

طراحی ساختارهای چند لایه‌ای رنگ‌دانه‌ها برای پوشش‌های استتاری اپتیکی

مجتبی زمانی^۱، صفا خزائی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی ۲- استادیار دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۵/۰۷/۲۴، پذیرش: ۹۵/۱۱/۲۶)

چکیده

امروزه با پیشرفت و گسترش چشمگیر سامانه‌های تصویربرداری فراطیفی استفاده از دانش طیفی مواد برای طراحی و ساخت پوشش‌های استتاری اجتناب‌ناپذیر شده است. در این تحقیق به منظور طراحی پوشش‌های استتار اپتیکی دارای شباهت طیفی مناسب با پس‌زمینه مورد نظر، ضخامت بهینه‌ی ساختار چند لایه‌ای رنگ‌دانه‌های پوشش در محدوده‌های مرئی و مادون قرمز بازتابی با استفاده از یک فیلتر عبوردهنده تداخلی چند لایه تعیین شده است. در فرایند انجام‌شده از ماتریس انتقال و الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. به عنوان مطالعه موردی، طراحی ساختار چند لایه‌ای پوشش استتار اپتیکی برای پس‌زمینه‌های پوشش گیاهی با استفاده از دو ماده‌ی ژرمانیوم و سولفید روی انجام شده است. نتایج این تحقیق نشان داده است که بر اساس معیارهای شباهت طیفی مختلف و ضریب همبستگی منحنی بازتابندگی طیفی ساختار چند لایه‌ای پیشنهادشده مشابه پوشش گیاهی مورد نظر است.

کلیدواژه‌ها: استتار اپتیکی، بازتابندگی طیفی، پوشش گیاهی، رنگدانه

Design of Multi-Layer Pigment Structures for Optical Camouflage Coating

M. Zamani, S. Khazaei*

Imam Hussein University

(Received: 15/10/2016; Accepted: 14/02/2017)

Abstract

Nowadays, with the astounding progress and development of hyperspectral imaging systems, the use of spectral knowledge of materials for building camouflage coatings is inevitable. In order to design the optical camouflage coatings possessing appropriate spectral similarity with the intended background, this study determines the optimal thickness of the multi-layer pigment structure in the visible and infrared ranges using a multi-layer interference transmittance filter. In the performed process, the transmittance matrix method and the genetic algorithm have been used. As a case study, the design of a multi-layer structure of optical camouflage in vegetation backgrounds is executed using germanium and zinc sulfide. Results suggest that the multi-layer structure is similar to that of the vegetation, based on the different spectral similarity measures and the correlation coefficient.

Keywords: Camouflage Coating, Spectral Reflectance, Vegetation, Pigment

۱. مقدمه

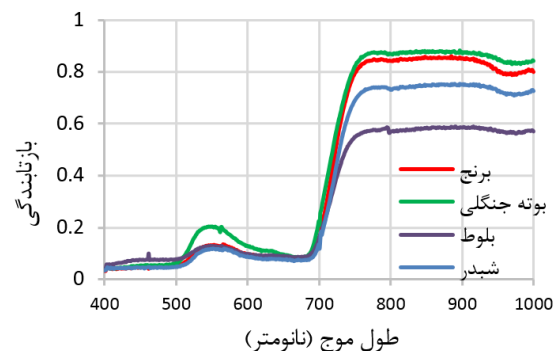
موثر در ناحیه‌ی مادون قرمز در حال توسعه هستند [۴-۶]. به دلیل تنوع گیاه سبز، توزیع نامتوازن آن و فاکتورهای بازتاب طیفی گوناگون، دقت این شبیه‌سازی مشکل است. بنابراین توجه محققان بر روی مطالعه رنگدانه‌های سبز استتاری که ویژگی‌های طیفی مشابه گیاه سبز را دارند متمرکز شده است [۳ و ۷]. مواد استتاری سبز قدیمی معمولاً از رنگدانه‌های استتاری سبز، در لباس‌ها، تورها و پوشش‌های استتاری استفاده می‌کردند. به طور گسترده این مواد استتاری سبز قدیمی تنها برای قرارگیری در موقعیت بصری استفاده می‌شوند و طیف این پوشش‌ها نمی‌تواند با طیف گیاه سبز منطبق باشد [۸].

در سال‌های اخیر ساختار چند لایه‌ای، مواد جدیدی با پوشش لایه‌های نازک تولید می‌کند [۹]. ویژگی‌های این ساختار با نور مرئی و بازتابندگی مادون قرمز سازگار است که به نیازمندی بخش طیفی کاربردهای نظامی به خوبی تحقق می‌بخشد. تولید این پوشش‌ها با توجه به ویژگی‌های طیفی آن می‌تواند به عنوان رنگدانه‌های سبز جدید جهت استفاده در کاربردهای نظامی معرفی شود. در حال حاضر تکنیک‌های طراحی و تولید لایه به مرحله‌ی مطمئنی رسیده است که یک زیربنای خوب در کاربردهای استتاری مواد ایجاد می‌کند. در مقایسه با مواد استتاری سبز قدیمی، این مواد استتاری سبز می‌توانند با سایر مواد لایه نازک ترکیب شوند تا استتار بر روی بخش طیف آن تحقق یابد [۸].

