مجله علمی پژوهشی «علوم و فناوری‌های پدافند نوین»
سال ششم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۴؛ ص ۶۴-۵۵

ساخت و ارزیابی پوشش کامپوزیتی پلی وینیلیدن فلوراید-کربنات کلسیم برای استتار اهداف در مناطق برفی

عباس بشارتی سیدانی[1*]، علی مهتدی‌زاده[2]

۱- استادیار ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(دریافت: ۹۳/۰۴/۱۰، پذیرش: ۹۳/۱۱/۱۵)

چکیده

شناسایی اهداف نظامی و غیرنظامی در مناطق برفی توسط حس‌گرهای فرابنفش دشمن باعث بروز تلفات جانی و خسارات مالی فراوانی شده است. انجام تحقیق حاضر راهی در جهت کاهش دید فرابنفش دشمن و استتار اهداف نظامی و غیرنظامی است. برای استتار این‌گونه اهداف در محیط‌های برفی باید از پوشش‌هایی استفاده نمود که علاوه بر انعکاس مرئی، انعکاس فرابنفش مشابه برف داشته باشند. موادی که انعکاس مرئی و فرابنفش بالایی دارند معمولاً به شکل پودر بوده و نیاز است تا در زمینه‌ای پراکنده شوند. در این تحقیق از پلی وینیلیدن فلوراید به عنوان زمینه و از کربنات کلسیم به‌عنوان پرکننده برای ساخت پوشش‌های کامپوزیتی استفاده شد. همانندسازی رفتار طیفی پوشش‌های کامپوزیتی با برف، با شناخت پارامترهای مؤثر بر ساخت و بهینه‌سازی آن‌ها صورت گرفت. در نهایت پوشش کامپوزیتی تحت شرایط بهینه (نسبت PVDF به DMF ۵ درصد وزنی/وزنی، نسبت $CaCO_3$ به $PVDF+CaCO_3$ ۵۰ درصد وزنی/وزنی، دمای خشک شدن لایه کامپوزیت ۳۵ درجه سانتی‌گراد و حجم مخلوط مایع مورد استفاده برای تهیه لایه کامپوزیت ۳ میلی‌لیتر) ساخته شد و آن‌گاه طیف انعکاسی آن با طیف انعکاسی پوشش‌های استتار برفی ناتو در دو ناحیه مرئی و فرابنفش مقایسه شد. نتایج نشان داد که میزان انعکاس پوشش کامپوزیتی تولیدی در محدوده مجاز پوشش‌های استتار برفی استاندارد ناتو قرار داشته و بنابراین می‌تواند به‌عنوان پوشش استتاری برای پنهان‌سازی اهداف نظامی و غیرنظامی در مناطق پوشیده از برف مورد استفاده قرار گیرد.

کلید واژه‌ها: تابش فرابنفش، پوشش استتار برفی، طیف انعکاسی، کامپوزیت، کربنات کلسیم.

Fabrication and Evaluation of polyvinylideneFluoride-Calcium Carbonate Composite Coating for Camouflage of Targets in Snowy Environments

A. Besharati-Seidani[*] and A. Mohtadizade
Malek Ashtar University of Technology

(Received: 01/07/2014; Accepted: 04/02/2015)

Abstract

The detection of military and civilian targets in the snowy regions by enemy ultraviolet sensors has caused great loss of life and property damage. This research is a way to reduce the enemy's ultraviolet vision and camouflage of military and civilian targets. For camouflage of these targets in the snowy environments, coatings materials, that have both the visible and ultraviolet reflectance similar to that of snow, should be used. The materials that have high visible and ultraviolet reflectance are usually in the powder form and need to be dispersed in a matrix. In this study, the polyvinylidene fluoride and calcium carbonate were used as a matrix and filler, respectively, to fabricate composite coatings. Assimilating of the spectral behavior of the composite coatings with snow was performed via the identification and optimization of the factors affecting their fabrication. The composite coating was prepared under optimal conditions (PVDF to DMF ratio; 5 %W/W, $CaCO_3$ to $PVDF+CaCO_3$ ratio; 50 %W/W, composite layer drying temperature; 35 °C and volume of liquid mixture for the preparation of composite layer; 3ml) and then its reflection spectrum was compared with NATO snow camouflage coatings in both visible and ultraviolet regions. The results showed that the reflection of the produced composite coating is in the range covered by NATO standard snow camouflage coatings, and thus can be used as a camouflage coating to hide the military and civilian targets in the snowy environments.

Keywords: Ultraviolet Radiation, Snow Camouflage Coatings, Reflectance Spectrum, Composite, Calcium Carbonate.

[*]Corresponding Author E-mail: abbasbesharati@yahoo.com

۱. مقدمه

حس‌گرهای شناساگر دشمن با دریافت و آنالیز امواج الکترومغناطیس ساطع شده از نفرات، جنگ‌افزارها، تجهیزات و سامانه‌ها به شکل فعال و غیرفعال به تشخیص و شناسایی آن‌ها می‌پردازند [۱]. یکی از روش‌هایی که امروزه در دفاع از اهداف در برابر این نوع حسگرها کاربرد عمده‌ای پیدا کرده است، استتار و روش‌های متداول آن است [۲]. حسگرهای شناساگر و نیز استتار در برابر این نوع حسگرها معمولاً در پنج ناحیه از طیف الکترومغناطیس صورت می‌گیرد. این نواحی عبارتند از: فرابنفش، مرئی، مادون‌قرمز نزدیک، مادون‌قرمز حرارتی و امواج راداری [۳ و ۴].

تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در مورد استتار در نواحی مختلف طیفی صورت گرفته است اما در زمینه استتار در ناحیه امواج فرابنفش اطلاعات چندانی در دسترس نیست .یکی از مهم‌ترین موارد در زمینه استتار در ناحیه فرابنفش مربوط به محیط‌های برفی است. در صورتی که برای استتار اهداف در زمینه برفی از رنگ‌آمیزی با رنگ سفید یا پوشش‌های سفیدرنگ استفاده شود، ممکن است دشمن با حسگرهای مرئی خود نتواند آن‌ها را تشخیص دهد اما با تغییر حسگر خود از مرئی به فرابنفش به راحتی قادر به تشخیص و شناسایی اهداف مورد نظر خواهد بود. برف بین ۹۵-۸۰ درصد امواج فرابنفش را منعکس می‌کنند در حالی که پوشش‌های طبیعی و مصنوعی مورد استفاده در نواحی برفی، کمتر از ۲۰ درصد امواج فرابنفش را منعکس می‌کنند. بنابراین برف توسط حسگر فرابنفش به رنگ سفید و پوشش‌های طبیعی و مصنوعی به رنگ تیره دیده شوند. ایجاد کنتراست منفی بین برف و هدف، باعث تشخیص و شناسایی اهداف مورد نظر در زمینه برفی می‌شود. اساس مقابله با حسگرهای مرئی- فرابنفش دشمن طراحی و ساخت پوشش‌های سفید مدرن با مشخصات انعکاس برف می‌باشد [۳ و ۵].

تابش فرابنفش محدوده طول‌موج‌های ۳۸۰-۱۰۰ نانومتر را شامل می‌شود که به سه دسته تقسیم می‌شوند: تابش فرابنفش C (۲۸۰-۱۰۰ نانومتر)، تابش فرابنفش B (۲۸۰-۳۱۵ نانومتر) و تابش فرابنفش A(۳۱۵-۳۸۰ نانومتر) [۶].

حسگرهای شناساگر به دو شکل امواج منعکس شده از اهداف را دریافت می‌کنند و بر این اساس بر دو نوع‌اند: حسگرهای فعال و غیرفعال. حسگرهای فعال خود دارای مولد انرژی الکترومغناطیس هستند. امواج تولیدی خود را به طرف هدف مورد نظر فرستاده و بازتاب آن را جمع‌آوری و ثبت می‌کنند. حسگرهای غیرفعال خود دارای مولد انرژی الکترومغناطیس نیستند بلکه انعکاس امواجی را که منابع دیگر به اشیاء موجود در طبیعت می‌تابانند را دریافت و ثبت می‌کنند [۱].

