حلقوی درمی آیند که حاکی از وجود مکانیزم سایش با نام تشکیل حلقه می باشد [۳۷].



شکل ۹) نتایج آنالیز عنصری EDS از ذرات درشت

جدول ۱۶) نتیجه آنالیز عنصری از ذرات درشت ناشی از سایش

عنصر	C	O	Au	Al	Si
خط غلظت (%wt)	۱/۲	۴۲/۵	۲۲/۵	۳۳/۵۵	۰/۲۵
	Ka	Ka	Ka	Ka	Ka
	۱۰۰				



شکل ۱۰) نتایج آنالیز عنصری EDS از ذرات ریز

جدول ۱۷) نتایج آنالیز عنصری EDS از ذرات ریز ناشی از سایش

عنصر	C	O	Na	Al	S	K	Ca	Ti	Fe	Au	-
خط غلظت (%wt)	Ka	Ka	Ka	Ka	Ka	Ka	Ka	Ka	Ka	Ka	-
	۹/۸۴	۳۷/۱۰	۱/۴	۷/۵۹	۱۴/۴۱	۱۴/۴۱	۱/۷۳	۳/۰۶	۰/۵۱	۲۳/۳۴	۱۰۰

۳) ۲) ۵) چسبندگی رنگ‌ها

نمونه‌های رنگ در شرایط طراحی شده تحت آزمون چسبندگی Pull off قرار گرفتند. نتایج حاصل شده به صورت کمی در جدول ۱۸ آورده شده است. آنالیز واریانس از نتایج سایش با استفاده از نرم افزار Qualiteck^۴ در جدول ۱۹ نشان داده شده است. نتایج چسبندگی برای نمونه‌ها نشان می‌دهد که چسبندگی برای پوشش‌هایی که از آستری برای بهبود خواص چسبندگی استفاده کرده اند از واش پرایمر و عامل بهبود دهنده بهتر می‌باشد. همچنین چسبندگی برای درصدهای مختلف رنگدانه به ترتیب زیر است (رابطه ۱):

$$4\% > 2\% > 3\% \text{ درصد} \quad (1)$$

نتایج آنالیز واریانس نشان می‌دهد؛ عوامل آماده سازی زیرلایه و رنگدانه به ترتیب با توجه به اثر گذاری بالا روی شرایط فصل مشترک بین زیرلایه و پوشش بالاترین اثر گذاری را روی چسبندگی دارند و پس از آن‌ها رزین مورد استفاده، روی نتایج اثر گذار است (رابطه ۲). در شکل ۱۱ نمودارهای عوامل روی چسبندگی پوشش نشان داده شده است.

$$B > A > C \quad (2)$$

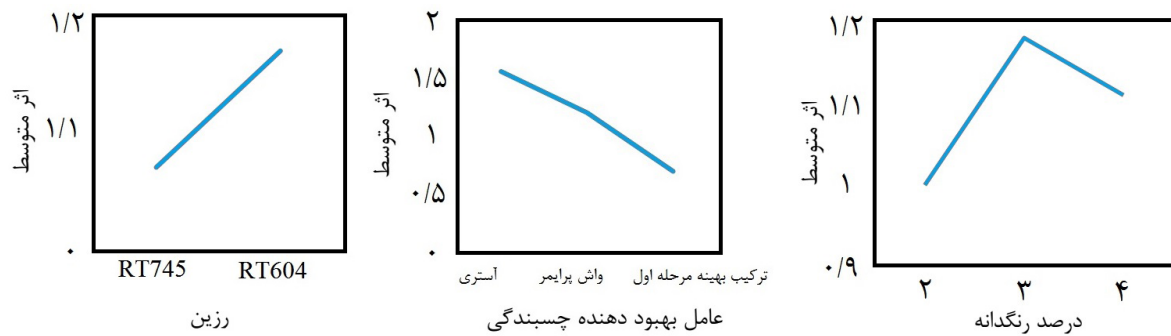
با توجه به آزمون های چسبندگی انجام شده مشخص شد، افزودن عامل چسبندگی بیشترین درصد اثر سهم را در تغییرات چسبندگی پوشش بر زیرلایه دارد. در این عامل بهبوددهنده چسبندگی آستری Dow Corning، واش پرایمر و عامل چسبندگی سیلانی APTES به ترتیب بیشترین مقادیر چسبندگی را دارا می‌باشند.