ویک و بریدی [۱۰] پیشرفت‌هایی که در طراحی پوشش‌های طیفی در محدوده‌ی مرئی و مادون قرمز نزدیک صورت گرفت را به طور خلاصه بیان کردند و همچنین چند چالش را که در گسترش طیفی ناحیه‌ی حرارتی مورد نیاز است ذکر کردند. آن‌ها اعتقاد داشتند که رنگدانه‌های اورگانیک و غیر اورگانیک با بازتابندگی محدود در ناحیه‌ی مرئی نباید استفاده شوند چون جذب بالایی در ناحیه‌ی حرارتی دارند که سبب گسیل زیاد در این ناحیه می‌شود. با استفاده از تجربیات گسترده آن‌ها آموختند که بهره‌برداری از پراکنش ذرات بزرگ رنگدانه‌ها، در ناحیه‌ی حرارتی محدود می‌شود. یک رویکردی که ویک و بریدی [۸] نتیجه گرفتند، استفاده از رنگدانه‌های لایه‌های فلزی مانند آلومینیوم بود که بازتابندگی شدیدی در طیف‌های مرئی و مادون قرمز ایجاد می‌کند. آن‌ها همچنین تأثیر الیاف را در سیستم‌های پارچه‌ای رنگی گزارش دادند. آن‌ها پیشنهاد دادند انتخاب رنگدانه‌ها با ضریب شکست، سایز و شکل ذرات نور به طور مؤثری در باندهایی که جذب ماده چسبنده (رزین) وجود دارد پراکنده می‌کند. رزین‌ها و الیاف‌ها با جذب پایین در بخشی از ناحیه‌ی حرارتی به وسیله‌ی چندین محقق مطالعه شده‌اند [۱۱-۱۳].

در سال‌های گذشته استتارهای نظامی عمدتاً طوری طراحی شده‌اند تا بهترین عملکرد را در ناحیه مرئی در برابر انواع مختلف پیش زمینه‌ها از قبیل جنگل‌ها، بیابان‌ها، مناطق قطبی و غیره داشته باشند، بدون توجه اساسی به اینکه چگونه اشیا در برابر انواع مختلف پیش زمینه‌ها و در طول موج‌های مختلف مخفی می‌شوند [۱]. اخیراً اکثر طراحان استتار از دانش طیفی مواد استفاده می‌کنند تا تجهیزاتی مانند لباس و تور را برای مخفی شدن در محیط‌های مختلف طراحی کنند. با این حال، از این رویکرد نیز می‌توان برای بهره‌برداری از نقاط ضعف استتار دشمنان و وسایل دیگر مخفی شده استفاده کرد تا از آن بتوان برای انتخاب بهینه سیستم‌های تصویربرداری که جهت تشخیص اهداف نظامی استفاده می‌شوند، بهره جست [۲].

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های استتار در مناطق سبز و جنگلی همگون شدن با گیاه سبز است. در انواع مختلف مواد استتاری اپتیکی، رنگدانه فاکتور اساسی برای عملکرد استتار در این مناطق دارد. بر اساس عملکرد طیفی پس زمینه در این مناطق، رنگدانه استتاری اپتیکی، به دو نوع تقسیم می‌شوند. نوع اول، رنگدانه سبز است که مشابه ویژگی‌های طیفی گیاه سبز است و نوع دیگر رنگدانه غیر سبز است که مشابه ویژگی‌های طیفی خاک است. ویژگی‌های اصلی گیاه سبز به وسیله برگ آن تعیین می‌شود. با توجه به شکل (۱) با نمایش طیف چندین نوع گیاه مختلف که از کتابخانه‌ی طیفی نرم‌افزار Envi 5.3 به دست آمده است، مشخص می‌شود که در طیف گیاه سبز یک پیک (قله) بازتابی در نزدیک محدوده ۵۵۰ نانومتر و یک جذب در محدوده ۶۸۰ نانومتر و همچنین یک پیک بازتابی شدید در محدوده ۶۸۰ تا ۷۴۰ نانومتر وجود دارد. پیک بازتابی در محدوده ۷۵۰ نانومتر تا محدوده ۱۱۰۰ نانومتر ادامه پیدا می‌کند [۳].