حسگرهای مرئی-فرابنفش غیر فعال، معمولاً انعکاس امواجی که خورشید به اشیاء موجود در طبیعت می‌تابانند را جمع‌آوری و ثبت می‌کنند. بنابراین منبع تولید امواج، خورشید است. خورشید امواج پیوسته‌ای از فرابنفش تا مادون‌قرمز نزدیک به سمت زمین تابش می‌کند.

تابش فرابنفش UVC خورشید پس از آنکه در ارتفاع ۵۰ کیلومتری به سقف استراتوسفر رسید توسط مولکول‌های اکسیژن تماماً جذب شده و در اثر این جذب، مولکول اکسیژن به دو اتم اکسیژن شکسته می‌شود و مقداری گرما نیز آزاد می‌شود و اتم‌های اکسیژن تولید شده با یک مولکول O_2 واکنش داده و مولکول ازن در این ارتفاع تولید می‌شود [۷].

خوشبختانه لایه ازن شدت تابش فرابنفش UVB وارد شده به جو را نیز کاهش می‌دهد. بنابراین UVC اصلاً وارد جو زمین نمی‌شود، UVB به میزان کمی وارد شده و UVA از همه بیشتر به جو زمین وارد می‌شود [۷].

حسگرهای مرئی غیرفعال انعکاس امواج خورشیدی را در بازه ۷۶۰ -۳۸۰ نانومتر و حسگرهای فرابنفش غیر فعال انعکاس این امواج را در بازه ۳۸۰ -۳۲۰ نانومتر (به ویژه در ۳۵۰ نانومتر) دریافت و ثبت می‌کنند. بر این اساس در تحقیق حاضر طیف‌گیری از نمونه‌ها در بازه ۷۶۰ -۳۲۰ نانومتر صورت خواهد گرفت.

با توجه به مطالب ارائه شده، طراحی و ساخت پوشش‌های استتار دو طیفی که توانایی استتار اهداف مورد نظر را در هر دو ناحیه مرئی و فرابنفش داشته باشد، اهمیت و ضرورت این تحقیق را نشان می‌دهد.

رنگ‌های سفیدی که معمولاً برای رنگ‌آمیزی استفاده می‌شوند حاوی دی‌اکسید تیتانیوم (به عنوان رنگ‌دانه سفید) می‌باشند، در صورتی که اهداف و تجهیزات نظامی با این نوع رنگ، رنگ‌آمیزی شوند، به راحتی شناسایی و کشف می‌شوند زیرا اگرچه این ماده سفیدرنگ است و باعث استتار اهداف در برابر حسگرهای مرئی دشمن می‌شود، اما در صورتی که دشمن از حسگرهای فرابنفش خود به جای مرئی استفاده نماید، پوشش‌های استتاری حاوی این ماده، تیره دیده شده در حالی که برف روشن دیده می‌شود. زیرا دی‌اکسید تیتانیوم موجود در این رنگ‌ها، جاذب قوی تابش فرابنفش بوده در حالی که برف شدیداً تابش فرابنفش را منعکس می‌کند. بنابراین چنین پوشش‌هایی در ناحیه فرابنفش کارایی لازم را نداشته و اهداف نظامی به راحتی توسط دشمن کشف و منهدم خواهند شد.

بررسی‌های انجام شده در منابع مختلف علمی نشان داد که برای استتار اهداف نظامی در مناطق برفی معمولاً از رنگ‌های حاوی دی‌اکسید زیرکونیم (به عنوان رنگ‌دانه سفید) برای پوشش‌دهی آن‌ها استفاده می‌شود. استفاده از دی‌اکسید زیرکونیم در مقایسه با دی‌اکسید تیتانیوم، خواص استتاری رنگ را در ناحیه فرابنفش بهبود می‌بخشد اما همچنان اهداف رنگ‌آمیزی شده با آن قابل تشخیص می‌باشند. عیب دیگر به‌کارگیری آن جرم مولکولی زیاد آن است. جرم بالای آن در مقایسه با جرم دی‌اکسید تیتانیوم باعث می‌شود تا وزن کلی پوشش زیاد شود در حالی که سبک‌سازی در بحث‌های نظامی مقوله‌ای حائز اهمیت است [۸].

در این تحقیق پس از ارزیابی طیفی انواع موادی که انعکاس فرابنفش بالایی دارند، اقدام به ساخت پوششی کامپوزیتی برای استتار اهداف نظامی در محیط‌های برفی گردید. برای ساخت این پوشش کامپوزیتی از پلی وینیلیدن فلوراید به عنوان زمینه و از کربنات کلسیم به عنوان پرکننده استفاده شد. پارامترهای مؤثر بر ساخت بررسی و بهینه‌سازی

شدند. در نهایت پوششی تحت شرایط بهینه ساخته شده و رفتار طیفی آن با نمودار انعکاسی استاندارد ناتو مورد مقایسه قرار گرفت.

ساخت پوشش‌های استتار برفی به منظور استفاده از آن‌ها برای استتار دو طیفی اهداف نظامی در نواحی برفی در برابر حسگرهای مرئی- فرابنفش دشمن به منظور کاهش تلفات جانی و خسارات مالی در هنگام جنگ، اهمیت و ضرورت این تحقیق را نشان می‌دهد.

۲. روش تحقیق

۲-۱. مواد و دستگاه‌ها

پودرهای کربنات کلسیم، اکسید منیزیم، دی‌اکسید زیرکونیوم، دی‌اکسید تیتانیوم، تفلون و آلومینیم با خلوص بالا از شرکت مرک تهیه شد. پلیمر پلی وینیلیدن فلوراید (PVDF) با خلوص بالا از شرکت مواد جدید ۳ F شانگهای چین تهیه شد. N,N- دی متیل فرمایید (DMF) با خلوص ۹۸ درصد از شرکت سیگما آلدریچ تهیه گردید.

طیف‌های انعکاسی لایه‌های پلیمری و کامپوزیتی در ناحیه مرئی- فرابنفش (۳۲۰ تا ۷۶۰ نانومتر) توسط دستگاه اسپکتروفتومتر مدل Lambda 950 ساخت شرکت پرکین المر آمریکا ثبت شدند.

لایه‌های کامپوزیتی و پلیمری به روشی ابتکاری به کمک بشقابک شیشه‌ای، تراز آبی دایره‌ای، اجاق برقی همزن‌دار و سه‌پایه قابل تنظیم تهیه شدند.

از دستگاه اجاق برقی همزن‌دار مدل RCT basic ساخت شرکت IKA آلمان برای حل کردن، پراکنده‌سازی و خشک کردن در دمای مشخص استفاده شد.

۲-۲. ساخت و ارزیابی

حل کردن پلیمر در حلال: برای حل کردن پلیمر PVDF در حلال DMF، ابتدا مقدار مشخص از آن توزین شده و سپس به مقدار مشخصی از حلال DMF در ظرف شیشه‌ای درب‌دار اضافه شد. پس از قرار دادن یک مگنت مغناطیسی در ظرف حاوی حلال و پلیمر، درب آن را بسته و ظرف به مدت ۱ ساعت بر روی اجاق برقی همزن‌دار در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد توسط مگنت با سرعت 500 rpm هم زده شد.

تهیه مخلوط کامپوزیت: به منظور تهیه کامپوزیت سرامیک-پلیمر، مقدار مشخصی از پودر سرامیک به محلول PVDF در حلال DMF اضافه گردید. پس از بستن درب ظرف، ظرف بر روی اجاق برقی همزن‌دار قرار داده شد. مخلوط داخل ظرف به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط با سرعت 500 rpmهم زده شد تا مخلوط کامپوزیتی یکنواخت تهیه گردد.