جدول ۱۸) نتایج حاصل شده از آزمون چسبندگی

شماره آزمایش	بار اعمالی (psi)
۱	۳۹۸/۸۵
۲	۳۲۶/۳۳
۳	۱۵۰/۸۳
۴	۴۶۱/۲۲
۵	۴۱۳/۳۵
۶	۲۴۶/۵۶
۷	۴۴۶/۷۱
۸	۲۹۷/۳۲
۹	۲۴۰/۷۶

جدول ۱۹) جدول آنالیز واریانس (ANOVA) از نتایج چسبندگی

عوامل	نماد	درجه آزادی (F)	مجموع مربعات (S)	واریانس (V)	نسبت (F)	درصد اثر هر فاکتور (P)
رنگدانه	A	۲	۱/۱۹۳	۰/۵۹۶	۹/۰۵۱	۲۶/۶۸۱
آماده سازی زیر لایه	B	۲	۲/۲۸۱	۱/۱۱۲	۱۷/۲۹۹	۵۴/۰۱۱
رزین	C	۱	۰/۳۰۶	۰/۳۰۶	۴/۶۵۲	۶/۰۵۱
خطا	-	۳	۰/۱۹۷	۰/۰۶۵	-	۱۳/۲۵۷
کل	-	۸	۳/۹۸	-	-	۱۰۰



شکل (۱۱) اثر عوامل مختلف روی چسبندگی پوشش

با توجه به جدول ANOVA و محاسبات برنامه Qualiteck^۴ نمونه بهینه مشخص شد. مشخصات نمونه بهینه تعیین شده در جدول ۲۰ آورده شده است. نمونه بهینه معرفی شده توسط نرم افزار در نمونه های قبلی ساخته شده در طراحی آزمایش وجود نداشته و پس از تعیین سطوح متغیرها ساخته شده تحت آزمون چسبندگی قرار گرفت.

چسبندگی این نمونه تعیین شده توسط نرم افزار پس از ساخت و اعمال روی زیرلایه، توسط آزمون Pull-Off بررسی شد. مقدار بدست آمده در آزمون تقریباً با مقدار پیش بینی شده توسط نرم افزار برابر بوده و مقداری در حدود ۴۶۵/۵۷ psi را دارا بود.

۴ نتیجه گیری

عموماً چسبندگی رنگ های سیلیکونی روی زیرآیند اندک می باشد. در این تحقیق با طراحی آزمایش های مختلف چسبندگی این رنگ روی زیرآیند بهبود داده شد. بررسی تغییرات در ترکیب بهبوددهنده چسبندگی سیلانی نشان داد اثر تغییر در نوع حلال درصد اثر سهم بیشتری نسبت به تغییرات در اسیدیته دارد. آزمون چسبندگی نشان داد در محلول بهبوددهنده چسبندگی سیلانی، حلال اتانول چسبندگی بهتری را نتیجه می دهد. بررسی سایش رنگ ها نشان داد پارامتر نوع رزین و درصد رنگدانه روی مقاومت به سایش موثر بوده و عوامل بهبوددهنده چسبندگی و آماده سازی زیرلایه اثر چندانی ندارند. نتایج آزمون خمش و ضربه حاکی از انعطاف پذیری

نتایج حاکی از آن است که درصد اثر سهم رنگدانه بر چسبندگی، بعد از آماده سازی، در رده دوم قرار دارد. همان طور که از نتایج مشخص است، با افزایش درصد رنگدانه تا ۳ درصد، چسبندگی افزایش یافته است. این را می توان به افزایش انسجام پوشش مرتبط دانست [۳۹]. توضیح منطقی این رویداد می تواند افزایش مدول الاستیک پوشش باشد. این افزایش به این دلیل است که مدول الاستیک ذرات کربن در مقایسه با رزین سیلیکونی خالص بالاتر است، لذا افزایش رنگدانه منجر به افزایش مدول پوشش و در نتیجه افزایش چسبندگی پوشش خواهد شد. این رویداد به این دلیل رخ می دهد که با افزایش مدول لغزش سطوح در فصل مشترک کاهش پیدا کرده و در نتیجه انرژی لازم برای جدایش در فصل مشترک افزایش پیدا می کند. علاوه بر این، همبستگی مکانیکی را می توان به عنوان یک نیروی محرک برای افزایش قدرت چسبندگی در نظر گرفت. در این صورت با افزایش مقدار رنگدانه سطح چقرمه تر می شود [۱۸]. افزایش بیشتر ذرات رنگدانه منجر به کاهش چسبندگی می شود. دلیل این کاهش می تواند مربوط به تجمع ذرات و مشکل عدم پراکنده شدن آنها باشد [۳۹]. همچنین افزایش ذرات احتمال جذب انرژی وارد شده خارجی را کاهش می دهد و باعث کاهش انعطاف پذیری پوشش می شود. در نتیجه با افزایش مقدار رنگدانه به ۴ درصد، با کاهش چسبندگی مواجه هستیم [۱۸ و ۳۹].