شکل ۱. رفتار طیفی چند گیاه به دست آمده از نرم‌افزار Envi 5.3

با استفاده از انتخاب رنگدانه مناسب که از نظر مرئی و بازتابندگی مادون قرمز مشابه گیاه سبز باشد، می‌توان به استتاری موثر دست یافت. به همین دلیل رنگدانه‌های جدید برای عملکرد

مخصوصاً در سیستم‌های ساده مانند یونیفرم مورد استقبال قرار گرفته شد.

عدم ارائه راه حلی جهت تعیین ضخامت ساختار لایه‌ها ضعف تحقیقات پیشین [۱۷-۱۴] است که تأثیر به‌سزایی در رفتار طیفی ساختار چند لایه‌ای دارد. بسیاری از محققین چند ضخامت مختلف برای رسیدن به طیف مورد نظر خود در نظر گرفته‌اند یا به صورت تجربی ضخامت‌ها را محاسبه کرده‌اند، بدون آنکه روش مشخصی برای به دست آوردن بهترین ترکیب ضخامت لایه‌ها ارائه شود. از سوی دیگر طراحی لایه‌ای که بتوان به عنوان رنگدانه سبز در پوشش‌های استتاری مناطقی با پوشش گیاهی سبز مورد استفاده قرار بگیرد، ضروری است. بدین منظور در این تحقیق با ارائه روشی نوین با استفاده از فیلتر عبور دهنده تداخلی چند لایه^۴، لایه‌ای طراحی می‌شود که با تعیین ضخامت بهینه ساختار چند لایه‌ای آن، از نظر طیفی در محدوده مرئی و مادون قرمز مشابه گیاه سبز باشد. این شبیه‌سازی به وسیله روش ماتریس انتقال و بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک انجام می‌شود. منحنی بازتابندگی طیف لایه پیشنهاد داده شده مشابه گیاه سبز است و پس از تولید آن، می‌تواند به رنگدانه تبدیل شود و پس از ترکیب با رزین‌ها به عنوان رنگ نهایی در استتار تجهیزات نظامیان مناطق با پوشش گیاهی سبز به کار گرفته شود.

۲. مبانی نظری تحقیق

۲-۱. فیلتر عبور دهنده تداخلی چند لایه

در فیلتر عبور دهنده تداخلی چند لایه، برای استفاده در منطقه طیفی مادون قرمز از موادی شامل یک ماده با ضریب شکست بالا و ماده‌ای با ضریب شکست پایین استفاده می‌شود. ماده با ضریب شکست بالا شامل موادی چون تلوراید آرسنیک و یا ژرمانیم و مواد با ضریب شکست پایین شامل موادی از گروه کلرید نقره، کلرید سرب و سولفید روی هستند. این موضوع مربوط به فیلتر تداخلی چند لایه جدید و بهبود یافته است که برای استفاده در منطقه مادون قرمز با طول موج بلند و متوسط به کار گرفته می‌شود. فیلترهای تداخلی، ابزار شناخته‌شده‌ای برای عبور همزمان فرکانس‌های تابشی انتخابی^۵ و انعکاس فرکانس‌های نامطلوب^۶ هستند. منحنی مشخصه عبور فیلتر تداخلی مثال بالا در شکل (۲) نشان داده شده است.

در شکل (۲) میزان عبور دهی با درصد و اندازه طول موج با واحد میکرون بیان می‌شود. حداکثر عبور ۰/۸ است و نسبت طول

نیلسون و همکاران [۱۴] رنگدانه‌ای با ویژگی کاهش گسیل رنگی آن طراحی کردند. آن‌ها به منظور تعیین ویژگی‌های طیفی رنگدانه‌های مواد مختلف از نرم‌افزار FILM 2000 استفاده کردند. پس از انتخاب مواد مناسب، ساختار سه لایه‌ای از طریق روش لایه نشانی اسپاترینگ^۱ ساخته و با پودر کردن لایه تولیدشده، رنگدانه تولید شد. رنگدانه تولیدشده به منظور تولید رنگ نهایی با یک ماده چسبنده (رزین^۲) ترکیب شد. رنگ نهایی جهت استفاده در پوشش‌های استتاری آژانس تحقیقات دفاعی سوئد مورد استفاده قرار گرفت.

هالبرگ و همکاران [۱۵] با همکاری مرکز تحقیقاتی نیروی دفاعی فنلاند در پروژه‌ای به گسترش کاهش گسیل رنگ‌های استتاری برای استتار در ناحیه مادون قرمز بدون کاهش عملکرد در ناحیه مرئی پرداختند. آن‌ها در مطالعه خود انواع مختلف رنگدانه‌هایی که در کاربردهای با گسیل کم استفاده می‌شوند مورد مقایسه قرار دادند. آن‌ها رنگدانه‌های لایه‌ای Al، Ag و Cu با بازتابندگی بالا در حالت بدون پوشش و پوشیده شده با عایق را مورد مطالعه قرار دادند. با این وجود از آنجایی که این فلزات بازتابندگی بالایی در ناحیه‌های مرئی دارند، آن‌ها نتیجه گرفتند که این نوع رنگدانه‌ها عملکرد استتار را در بخشی از ناحیه مرئی کاهش می‌دهند. آن‌ها از یک رنگدانه لایه‌ای $TiO_2/Au/TiO_2$ که ضد بازتاب است بهره‌برداری کردند که با استفاده از کاتد پرانی ماگنترون^۳ تولید می‌شد.