تهیه لایه پلیمری و کامپوزیتی: ابتدا اجاق برقی همزن‌دار بر روی سه‌پایه قرار داده شده و سپس بشقابک شیشه‌ای به قطر ۵ سانتی‌متر بر روی اجاق برقی همزن‌دار قرار داده شد. با قرار دادن تراز آبی داخل بشقابک شیشه‌ای و پیچاندن پیچ‌های سه‌پایه عملیات تراز نمودن بشقابک شیشه‌ای بر روی اجاق برقی همزن‌دار انجام گردید. دلیل تراز نمودن بشقابک شیشه‌ای این بود که ضخامت قسمت‌های مختلف لایه تشکیل شده در درون آن یکسان باشد. پس از تراز نمودن بشقابک شیشه‌ای، دمای اجاق برقی همزن‌دار بر روی دمای مورد نظر تنظیم شده و سپس حجم مشخصی از محلول پلیمری یا مخلوط کامپوزیتی درون بشقابک شیشه‌ای ریخته شد. محلول پلیمری یا مخلوط کامپوزیتی پس از ریخته شدن درون بشقابک شیشه‌ای، لایه یکنواختی ایجاد کرده که این لایه با توجه به دمای اجاق برقی همزن‌دار پس از زمان مشخصی خشک شده (شکل ۱- الف) و به راحتی از روی بشقابک شیشه‌ای جدا می‌شد (شکل ۱- ب).

(الف)

(ب)

شکل ۱. (الف) لایه کامپوزیتی در حال خشک شدن در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد، (ب) نمونه‌ای از لایه کامپوزیتی $PVDF\text{-}CaCO_3$ خشک شده و جدا شده از بشقابک شیشه‌ای

روش ارزیابی لایه‌های ساخته شده: از آنجا که هدف تحقیق ساخت پوشش استتار دو طیفی برای استتار اهداف نظامی در برابر حسگرهای مرئی- فرابنفش دشمن بود، لازم بود تا طیف انعکاسی نمونه‌ها در دو ناحیه مرئی و فرابنفش گرفته شود. عملیات طیف‌گیری از لایه‌های خشک‌شده توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر با مد انعکاسی از ۲۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر و با گام دو نانومتر انجام گرفت.

به منظور بررسی رفتار انعکاسی نمونه‌ها در ناحیه فرابنفش و بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر میزان انعکاس آن‌ها، نمودار میزان انعکاس آن‌ها برحسب پارامترهای مؤثر بر انعکاس، در طول‌موج ۳۵۰ نانومتر رسم شد و سپس مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. علت انتخاب طول موج ۳۵۰ نانومتر برای ارزیابی نمونه‌ها (پوشش‌های استتاری) در ناحیه فرابنفش این بود که حسگرهای فرابنفش، برای تشخیص و شناسایی اهداف، از جمع‌آوری و ثبت تابش منعکس شده از اهداف در طول موج ۳۵۰ نانومتری بهره می‌برند.

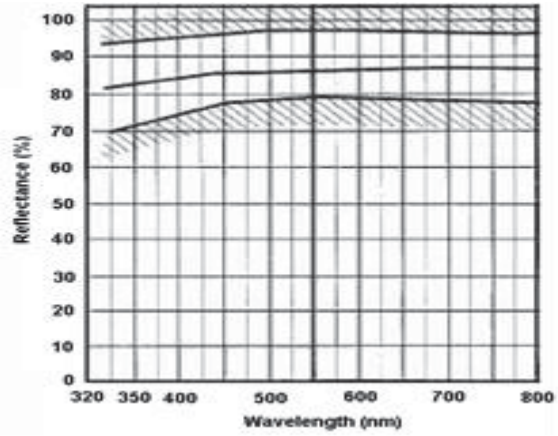
۳. نتایج و بحث

برای اینکه پوششی بتواند باعث استتار اهداف نظامی در زمینه برفی شود باید رفتار طیفی آن در نواحی مرئی و فرابنفش مشابه رفتار طیفی برف باشد. اداره استاندار ملی اروپا (ناتو) برای پوشش‌های استتاری در نواحی برفی، استانداری ارائه نموده است [۹].

در این استاندارد، طیف انعکاسی پوشش‌های استتار برفی در دو ناحیه مرئی و فرابنفش از ۳۲۰ تا ۸۰۰ نانومتر رسم شده و محدوده

مجاز تغییرات شدت انعکاس نیز در آن نشان داده شده است. طیف انعکاسی استاندارد ناتو برای پوشش‌های استتار برفی در شکل (۲) نشان داده شده است. علت تغییر شدت انعکاس در دو ناحیه این است که عوامل مختلفی در میزان انعکاس برف تأثیرگذارند. این عوامل عبارتند از: اندازه، شکل، جنس، عمر ذرات برف و زاویه تابش خورشید. تغییر هر یک از این عوامل باعث می‌شود تا شدت انعکاس مرئی- فرابنفش برف تغییر نامید [۱۳-۱۰].

نموداری که به شکل خط پر در شکل (۲) نشان داده شده است رفتار طیفی پوشش استتار برفی را در حالتی که تقریباً با محیط‌های مختلف برفی سازگاری دارد را نشان می‌دهد. یعنی اگر پوششی با چنین رفتار طیفی ساخته شود می‌توان از آن برای استتار اهداف نظامی در شرایط مختلف برفی استفاده نمود.



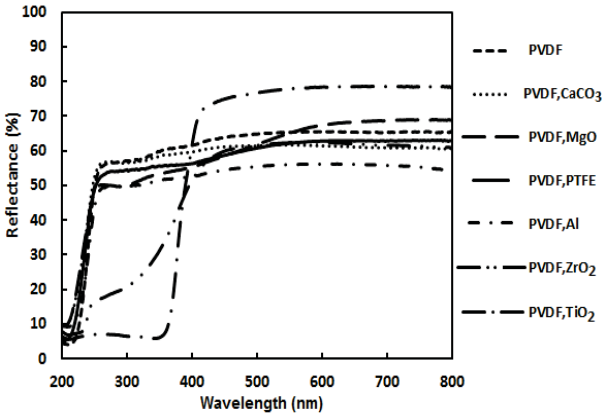
شکل ۲. طیف انعکاسی استاندارد ناتو برای پوشش‌های استتار برفی [۹]

برای تهیه پوشش استتار برفی باید از موادی استفاده نمود که علاوه بر سفید بودن، انعکاس فرابنفش بالایی داشته باشند. مواد مختلف انعکاس‌های متفاوتی در ناحیه مرئی و فرابنفش دارند. هدف این تحقیق ساخت لایه‌ای است که بتواند در مناطق برفی باعث استتار اهداف نظامی شود. برای رسیدن به این هدف باید از موادی استفاده نمود که دارای انعکاسی مشابه برف در هر دو ناحیه مرئی و فرابنفش باشند. این مواد می‌توانند آلی یا معدنی باشند. برف انعکاس مرئی و فرابنفش بالایی دارد. بنابراین مواد انتخابی نیز باید دارای انعکاس مرئی و فرابنفش بالایی باشند.

طی اطلاعات به‌دست آمده از مقالات، پتنت‌ها و منابع معتبر اینترنتی مشخص شد که تعدادی از مواد دارای ویژگی‌های مورد نظر می‌باشند. این مواد عبارتند از: تفلون [۱۴]، پلی وینیلیدن فلوراید، کربنات کلسیم [۱۵]، اکسید منیزیم [۱۴ و ۱۶]، پودر آلومینیم [۱۷]، دی‌اکسید زیرکونیوم [۸] و دی‌اکسید تیتانیوم [۸ و ۱۸].