جدول ۲۰) مشخصات نمونه بهینه نسبی تعیین شده توسط نرم افزار برای حداکثر مقاومت چسبندگی

عوامل	نماد	سطح	مشخصات سطح
رزین	A	۲	RT604
رنگدانه	E	۲	۳ درصد
عوامل بهبود دهنده چسبندگی	F	۱	پاشش آستری
نتیجه مورد انتظار برای مقدار بهینه (psi)			۴۶۷/۰۲

[۸] Jerschow P., Silicone elastomers, Rapra review reports, Report 137, Volume 12, Number 2001, 5.

[۹] Odian G., Principles of polymerization, Fourth Edition, John Wiley & Sons, Inc, New York, 2004.

[۱۰] Barekat M, Thesis: Evaluation of black thermal control coating on spacecraft, Maleke-ashtar University of Technology, Iran, 2011.

[۱۱] Sun J.T., Huang Y.D., Cao H.L., Gong G.F., Effects of ambient-temperature curing agents on the thermal stability of poly(methylphenylsiloxane), Polymer Degradation and Stability .85, 2004, 725-731

[۱۲] Deshpande G., Rezac M.E., Kinetic aspects of the thermal degradation of poly (dimethylsiloxane) and poly (dimethyl diphenyl siloxane), Polymer Degradation and Stability 76, 2002, 17-24

[۱۳] Duo S., Li M., Zhu M., Zhou Y., Polydimethylsiloxane/silica hybrid coatings protecting kapton from atomic oxygen attack, Materials Chemistry and Physics 112, 2008, 1093-1098.

[۱۴] Buxbaum G., Industrial Inorganic Pigments, Second, Edition, Edited by Weinheim, WILEY-VCH, 1998.

[۱۵] Barekat M, Shoja Razavi R, Bastani S, Effect of Carbon Black Pigment on the Surface Resistivity of the Black Silicone Thermal Control Coating, Advanced Materials Research Vols. ,2012, 472-475 110-113

[۱۶] Keen K.M., Effect of conductive thermal-control paint on spacecraft antenna performance, Electronics Letters 11, 1975, 200-203

[۱۷] کیهان ندا، شجاع رضوی رضا، ساخت و ارزیابی رنگ کنترل حرارتی سفید سیلیکونی، نشریه علمی پژوهشی علوم و فناوری رنگ ۶، ۱۳۹۱، ۲۳۳-۲۳۹.

[۱۸] میرحسینی سید صابر، شجاع رضوی رضا، طاهران مهرداد، برکت سید مسعود، ساخت و اعمال رنگ کنترل حرارتی سیاه پلی اورتانی بر آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ و ارزیابی خواص آن، نشریه علمی پژوهشی مواد پیشرفته و پوشش‌های نوین ۱۰، ۱۳۹۳، ۶۸۷-۷۰۰.

و مقاومت بالای مکانیکی این پوشش بود. پوشش ساخته شده با استفاده از رزین سیلیکونی RT604 و ۳ درصد رنگدانه printex v که روی زیرلایه آلومینیوم با عامل بهبوددهنده چسبندگی DW1200 پاشش شده بود، دارای خواص مطلوبی است. می‌توان گفت این رنگ می‌تواند بسیاری از خواص رنگ‌های کنترل حرارتی فضایی را داشته باشد. بنابراین به عنوان پوشش بهینه حاصل از این تحقیق معرفی گردید.

۵ مراجع

[۱] Gilmore D.G, Spacecraft thermal control Handbook: Fundamental Technologies, 2nd edition, The Aerospace Press, California, 2002.

[۲] Savage C.J., Thermal control of spacecraft systems engineering, 3rd edition, John Wiley & Son, New York, 2004.

[۳] Uleck K. R., Biermann P. J., Roberts J. C., Hilditch B. M., Spacecraft applications of advanced composite materials, Handbook of Materials Selection, John Wiley & Sons Inc., New York, 2002.

[۴] Harada Y, Deshpandoe M, Requalification of white thermal control coatings, IIT research institute, Chicago, 1994.

[۵] Berman E.S, Johnson J.A, Mantz R.A, Meltzer P.S, Spacecraft material development program for thermal control coating space environments testing, Materials and Manufacturing Directorate, Air Force Research Laboratory, 2004.

[۶] Tonon C., Lavielle D., Guevel M. L., Duvignacq C., Evolution of thermo-optical properties and conductivity of a white space paint in geostationary environment, Proceedings of the 9th International Symposium on Materials in a Space Environment, Netherlands, 2003, 415-421 .