شین و همکاران [۱۶] یک رنگدانه با ویژگی کاهش گسیل با لایه‌های Al (آلومینیوم)، SiO_2 (سیلیکون دی اکسید)، Fe_2O_3 (آهن سه اکسید)، FeO (آهن دو اکسید)، $Fe_4[Fe(CN)_6]_3$ (آهن سه فروسیانید)، Cr_2O_3 (کروم سه اکسید) و Cr (کروم) به روش لایه‌ی نشانی رسوب‌دهی شیمیایی تولید کردند. الیاف با رنگدانه حاصل از لایه‌ی فوق، رزین و سایر مواد افزودنی ترکیب شدند و به وسیله‌ی تجهیزات و دوربین‌های اندازه‌گیری حرارتی و مادون قرمز مرود ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که این رنگدانه نسبت به رنگدانه Al/SiO_2 در کاهش گسیل و استتار اپتیکی موثرتر است.

مائو و همکارانش [۱۷] به منظور کاهش گسیل با استفاده از رنگدانه‌های دو ماده آلومینیوم و سولفید روی پوششی برای استتار لباس‌های نظامیان پیشنهاد دادند. رنگدانه‌ها با ویژگی‌های رنگی‌شان از نظر قابلیت کنترل سطح مورد توجه قرار گرفتند. این پیشرفت‌ها در طراحی طیفی برای اهداف کنترل حرارتی

⁴ Multilayer Interference Transmittance Filter

⁵ Selected Radiation Frequencies

⁶ Simultaneously Reflecting Undesirable Frequencie

¹ Sputtering

² Binder

³ Magnetron

۲-۲. ماتریس انتقال

بر اساس نظریه عبور نور در لایه، نور با طول موج λ با زاویه θ_0 به سطح لایه برخورد می‌کند. شاخص بازتابندگی بالای سطح لایه، هوا با ضریب شکست n_0 است. با فرض اینکه تانژانت اجزای میدان الکتریکی و مغناطیسی در لایه اول E و H است، تانژانت اجزای میدان الکتریکی و مغناطیسی در لایه $(l+1)$ به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود [۸].

$$\begin{bmatrix} E_l \\ H_l \end{bmatrix} = M_l \begin{bmatrix} E_{l+1} \\ H_{l+1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

در رابطه‌ی بالا، M ویژگی ماتریس در لایه‌ی اول است و به صورت رابطه‌ی (۳) بیان می‌شود [۸].

$$M = \begin{bmatrix} \cos \delta_1 & \frac{\sin \delta_1}{\eta_1} \\ j\eta_1 \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

که در آن،

$$\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1 \cos \theta \quad (4)$$

$$\eta_1 = \begin{cases} \frac{n_1}{\cos \theta_1} & TM \\ n_1 \cos \theta_1 & TE \end{cases} \quad (5)$$

در رابطه (۴)، n_1 و d_1 به ترتیب ضریب شکست و ضخامت در لایه اول هستند. در رابطه (۵) نیز θ_1 زاویه بازتاب در لایه اول است. وقتی ساختار لایه متشکل از چندین لایه باشد ماتریس ویژگی کلی به صورت زیر تعریف می‌شود [۸]:

$$M = \prod_{l=1}^k M_l \quad (6)$$

اگر المان‌های ماتریس M را به صورت رابطه‌ی (۷) بنویسیم، بازتاب نور ورودی (R)، میزان نور عبوری (T) و میزان جذب (A) به صورت زیر محاسبه می‌شوند [۸].

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (7)$$

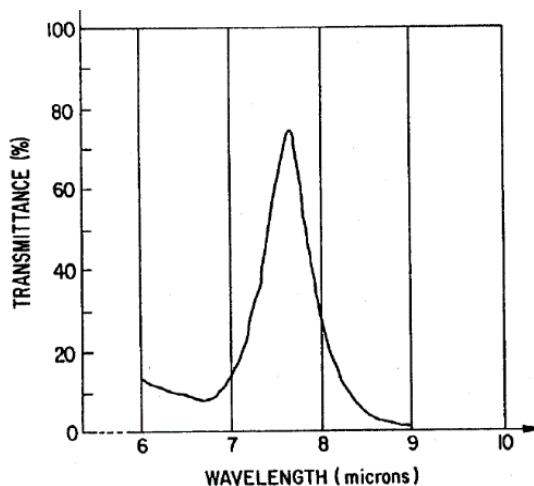
$$R = \left| \frac{m_{11} + \eta_{k+1} m_{12} - \eta_0^{-1} (m_{21} + \eta_{k+1} m_{22})}{m_{11} + \eta_{k+1} m_{12} + \eta_0^{-1} (m_{21} + \eta_{k+1} m_{22})} \right|^2 \quad (8)$$