تفلون از خانواده فلوئوروپلیمرها بوده و در حلال‌های معمول حل نمی‌شود، بنابراین نمی‌توان از آن به عنوان بستر یا زمینه کامپوزیت استفاده نمود. نزدیک‌ترین پلیمر فلوئوردار که به تفلون نزدیک بوده و قابل تهیه نیز باشد، PVDF است. PVDF به راحتی در DMF در حضور حرارت حل می‌شود. بنابراین از PVDF به عنوان زمینه کامپوزیت و از ترکیبات دیگر که به شکل پودر بودند به عنوان پرکننده استفاده گردید.

به منظور ارزیابی رفتار طیفی این مواد در دو ناحیه مرئی و فرابنفش، تحت شرایط یکسان و انتخاب بهترین پرکننده، لایه‌های کامپوزیتی از آن‌ها تهیه (۱۰ درصد وزنی پرکننده نسبت به کامپوزیت) و طیف انعکاسی آن‌ها گرفته شد. طیف انعکاسی این نمونه‌ها در نواحی مرئی و فرابنفش در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳. طیف انعکاسی کامپوزیت 10% PVDF- 10% Filler در نواحی مرئی و فرابنفش

با توجه به شکل (۳)، کامپوزیت PVDF-$CaCO_3$ بالاترین انعکاس را در میان سایر کامپوزیت‌ها در طول‌موج ۳۵۰ نانومتر نشان داد. بنابراین در این تحقیق از $CaCO_3$ به عنوان پرکننده و از PVDF به عنوان زمینه برای ساخت لایه‌های کامپوزیتی استفاده شد. اما هنوز میزان انعکاس کامپوزیت با شرایط استاندارد فاصله داشت.

در ادامه طی آزمایش‌های مختلف، پارامترهای تأثیرگذار بر میزان انعکاس کامپوزیت در نواحی مرئی و فرابنفش شناسایی و با ساخت کامپوزیت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. شرایط بهینه هر پارامتر به روش یکی در یک زمان استخراج شد. در نهایت تحت شرایط بهینه، بهترین کامپوزیت تهیه و میزان انعکاس آن ثبت شد.

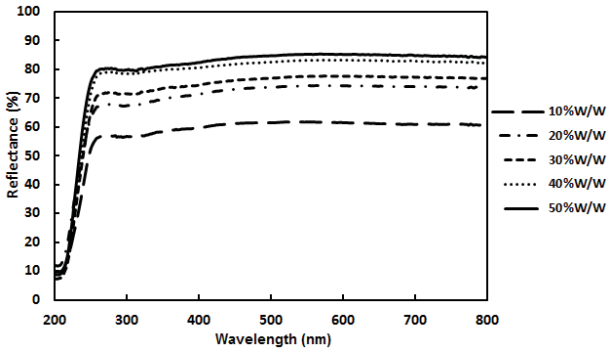
۳-۱. تأثیر عوامل مختلف بر ساخت منسوج شناساگر

اثر غلظت $CaCO_3$ بر رفتار انعکاسی کامپوزیت: در این آزمایش پنج نمونه مخلوط کامپوزیتی (PVDF-$CaCO_3$) با شرایط جدول (۱) تهیه شد.

پس از تهیه نمونه‌های فوق مقدار ۳ میلی‌لیتر از هرکدام به طور جداگانه درون بشقابک شیشه‌ای تراز شده بر روی اجاق برقی همزن‌دار، ریخته شده و در دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد خشک گردید. برای ارزیابی میزان انعکاس مرئی و فرابنفش نمونه‌ها، طیف انعکاسی پنج لایه کامپوزیت تهیه شده، توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر در محدوده ۲۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر با گام دو نانومتری گرفته شد. طیف انعکاسی این نمونه‌ها در نواحی مرئی و فرابنفش در شکل (۴) نشان داده‌شده است.

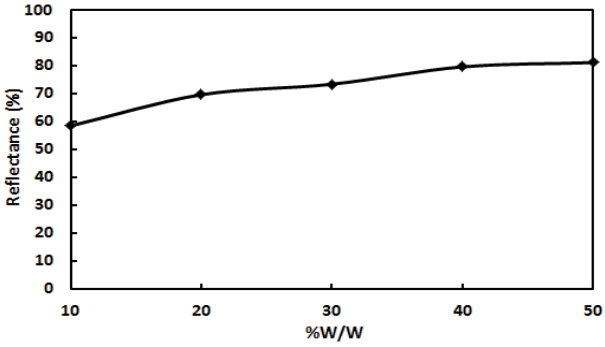
جدول ۱. شرایط تهیه نمونه‌های مخلوط کامپوزیتی ($PVDF-CaCO_3$)

حلال	درصد وزنی/ وزنی PVDF به DMF	درصد وزنی/ وزنی $CaCO_3$ به کامپوزیت $PVDF+CaCO_3$	نمونه
DMF	۱۰	۱۰	۱
DMF	۱۰	۲۰	۲
DMF	۱۰	۳۰	۳
DMF	۱۰	۴۰	۴
DMF	۱۰	۵۰	۵



شکل ۴. طیف انعکاسی کامپوزیت $PVDF-CaCO_3$ در نواحی مرئی و فرابنفش در درصدهای وزنی متفاوت$CaCO_3$

نمودار میزان انعکاس نمونه‌ها بر حسب درصد وزنی $CaCO_3$ در طول‌موج ۳۵۰ نانومتر در شکل (۵) نشان داده‌شده است.



شکل ۵. نمودار میزان انعکاس کامپوزیت $PVDF-CaCO_3$ بر حسب درصدهای وزنی $CaCO_3$ در طول‌موج ۳۵۰ نانومتر

همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود با افزایش درصد وزنی$CaCO_3$ در کامپوزیت $PVDF-CaCO_3$ میزان انعکاس کامپوزیت افزایش می‌یابد که این پدیده به دلیل افزایش تعداد ذرات $CaCO_3$ در زمینه PVDF می‌باشد. ذرات $CaCO_3$ ذاتاً دارای انعکاس بالایی در ناحیه فرابنفش می‌باشند.

$CaCO_3$ و PVDF هر دو سفید رنگ بوده و کامپوزیت حاصل از آن‌ها نیز سفید رنگ می‌باشد این موضوع در طیف مرئی کامپوزیت که در شکل (۴) نشان داده‌شده کاملاً آشکار است.

اثر دمای خشک‌کردن کامپوزیت $PVDF-CaCO_3$، بر رفتار انعکاسی کامپوزیت: در این آزمایش یک نمونه مخلوط کامپوزیتی ($PVDF-CaCO_3$) با شرایط جدول (۲) تهیه شد.

جدول ۲. شرایط تهیه نمونه¬های مخلوط کامپوزیتی ($PVDF-CaCO_3$)

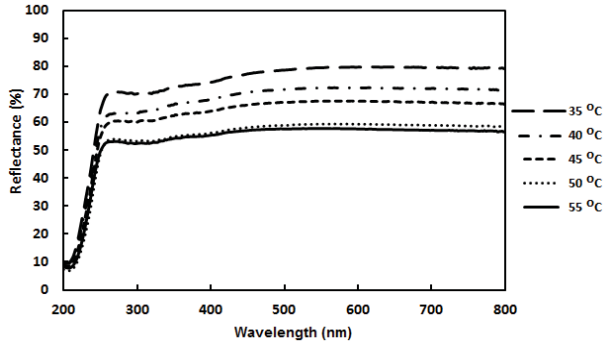
حلال	درصد وزنی/ وزنی PVDF به DMF	درصد وزنی/ وزنی $CaCO_3$ به کامپوزیت $PVDF+CaCO_3$	نمونه
DMF	۱۰	۱۰	۱

پس از تهیه نمونه فوق، برای مشاهده تأثیر دمای خشک کردن بر میزان انعکاس، ۷ بار هر بار ۳ میلی‌لیتر از آن در دماهای مختلف ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد در درون بشقابک شیشه‌ای خشک گردید. نتایج حاصل از لایه‌های به‌دست آمده به شرح زیر می‌باشد.