[۷] Wacker Chemie, Bonding, sealing, potting/ encapsulating and coating with RTV silicone rubber compunds, www.wacker.com, Last modified: jan 18 2013.

[۲۹] Standard Test Method for Measurement of Coating Thicknesses by the Magnetic Method: Electrodeposited Nickel Coatings on Magnetic and Nonmagnetic Substrates, ASTM International, B,530 2003.

[۳۰] برکت سید مسعود ، شجاع رضوي رضا، باستانی سعید ، تهیه پوشش کنترل حرارتی سیلیکون سیاه و بررسی اثر اکسیژن اتمی بر روی آن، نشریه علمی پژوهشی علوم و فناوری رنگ ، ۶، ۱۳۹۱، ۱۸۱-۱۹۰.

[۳۱] استوار شمس الدین ، پوشش‌های آلی، چاپ دوم، انجمن خوردگی ایران، ۱۳۸۹.

[۳۲] Wacker, Technical data sheet for Elastosil® RT604 A/B RTV2- Version: 1.0, www.wacker.com, Last modified: june 2008.

[۳۳] Standard Test Method for Fineness of Dispersion of Pigment Vehicle Systems by Hegman-Type Gage, ASTM International, D2010 ,05 – 1210.

[۳۴] Standard Test Method for Preparation of aluminum and aluminum alloy surface for painting, ASTM International, D 2003 ,03-1730.

[۳۵] Military Specification, Chemical conversion coatings on aluminum and aluminum alloys, MIL-C1990 ,41-55.

[۳۶] Wacker, Technical data sheet for Elastosil® RT745 A/B RTV2- Version: 1.0, www.wacker.com, Last modified: june 2008.

[۳۷] هاتچینگز آی، ام، تریبولوژی؛ اصطکاک و سایش مواد مهندسی، مترجم: سعیدرضا بخشی، انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ۱۳۸۳.

[۳۸] Barekat M. Shoja Razavi R., Bastani S., Wear behavior of silicone rubber/carbon black coatings on 6061 aluminum alloy surfaces, Progress in Organic Coatings 285 –277 ,2013 ,76.

[۳۹] S.M. Mirabedini, M. Mohseni, Sh. PazokiFard, M. Esfandeh, Effect of TiO₂ on the mechanical and adhesion properties of RTV silicone elastomer coatings, Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 86–80 ,2008 ,317.

[۱۹] میرحسینی سید صابر، شجاع رضوی رضا، طاهران مهرداد، برکت سید مسعود، ارزیابی خواص نوری-حرارتی پوشش کنترل حرارتی سیاه پلی‌اورتانی و بررسی اثر اکسیژن اتمی روی آن ، نشریه علمی پژوهشی مواد پیشرفته و پوشش‌های نوین ۱۱، ۱۳۹۳، ۷۶۳-۷۶۷.

[۲۰] Elgindy N., Samy W., Evaluation of the Mechanical properties and drug release of Cross-linked eudragit films containing metronidazole, International Journal of Pharmaceutics, 376 ,2009,-1 6.

[۲۱] Maruthan K., Dhoke S.K., Palraj S., Selvaraj M., Performance of black pigments incorporated in interpenetrating polymer network (IPN), Progress in Organic Coatings 58–53 ,2006 ,56.

[۲۲] Esfandeh M., Mirabedini S.M., Pazokifard S., Tari M., Study of Silicone coating adhesion to an epoxy undercoat using silane compounds effect of silane type and application method, Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects ,2007 ,302 16–11.

[۲۳] Maeda K., Bismarck A., Briscoe B., Effect of bulk deformation on rubber adhesion, Department of Chemical Engineering, Volume -1016 ,2007 ,263 1022.

[۲۴] شجاع رضوی رضا ، برکت سید مسعود ، کیومرثی‌پور نرگس ، قانی کمال، باستانی سعید، ارزیابی خواص نوری-حرارتی و چسبندگی پوشش‌های به کار رفته در ماهواره، نشریه علمی پژوهشی علوم و مهندسی سطح ۱۳، ۱۳۹۱، ۷۹-۸۹.

[۲۵] Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test, ASTM International, D2003 ,3359.

[۲۶] Standard Test Methods for Mandrel Bend Test of Attached Organic Coatings, ASTM International, D2008 ,93-522.

[۲۷] Standard Test Method for Resistance of Organic Coatings to the Effects of Rapid Deformation (Impact), ASTM International, D2010 ,93-2794.

[۲۸] Standard Test Method for Abrasion Resistance of Organic Coatings by the Taber Abraser, ASTM International, D2010 ,10-4060.