$$T = \frac{4 \operatorname{Re}(\frac{\eta_{k+1}}{\eta_0})}{\left| m_{11} + \eta_{k+1} m_{12} + \eta_0^{-1} (m_{21} + \eta_{k+1} m_{22}) \right|^2} \quad (9)$$

$$A = 1 - R - T \quad (10)$$

موج حداکثر تقسیم بر دامنه نزدیک ۱۶ است که نتیجه خوبی برای یک فیلتر ۹ لایه خواهد بود. این فیلترها اساساً از لایه‌های متناوب از مواد، یکی با ضریب شکست بالا (n_H) و دیگری با ضریب شکست نسبتاً پایین (n_L) تشکیل شده‌اند.

اگر ضخامت لایه‌ها به درستی انتخاب شود، بازتابندگی طول موج‌های مشخصی از مواد، تضعیف شده و در نتیجه از پرتو عبور یافته حذف خواهند شد. سایر طول موج‌ها از فیلتر عبور می‌کنند. از آنجایی که در طول موج‌های مختلف طیف گیاه نواحی جذب و بازتاب وجود دارد، بنابراین می‌توان با تعیین ضخامت مناسب لایه‌ها و با توجه به ساختار این فیلتر به طیف مورد نظر دست یافت.



شکل ۲. نمودار مشخصه عبور دهی در فیلتر تداخلی بر حسب طول موج [۱۸]

از آنجا که فیلترهای تداخلی مزیت‌های مختلفی نسبت به انواع دیگری از فیلترهای تابشی دارند، به طور گسترده‌ای در جایی که امکان فیلتر کردن باند طیفی بسیار باریک اشعه وجود داشته باشد، استفاده می‌شوند. ساختار فیلتر تکمیل شده را می‌توان به صورت زیر نشان داد [۸].

$$\frac{L}{2} HLHLHLH \frac{L}{2} \quad (1)$$

در رابطه‌ی فوق L ماده ضریب شکست پایین و H ماده با ضریب شکست بالا است. به این ترتیب فیلتر تهیه شده در واقع فیلتری شامل لایه‌های ساخته شده با اعداد فرد ۳، ۵، ۷، ۹... است. محققین در گذشته [۱۸] برای پیدا کردن مواد با ضریب n_H تا بیشترین حد ممکن و n_L تا کمترین حد ممکن در تلاش بوده و با استفاده از ترکیباتی مانند سولفید روی، با ضریب ۲/۲۸، به عنوان مواد با ضریب شکست بالا و فلوراید منیزیم با ضریب ۱/۳۸ به عنوان ماده با ضریب شکست پایین، موفق به ساخت فیلترهایی کاملاً رضایت بخش در ناحیه طیف مرئی و مادون قرمز شده‌اند [۱۹].

الگوریتم جستجویی همانند نیروی تشخیص ابتکاری انسان در عمل جستجو تشکیل می‌دهد. محدوده کاری الگوریتم ژنتیک بسیار وسیع است و هر روز با پیشرفت روزافزون علوم و فناوری استفاده از این روش در بهینه‌سازی و حل مسائل بسیار گسترش یافته است. الگوریتم ژنتیک یکی از زیرمجموعه‌های محاسبات تکامل‌یافته است که رابطه مستقیمی با مبحث هوش مصنوعی دارد. این الگوریتم بر روی یکسری از جواب‌های مسئله به امید به دست آوردن جواب‌های بهتر قانون بقای بهترین را اعمال می‌کند. در هر نسل به کمک فرآیند انتخابی متناسب با ارزش جواب‌ها و تولیدمثل جواب‌های انتخاب‌شده به کمک عملگرهایی که از ژنتیک طبیعی تقلید شده‌اند، تقریب‌های بهتری از جواب نهایی به دست می‌آید. این فرآیند باعث می‌شود که نسل‌های جدید با شرایط مسئله سازگارتر باشد. در الگوریتم ژنتیک، در طی مرحله تولیدمثل^۱ از عملگرهای ژنتیک استفاده می‌شود. با تأثیر این عملگرها بر روی یک جمعیت، نسل^۲ بعدی آن جمعیت تولید می‌شود. عملگرهای انتخاب^۳، آمیزش^۴ و جهش^۵ معمولاً بیش‌ترین کاربرد را در الگوریتم‌های ژنتیک دارند.