در دمای ۲۵ درجه لایه‌ای تشکیل نشد و تکه‌های کامپوزیتی به‌دست می‌آمد. بنابراین این دما برای خشک کردن مناسب نبود.

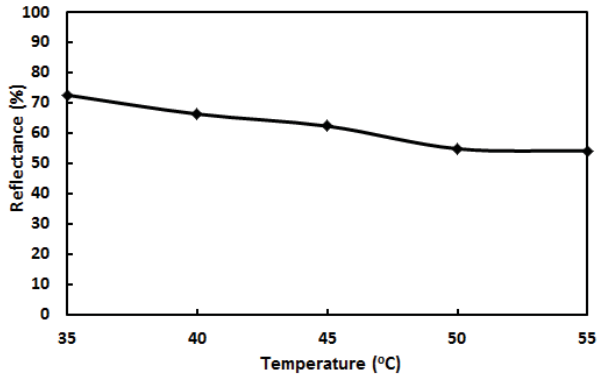
در دمای ۳۰ درجه لایه تشکیل می‌شد ولی از بشقابک شیشه‌ای جدا نمی‌شد و اگر هم جدا می‌شد تکه‌تکه می‌گشت بنابراین این دما برای خشک کردن مناسب نبود.

در دمای ۳۵ درجه به بالا، لایه تشکیل می‌شد و به راحتی از بشقابک شیشه‌ای جدا می‌گشت. بنابراین این لایه‌ها مورد ارزیابی طیفی قرار گرفتند. طیف انعکاسی لایه‌های خشک‌شده در دمای ۳۵ درجه و بالاتر از آن در نواحی مرئی و فرابنفش در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۶. طیف انعکاسی کامپوزیت $PVDF-CaCO_3$ در نواحی مرئی و فرابنفش در دماها متفاوت خشک شدن لایه

نمودار میزان انعکاس نمونه‌ها برحسب دمای خشک شدن در طول‌موج ۳۵۰ نانومتر در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل ۷. نمودار میزان انعکاس کامپوزیت $PVDF-CaCO_3$ برحسب دمای خشک شدن در طول‌موج ۳۵۰ نانومتر

در این آزمایش درصد وزنی PVDF و $CaCO_3$ در کامپوزیت ثابت بوده و آنچه تغییر می‌کند دمای خشک شدن کامپوزیت است. $CaCO_3$ به شکل پودر بوده و در محلول PVDF در حلال DMF حل نمی‌شود بلکه به صورت ذرات جامد معلق در مایع در این محلول پراکنده می‌شود. بنابراین دمای خشک شدن کامپوزیت تأثیری بر میزان انعکاس $CaCO_3$ندارد. اما کامپوزیت جزء دیگری نیز دارد یعنی PVDF ملکول-های خطی که گروه¬های جانبی کوچک دارند و یا گروه جانبی ندارند، به آسانی بلوری می‌شوند. نیروهای بین‌مولکولی به ویژه پیوند هیدروژنی باعث افزایش بلورینگی می‌شود. زمان، تأثیر زیادی بر میزان بلوری شدن پلیمرها دارد به طوری که با افزایش زمان سرد شدن پلیمرهای مذاب و یا با افزایش زمان خشک شدن پلیمرهای حل شده در حلال، میزان بلوری شدن پلیمرها افزایش می‌یابد. در پلیمرهایی که ظاهری شفاف دارند زنجیرهای پلیمری به صورت نامنظم کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند، برعکس در پلیمرهایی که ظاهری کدر و یا ابری دارند زنجیره‌های پلیمری به صورت منظم قرار گرفته‌اند و این نظم و فشردگی اجازه عبور نور را نمی‌دهند، بنابراین ظاهری کدر دارند [۱۹].

پلیمر PVDF یک پلیمر خطی بوده که به دلیل دارا بودن گروه-های فلوئور، تمایل زیادی به تشکیل پیوند بین‌مولکولی هیدروژنی دارد. این موضوع باعث می‌شود تا درجه بلورینگی PVDF بالا باشد. ظاهر سفید و یا ابری مانند آن دلالت بر نیمه بلوری بودن آن دارد. به هنگام خشک شدن PVDF حل شده در حلال، دو پارامتر غلظت و دمای خشک شدن تأثیر زیادی بر درجه بلورینگی آن دارد. اثر این پارامترها بر درجه بلورینگی، بخاطر تأثیری است که هر دوی آن‌ها بر زمان شکل‌گیری ساختار بلوری PVDF می‌گذارند. به طوری که با کاهش غلظت یا دما، زمان برای شکل‌گیری ساختار بلوری پلیمر PVDF فراهم شده و بنابراین پلیمری با ساختار بلوری بهتر حاصل می شود. در این حالت با کاهش غلظت یا دما، شفافیت پلیمر کاهش یافته و پلیمر رنگ سفید به خود می گیرد. افزایش تبلور پلیمر PVDF باعث افزایش خاصیت انعکاس دهندگی فرابنفش آن می‌شود. از طرفی رنگ سفید آن نیز باعث افزایش انعکاس مرئی آن می‌شود. این دو خاصیت باعث می‌شود تا بتوان از PVDF در تهیه پوشش‌های استتاری استفاده نمود. همانگونه که در شکل (۶ و ۷) مشاهده می‌شود، کاهش دما باعث بهبود هر دو خاصیت مطلوب PVDF شده و توانایی آن را در استتار اهداف در زمینه برفی افزایش می‌دهد. بنابراین دمای ۳۵ درجه برای خشک‌کردن لایه کامپوزیت مناسب می‌باشد.

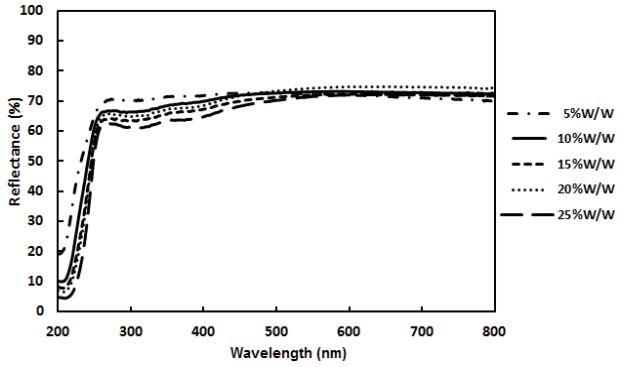
اثر غلظت PVDF بر رفتار انعکاسی کامپوزیت: در این آزمایش ۵ نمونه مخلوط کامپوزیتی ($PVDF\text{-}CaCO_3$) با شرایط جدول (۳) تهیه شد.

پس از تهیه نمونه‌های فوق مقدار ۳ میلی‌لیتر از هر کدام در دمای ۴۵ درجه درون بشقابک شیشه‌ای تراز شده روی اجاق برقی همزن‌دار، خشک گردید. طیف انعکاسی لایه‌های خشک شده در نواحی مرئی و فرابنفش در شکل (۸) نشان داده شده است.

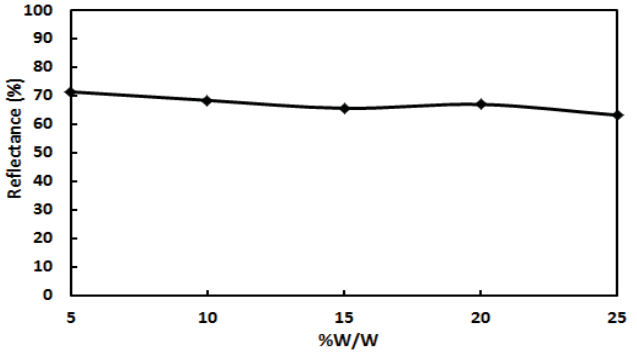
نمودار میزان انعکاس نمونه‌ها برحسب درصد وزنی PVDF نسبت به حلال DMF در شکل (۹) نشان داده‌شده است.