به طور کلی یک الگوریتم ژنتیک باید قادر به عمل کردن شش وظیفه زیر باشد:

- پارامترهای جواب را به صورت ژن کد کند.
- رشته‌ای از ژن‌ها را ساخت یک کروموزوم به وجود آورد.
- جمعیتی از رشته‌های فوق را ایجاد کند.
- مقادیر برازندگی را برای هر عضو این جمعیت محاسبه کند.
- پس از انتخاب اعضای جمعیت بر اساس مقادیر برازندگی تکثیر را انجام دهد.
- عملگرهای تقاطع و جهش را برای تولید اعضای نسل بعدی انجام دهد.

۳. روش تحقیق

فلوچارت کلی روش پیشنهادی در شکل (۳) به نمایش گذاشته شده است. در فیلتر عبور دهنده تداخلی چند لایه باید از دو ماده یکی با ضریب شکست پایین و دیگری با ضریب شکست بالا استفاده شود. چیدمان لایه‌ها با توجه به رابطه (۱) به صورت پنج لایه‌ای است. پس از این مرحله باید ضخامت لایه‌ها مشخص شود. به کمک الگوریتم ژنتیک ضخامت این لایه‌ها به صورت بهینه تعیین می‌شود. خروجی این بخش ضخامت‌های بهینه است که بیش‌ترین شباهت را در بازتابندگی ساختار چند لایه به کمک ماتریس انتقال ایجاد می‌کنند.

۲-۳. معیارهای شباهت طیفی

در این تحقیق جهت ارزیابی و مقایسه بازتابندگی لایه طراحی‌شده با بازتابندگی چندین نوع گیاه و خاک تعدادی از معیارهای شباهت طیفی معرفی شده است. در جدول (۱) محاسبات مربوط به این معیارها نشان داده شده است. در این جدول s_i و s_j ، منحنی بازتابندگی مربوط به دو منحنی طیفی و در معادلات هستند که به صورت برداری به ابعاد L در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۱. معیارهای شباهت طیفی

منبع	فرمول	معیار	ردیف
[۲۰]	$SAM(s_i, s_j) = \cos^{-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^{nb} s_{i1} s_{j1}}{\sqrt{\sum_{i=1}^L s_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^L s_j^2}} \right)$	SAM	۱
[۲۱]	$P(\lambda_j) = P_j = \frac{s_{ij}}{\sum_{i=1}^L s_{ij}}$ $I_i(x) = -\log(p_i)$ $I_i(y) = -\log(q_i)$ $D(s_j \ s_i) = \sum_{i=1}^L q_i (I_i(s_j) - I_i(s_i))$ $D(s_i \ s_j) = \sum_{i=1}^L p_i (I_i(s_i) - I_i(s_j))$ $SID(s_i, s_j) = D(s_j \ s_i) + D(s_i \ s_j)$	SID	۲
[۲۲]	$SID_SAM(s_i, s_j) = SID(s_i, s_j) * \sin(SAM(s_i, s_j))$	SID-SAM	۳
[۲۲]	$JMD_SAM(s_i, s_j) = JMD_SAM(s_i, s_j) * \tan(SAM(s_i, s_j))$	JMD-SAM	۴
[۲۳]	$ED(s_i, s_j) = 2\sqrt{1 - \cos(SAM(s_i, s_j))}$	ED	۵
[۲۲]	$JMD(s_i, s_j) = \sqrt{\sum_{i=1}^L [\sqrt{p_i} - \sqrt{q_i}]^2}$ $p_k = \frac{s_{ik}}{\sum_{i=1}^L s_{ik}}$ $q_k = \frac{s_{jk}}{\sum_{i=1}^L s_{jk}}$	JMD	۶
[۲۴]	$OPD(s_i, s_j) = \sqrt{s_i^T p_{s_j}^+ s_j + s_j^T p_{s_i}^+ s_i}$ $p_{s_k}^+ = I - s_k (s_k^T s_k)^{-1} s_k^T, k = i, j$	OPD	۷
[۲۳]	$SCM(s_i, s_j) = \frac{n \sum_{i=1}^n s_{i1} s_{j1} - \sum_{i=1}^n s_{i1} \sum_{i=1}^n s_{j1}}{\sqrt{\left[n \sum_{i=1}^n s_{i1}^2 - n \left(\sum_{i=1}^n s_{i1} \right)^2 \right] \left[n \sum_{i=1}^n s_{j1}^2 - n \left(\sum_{i=1}^n s_{j1} \right)^2 \right]}}$	SCM	۸
[۲۵]	$r(s_i, s_j) = \frac{\sum_{i=1}^N s_{i1} s_{j1} - \frac{\sum_{i=1}^N s_{i1} \sum_{i=1}^N s_{j1}}{N}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N s_{i1}^2 - \frac{(\sum_{i=1}^N s_{i1})^2}{N}} \sqrt{\sum_{i=1}^N s_{j1}^2 - \frac{(\sum_{i=1}^N s_{j1})^2}{N}}}$	R ²	۹

۲-۴. الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک نوع الگوریتم جستجو است که برای اولین بار در دهه ۷۰ مطرح گردید. این الگوریتم که بر اساس انتخاب طبیعی پایه‌ریزی شده است، قدرت بقای شایسته‌ترین ساختار رشته‌ای را با عمل تعویض تصادفی اطلاعات ترکیب نموده و

¹ Reproduction

² Generation

³ Selection

⁴ Crossover

⁵ Mutation

جدول ۲. ساختار کروموزوم‌ها

$\frac{d_L}{2}$	d_H	d_L	d_H	$\frac{d_L}{2}$
-----------------	-------	-------	-------	-----------------

کروموزوم‌های برتر با در نظر گرفتن مقدار برازندگی جهت حضور در فرآیند تولید نسل جدید انتخاب می‌شوند. کروموزوم‌های برانده‌تر از شانس بالاتری برای انتخاب با روش انتخاب رقابتی^۲ برخوردار هستند. جمعیت جدید با در نظر گرفتن استراتژی حفظ نخبگان تولید می‌شود و فرآیند تکامل تا برآورده شدن شرط خاتمه ادامه می‌یابد. عملگرهای تقاطع و جهش تأثیر مستقیم در فرآیند تولید جمعیت جدید داشته و به عنوان ورودی به الگوریتم فوق داده می‌شود.

برای شبیه‌سازی طیف لایه مربوط به طیف گیاه سبز، در ساختارهای مورد نظر به کمک ماتریس انتقال باید ضخامت لایه‌ها را به گونه‌ای محاسبه کرد که بیش‌ترین شباهت طیفی را برای ساختار چند لایه نسبت به گیاه سبز به وجود آورد. مهم‌ترین بخش در این الگوریتم، تعیین تابع شایستگی است. تابع شایستگی مورد استفاده در الگوریتم ژنتیک به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\min \Phi = \sum_{j=350}^n [R(d | \lambda_j) - \bar{R}(\lambda_j)]^2 \quad (11)$$

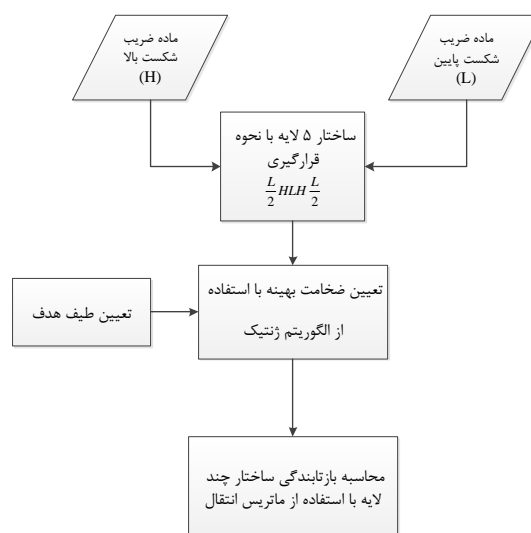
در رابطه بالا، میزان بازتابندگی واقعی ساختار لایه و $R(\lambda_j)$ میزان بازتابندگی گیاه هدف به ازای طول موج‌های λ_j است. در $\bar{R}(\lambda_j)$ از بازتابندگی واقعی یک گیاه استفاده شده است. نمودار زیر رفتار طیفی گیاه هدف را نشان می‌دهد.



شکل ۴. رفتار طیفی گیاه هدف

طیف گیاه هدف، بازتابندگی نوعی بلوط است (شکل ۴)) که توسط داده‌های سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا (USGS)^۳ از نرم‌افزار Envi 5.3 به دست آمده است. در جدول (۲) پارامترهای ژنتیک مورد استفاده در این تحقیق نمایش داده شده است. با تعریف پارامترهای الگوریتم ژنتیک و

در ساختار فیلتر چند لایه‌ای، ساختار پریودیک $\frac{L}{2}H\frac{L}{2}$ واحد اصلی ساختار است. می‌آو و همکاران [۸] در تحقیق خود تأثیر اندکی در پریودهای ۲، ۳ و ۴ نمودار بازتابندگی ساختار چند لایه‌ای در نظر گرفته‌اند. به دلیل پیچیدگی تکنولوژی ساخت لایه، تا حد امکان سعی در ساده‌سازی ساختار لایه می‌شود. به همین علت در ساختار لایه طراحی شده از کمینه پریود لایه استفاده می‌شود. بنابراین ساختار ۵ لایه‌ای را نسبت به ساختارهای ۷ و ۹ لایه‌ای ترجیح می‌دهیم. علت عدم استفاده از ساختار ۳ لایه‌ای این است که در ساختار ۵ لایه‌ای تغییرات نسبت به ساختار ۳ لایه‌ای در بین نواحی با بازتابندگی کم و زیاد محسوس‌تر است. بنابراین با توجه به نکات فوق ساختار ۵ لایه‌ای حالت بهینه‌ای بود که برای طراحی در نظر گرفته شد.