جدول ۳. شرایط تهیه نمونه‌های مخلوط کامپوزیتی ($PVDF\text{-}CaCO_3$)

حلال	درصد وزنی/ وزنی PVDF به DMF	مقدار $CaCO_3$ در کامپوزیت برحسب گرم	نمونه
DMF	۵	۰/۱۱۸	۱
DMF	۱۰	۰/۱۱۸	۲
DMF	۱۵	۰/۱۱۸	۳
DMF	۲۰	۰/۱۱۸	۴
DMF	۲۵	۰/۱۱۸	۵



شکل ۸. طیف انعکاسی کامپوزیت $PVDF\text{-}CaCO_3$ در نواحی مرئی و فرابنفش در درصدهای وزنی متفاوت PVDF



شکل ۹. نمودار میزان انعکاس کامپوزیت $PVDF\text{-}CaCO_3$ برحسب درصدهای وزنی PVDF در طول‌موج ۳۵۰ نانومتر

در این آزمایش درصد وزنی $CaCO_3$ در کامپوزیت ثابت بوده و آنچه تغییر می‌کند درصد وزنی PVDF است .به شکل گرانول بوده و در حلال DMF حل می‌شود. به هنگام خشک شدن لایه کامپوزیتی، نقش بستر کامپوزیت را داشته و همانند چسبی ذرات پرکننده یعنی $CaCO_3$ را در کنار یکدیگر نگاه می‌دارد.

همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود با کاهش درصد وزنی PVDF در کامپوزیت $PVDF\text{-}CaCO_3$ میزان انعکاس کامپوزیت افزایش می‌یابد. این پدیده به دلیل کاهش مقدار PVDF در زمینه کامپوزیت نمی‌باشد، بلکه به دلیل نحوه شکل‌گیری ساختار بلوری PVDF می‌باشد. به هر حال اثر افزایش انعکاس فرابنفش با کاهش درصد PVDF بسیار چشمگیر نبوده و این تأثیر کمتر از ۱۰ درصد خواهد بود.

توجیه این پدیده اینگونه است که با کاهش درصد PVDF در حلال، به دلیل افزایش مقدار حلال در لایه کامپوزیت، سرعت خشک شدن لایه کاهش

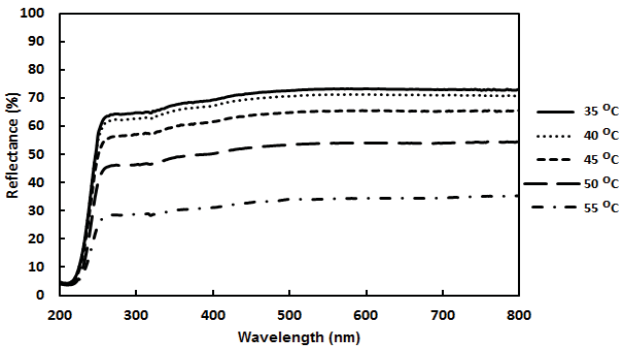
یافته و زمان لازم برای شکل‌گیری ساختار بلوری پلیمر افزایش می‌یابد. این موضوع باعث شکل‌گیری ساختار بلوری بیشتر در پلیمر می‌شود.

در این حالت با کاهش درصد PVDF در حلال، شفافیت پلیمر کاهش یافته و پلیمر رنگ سفید به خود می‌گیرد. افزایش حالت بلوری پلیمر PVDF باعث افزایش خاصیت انعکاس دهندگی فرابنفش آن می‌شود. از طرفی رنگ سفید آن نیز باعث افزایش انعکاس مرئی آن می‌شود. این دو خاصیت باعث می‌شود تا بتوان از PVDF در تهیه پوشش‌های استتاری استفاده نمود. همانگونه که در شکل (۸ و ۹) مشاهده می‌شود، کاهش درصد PVDF در حلال باعث بهبود هر دو خاصیت مطلوب PVDF شده و توانایی آن را در استتار اهداف در زمینه برفی افزایش می‌دهد. بنابراین استفاده از PVDF به میزان ۵ درصد در حلال DMF به عنوان زمینه برای تهیه لایه کامپوزیت، مناسب می‌باشد.

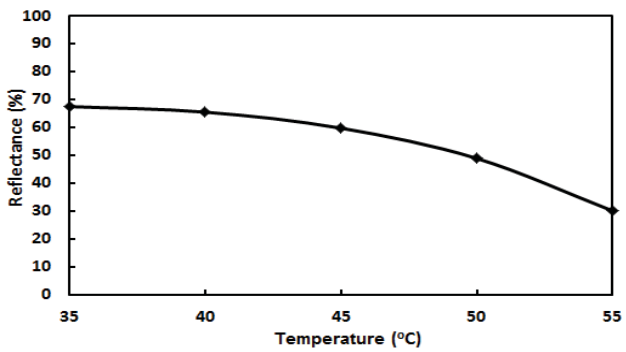
اثر دمای خشک‌کردن پلیمر PVDF بر رفتار انعکاسی پلیمر: در این آزمایش یک نمونه محلول PVDF در حلال DMF که درصد وزنی/وزنی PVDF در DMF، ۱۰ درصد بود تهیه شد.

پس از تهیه نمونه فوق، ۵ بار و هر بار ۳ میلی‌لیتر از آن در دماهای ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۵۵ درجه در درون بشقابک شیشه‌ای خشک شد. طیف انعکاسی لایه‌های خشک شده در نواحی مرئی و فرابنفش در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

نمودار میزان انعکاس لایه‌های پلیمری برحسب دمای خشک شدن در طول‌موج ۳۵۰ نانومتر در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۱۰. طیف انعکاسی پلیمر PVDF در نواحی مرئی و فرابنفش در دماها متفاوت خشک شدن لایه



شکل ۱۱. نمودار میزان انعکاس پلیمر PVDF برحسب دمای خشک شدن در طول‌موج ۳۵۰ نانومتر

دمای انتقال شیشه‌ای (Tg) و دمای ذوب PVDF (Tm) به ترتیب برابر ۳۵- و ۱۷۷ درجه سانتیگراد است که در این بازه در حدود ۶۰-۵۰ درصد آن بلوری می‌باشد و به همین خاطر PVDF ساختاری نیمه بلوری دارد [۲۰]. در صورتی که PVDF حل شده در حلالDMF، در دمای زیر ۷۰ درجه خشک شود، دارای فاز بتا (β)، در صورتی که در دمای بالای ۱۱۰ درجه خشک شود، دارای فاز آلفا (α) و در صورتی که بین این دو دما خشک شود، دارای مخلوطی از فازهای آلفا و بتا خواهد بود.

در تحقیق حاضر عملیات خشک کردن لایه‌ها (پلیمری و کامپوزیتی) بین دماهای ۳۵ تا ۵۵ درجه صورت گرفته است. در این محدوده دمایی، PVDF تماماً در فاز بتا قرار دارد [۲۱ و ۲۲]، اما هنوز نیمه بلوری است، یعنی هنوز تمام زنجیره‌های پلیمری آن هم راستا و منظم نیستند. با کاهش دما چون سرعت خشک شدن لایه PVDF کاهش می‌یابد، زنجیره‌های پلیمری زمان بیشتری برای هم راستا شدن با یکدیگر و منظم شدن دارند بنابراین درصد بیشتری از PVDF که در فاز بتا قرار دارد، بلوری می‌شود.

در این آزمایش درصد وزنی PVDF در حلال DMF ثابت بوده و آنچه تغییر می‌کند دمای خشک شدن محلول پلیمر است. با کاهش دما، زمان کافی برای شکل‌گیری ساختار بلوری پلیمر PVDF فراهم شده و بنابراین پلیمری با ساختار بلوری بیشتر حاصل می‌شود. در این حالت با کاهش دما، شفافیت پلیمر کاهش یافته و پلیمر رنگ سفید به خود می‌گیرد. افزایش حالت بلوری پلیمر PVDF باعث افزایش خاصیت انعکاس دهندگی فرابنفش آن می‌شود. از طرفی رنگ سفید آن نیز باعث افزایش انعکاس مرئی آن می‌شود. این دو خاصیت باعث می‌شود تا بتوان از PVDF در تهیه پوشش‌های استتاری استفاده نمود. همانگونه که در شکل (۱۰) و (۱۱) مشاهده می‌شود، کاهش دما باعث بهبود هر دو خاصیت مطلوب PVDF شده و توانایی آن را در استتار اهداف در زمینه برفی افزایش می‌دهد. بنابراین دمای ۳۵ درجه برای خشک‌کردن لایه کامپوزیت مناسب می‌باشد.

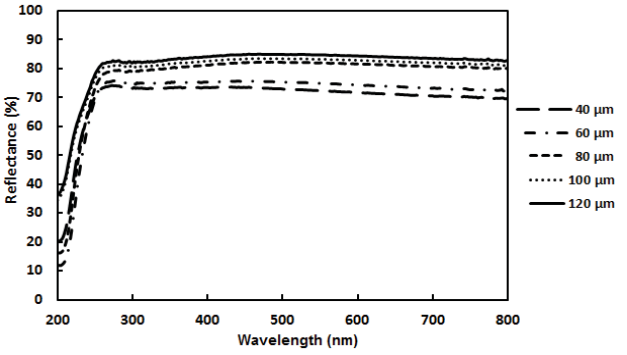
اثر ضخامت لایه کامپوزیت PVDF-CaCO3 بر رفتار انعکاسی کامپوزیت: در این آزمایش یک نمونه مخلوط کامپوزیتی (PVDF-$CaCO_3$) با شرایط جدول (۴) تهیه شد.

جدول ۴. شرایط تهیه نمونه مخلوط کامپوزیتی (PVDF-$CaCO_3$)

حلال	درصد وزنی/ وزنی PVDF به DMF	درصد وزنی/ وزنی $CaCO_3$ به کامپوزیت PVDF+$CaCO_3$	نمونه
DMF	۵	۵۰	۱

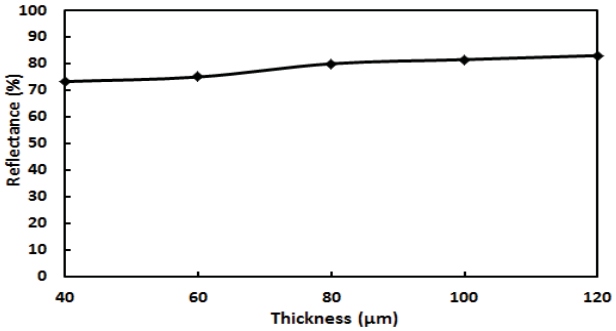
پس از تهیه نمونه فوق مقادیر مختلفی از آن (۲، ۲/۵، ۳، ۳/۵ و ۴ میلی‌لیتر) به طور جداگانه درون بشقابک شیشه‌ای تراز شده بر روی اجاق برقی همزن‌دار، ریخته شده و در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد خشک گردید. با توجه به اینکه حجم‌های مختلف کامپوزیت پس از خشک شدن لایه‌هایی با ضخامت‌های مختلف ایجاد می‌کند، بنابراین با این آزمایش اثر ضخامت لایه به راحتی قابل بررسی خواهد بود. ضخامت‌های ایجاد شده به ترتیب عبارتند از: ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ میکرومتر.

طیف انعکاسی این نمونه‌ها در نواحی مرئی و فرابنفش در شکل (۱۲) نشان داده‌شده است.



شکل ۱۲. طیف انعکاسی کامپوزیت PVDF-$CaCO_3$ در ضخامت‌های متفاوت بر حسب طول موج نواحی مرئی و فرابنفش

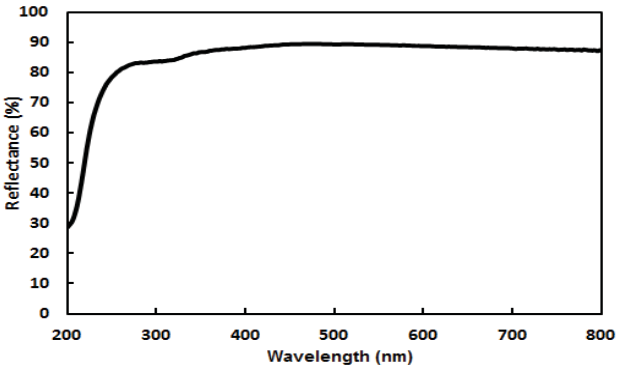
نمودار میزان انعکاس نمونه‌ها بر حسب ضخامت لایه کامپوزیت در طول‌موج ۳۵۰ نانومتر در شکل (۱۳) نشان داده‌شده است.



شکل ۱۳. نمودار میزان انعکاس کامپوزیت PVDF-$CaCO_3$ برحسب ضخامت‌های متفاوت کامپوزیت در طول‌موج ۳۵۰ نانومتر

همان‌طور که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت کامپوزیت PVDF-CaCO3، میزان انعکاس کامپوزیت افزایش می‌یابد اما این افزایش قابل‌توجه نیست. بر اساس شکل (۵) با افزایش درصد وزنی $CaCO_3$ در کامپوزیت میزان انعکاس افزایش یافته ولی بر اساس شکل (۹) با افزایش درصد وزنی PVDF در کامپوزیت میزان انعکاس کاهش می‌یابد. یعنی افزایش درصد وزنی$CaCO_3$، اثر مثبت و افزایش درصد وزنی PVDF، اثر منفی بر انعکاس کامپوزیت دارد. از آنجایی که تأثیر $CaCO_3$ بر انعکاس کامپوزیت در مقایسه با PVDF بیشتر است، اثر $CaCO_3$ غالب بوده و بنابراین با افزایش درصد وزنی $CaCO_3$ و PVDF در کامپوزیت، درمجموع انعکاس کامپوزیت افزایش خواهد یافت.

رفتار انعکاسی کامپوزیت تحت شرایط بهینه: در آزمایش‌های قبلی پارامترهای مختلف تأثیرگذار بر میزان انعکاس کامپوزیت در نواحی مرئی و فرابنفش مورد بررسی قرار گرفت و مقادیر بهینه از هر پارامتر به‌دست آمد. تحت شرایط بهینه (درصد وزنی/وزنی PVDF به DMF ۵ درصد، درصد وزنی/وزنی $CaCO_3$ به PVDF+$CaCO_3$؛ ۵۰ درصد، دمای خشک شدن لایه کامپوزیت ۳۵ درجه سانتی‌گراد، حجم مخلوط مایع مورد استفاده برای تهیه لایه کامپوزیت ۳ میلی‌لیتر) نمونه‌ای از لایه کامپوزیتی تهیه و رفتار انعکاسی آن مورد بررسی قرار گرفت. طیف انعکاسی این نمونه در نواحی مرئی و فرابنفش در شکل (۱۴) نشان داده شده است.

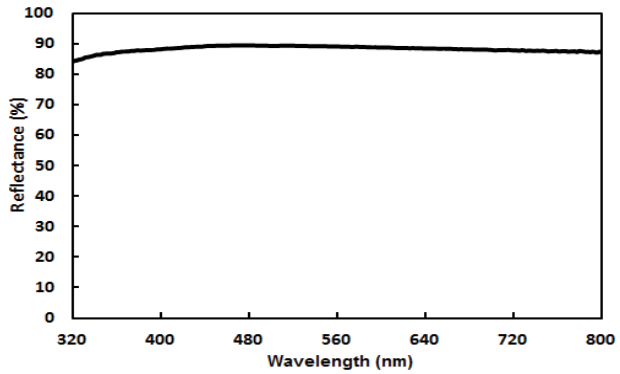


شکل ۱۴. طیف انعکاسی کامپوزیت PVDF-$CaCO_3$ تحت شرایط بهینه در نواحی مرئی و فرابنفش بر حسب درصد وزنی ثابت اجزای کامپوزیت

همان‌طور که در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود میزان انعکاس فرابنفش پوشش کامپوزیتی تحت شرایط بهینه در طول موج ۳۵۰ نانومتر (طول موج شناسایی دوربین‌های فرابنفش)، ۸۸ درصد می‌باشد.

مقایسه رفتار انعکاسی کامپوزیت ساخته شده تحت شرایط بهینه با پوشش‌های استتار برفی استاندارد ناتو: سازمان استاندارد نظامی اروپا (ناتو) برای پوشش‌های استتار کننده اهداف نظامی در محیط‌های برفی، طیف انعکاسی استانداردی ارائه نموده است که در شکل (۲) قابل مشاهده است. شکل (۲)، طیف انعکاسی مربوط به دو ناحیه مرئی و فرابنفش بوده و حدود مجاز بالا و پایین میزان انعکاس پوشش استتاری برفی را در هر طول موج تحت شرایط استاندارد نشان می‌دهد.

طیف انعکاسی پوشش کامپوزیتی (PVDF-$CaCO_3$) به‌دست آمده در این تحقیق تحت شرایط بهینه در شکل (۱۵) نشان داده شده است. با مقایسه طیف انعکاسی پوشش کامپوزیتی با طیف انعکاسی مرجع استاندارد ناتو برای استتار برفی، به طور واضح مشخص می‌شود که نمونه کامپوزیت ساخته شده کاملاً در محدوده استاندارد ناتو بوده و می‌تواند به عنوان پوششی برای استتار اهداف نظامی در محیط‌های برفی به‌کار رود.



شکل ۱۵. طیف انعکاسی کامپوزیت PVDF-$CaCO_3$ تحت شرایط بهینه در نواحی مرئی و فرابنفش

۴. نتیجه‌گیری

استتار در مناطق پوشیده از برف بسیار مهم است زیرا باعث کاهش دید دشمن و در نتیجه کاهش تلفات جانی و خسارات مالی خواهد شد. برف انعکاس فرابنفش بالایی دارد ولی بیشتر رنگ‌های سفید و اشیاء ساخته شده توسط انسان، انعکاس فرابنفش پایینی دارند که این امر باعث رؤیت آن‌ها توسط حسگرهای فرابنفش دشمن خواهد شد. بنابراین طراحی و ساخت پوشش‌های استتار برفی از اهمیت خاصی برخوردار است. در این تحقیق با ساخت و ارزیابی یک پوشش کامپوزیتی پلیمر (PVDF)- سرامیکی ($CaCO_3$) جهت استتار در ناحیه برفی سعی در پائین آوردن توانایی تشخیص و شناسایی اهداف با استفاده از حسگرهای فرابنفش دشمن شد. پارامترهای مختلفی بر میزان انعکاس کامپوزیت در نواحی مرئی و فرابنفش تأثیرگذار بودند که مورد بررسی قرار گرفتند. تأثیر برخی از این پارامترها زیاد و برخی دیگر کم بود. سرانجام مقادیر بهینه از هر پارامتر به‌دست آمد. تحت شرایط بهینه نمونه‌ای از کامپوزیت تهیه و رفتار انعکاسی آن مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه طیف انعکاسی پوشش کامپوزیتی با طیف انعکاسی مرجع استاندارد ناتو برای استتار برفی، به وضوح نشان داد که نمونه کامپوزیت ساخته شده کاملاً در محدوده استاندارد ناتو بوده و می‌تواند به عنوان پوششی برای استتار اهداف نظامی و غیرنظامی در محیط‌های برفی بکار برده شود.

۵. مراجع

[1] Eskandari, H. “Knowledge Passive Defense (Public Course Managers and Experts)”; Hamid Boostan Press: Tehran, 1391 (In Persian).

[2] Akbari, A. “Understanding Passive Defense”; Khatam ol-Anbia Defense Command: Tehran, 1388 (In Persian).

[3] Majidi, D.; Mosavi, M. “Basics of Camouflage, Concealment and Deception”; Malek Ashtar University Press: Tehran, 1388 (In Persian).

[4] Goodarzi, O.; Mokhtari, J.; Noori, M. “The Camouflage of Cotton Woven in the Visible and Near Infrared Region Using Vat Dyes”; J. of Color Sci. Tech. 1392, 1, 23-34 (In Persian).

[5] Razmkhah, M.; Esfandyari, M. R. “Introduction to Camouflage, Concealment and Deception”; Imam Hossein University Press: Tehran, 1391 (In Persian).

[6] Nishkam, A. “Textile and Camouflage”; J. Ind. Text. 1999, 109, 40-44.

[7] Horrocks, A. R.; Anand, S. C. “Handbook of Technical Textiles: Textile in Defence”; Woodhead, 16, England, 2000, 425-460.

[8] Hepfinger, M. J.; Hepfinger, L. B.; Olejarz, P. J. “Preparation of Fibers with Enhanced Ultraviolet (UV) Reflectance for Arctic Camouflage”; U.S. Army Natick Research, Development and Engineering Center, 1991.

[9] NATO Standardization Agreement, STANAG No. 2835, Edition 2, NATO Ultraviolet Reflective (UVR) White Color for the Camouflage of Military Equipment’s in Snow Environments, 1995.

[10] Miryaghoobzade, M.; Ghanbarpoor, M. R.; Habibnejad, M. “The Reflectance of Snow Electromagnetic Spectrum and its Application in Remote Sensing.”, 01st Iranian Surveyor’s Geomatic Conference, Islamic Azad University, Takestan, 1386 (In Persian).

[11] Sing, S. K.; Kulkarni, A. V.; Chaudhary, B. S. “Hyper Spectral Analysis of Snow Reflectance to Understand the Effects of Contamination and Grain Size.”; Ann. Glacial. 2010, 51.

[12] [۱۲] Salminen, M. P. “The Behavior of Snow and Snow-Free Surface Reflectance In Boreal Forests: Implications to the Performance of Snow Covered Area Monitoring”; Remote Sens. Environ. 2009, 113, 907-918.

[13] Warren, S. G. “Optical Properties of Snow”; Rev. Geophys. 1982, 20, 67-89.

[14] Weidner, V. R.; Hsia J. J. “Reflection Properties of Pressed Polytetrafluoroethylene Powder”; J. of the Optical Society of America, 1981, 71, 856-861.

[15] Gunnar, W. L. “Camouflage Paint Reflecting Ultraviolet Light for Use in Snowy Country”; US Patent 3300325, 1967.

[16] Budde, W. “Standards of Reflectance”; J. of the Optical Society of America, 1960, 50, 217-220.

[17] Hass, G.; Waylonis J. E. “Optical Constants and Reflectance and Transmittance of Evaporated Aluminum in the Visible and Ultraviolet”; J. of the Optical Society of America, 1961, 51, 719-725.

[18] Gupta, K. K.; Tripathi, V. S.; Ram, H.; Raj, H. “Sun Protective Coatings”; Color Age, 2002, 49, 35-40.

[19] Nemati, S. “Introduction to Knowledge of Polymers and Basic Terminology”; Sarvenegar Press: Tehran, 1393 (In Persian).

[20] Wikipedia, “Polyvinylidene Fluoride”; http://en.wikipedia.org/wiki/Polyvinylidene_fluoride.

[21] Crecorio, R.; Cestari, M. “Effect of Crystallization Temperature on the Crystalline Phase Content and Morphology of Poly (vinylidene Fluoride)”; J. Polym. Sci. 1994, 32, 859-870.

[22] Crecorio, R.; Ueno, E. M. “Effect of Crystalline Phase, Orientation and Temperature on the Dielectric Properties of Poly (Vinylidene Fluoride) (PVDF)”; J. Polym. Sci. 1999, 34, 4489-4500.