شکل ۳. فلوجارت کلی روش پیشنهادی

۳-۱. ساختار الگوریتم ژنتیک

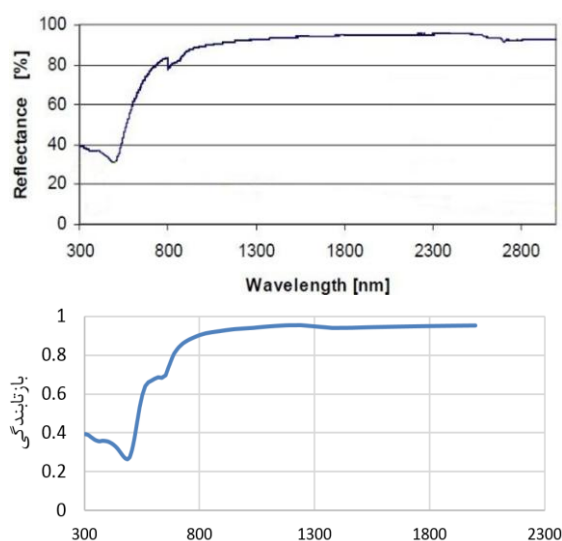
با توجه به انعطاف‌پذیری الگوریتم ژنتیک نسبت به دیگر روش‌های دیگر در زمینه بهینه‌سازی فرا ابتکاری و حساسیت کمتر آن به تعریف پارامترهای مینایی، در این تحقیق از الگوریتم ژنتیک به منظور تعیین ضخامت لایه‌ها استفاده گردید.

مقادیر ضخامت لایه‌ها برای ماده با ضریب شکست پایین و ماده با ضریب شکست بالا توسط الگوریتم ژنتیک مقداردهی می‌شوند. مقداردهی به این صورت انجام می‌شود که مجموعه‌ای از مقادیر ممکن برای هر یک از پارامترها معرفی می‌شوند و الگوریتم ژنتیک از میان این مقادیر به صورت تصادفی اعدادی را انتخاب کرده و کروموزوم‌ها را می‌سازد. روش کدگذاری در این تحقیق به صورت کدگذاری مقدار^۱ است. طول هر کروموزوم مورد استفاده معادل ۵ ژن در نظر گرفته شده است. جدول (۲) ساختار هر یک از کروموزوم‌ها را برای بهینه‌سازی ضخامت لایه‌ها نشان می‌دهد.

^۲ Tournament

^۳ United States Geological Survey

^۱ Value Encoding



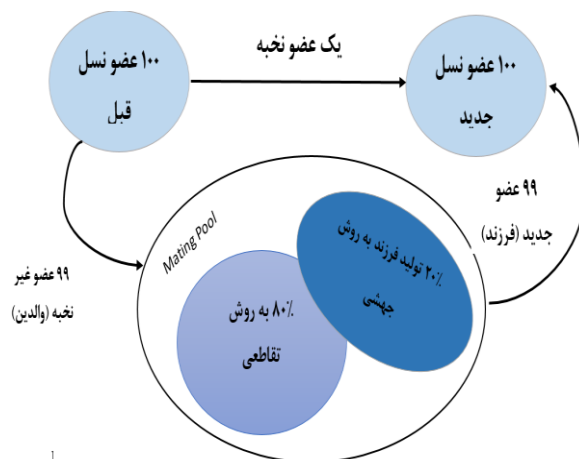
شکل ۶. نمودار بالا: میزان بازتابندگی شبیه‌سازی شده لایه‌ای از طلا (Au) در تحقیق نیلسون و همکاران [۱۴]، به دست آمده در نرم‌افزار FILM 2000. نمودار پایین: میزان بازتابندگی لایه طلا (Au) به کمک روش پیشنهادی

۴-۲. ارزیابی بازتابندگی لایه‌ی طراحی شده

خروجی الگوریتم ژنتیک، ضخامت لایه‌هایی بود که بیشترین میزان شباهت را با طیف گیاه از طریق ماتریس انتقال ایجاد می‌کردند. به کمک این الگوریتم ضخامت لایه‌های طراحی شده ۲۸/۶۰/۵۶/۶۰/۲۸ به دست آمدند.

با قرارگیری ضخامت‌های فوق در ماتریس انتقال، نمودار بازتابندگی در شکل (۷) به نمایش گذاشته شد. همان طور که در شکل (۷) مشخص است، رفتار طیفی لایه استخراج شده مشابه گیاه سبز است. یک پیک بازتابی در نزدیک محدوده ۵۰۰-۶۰۰ نانومتر و یک جذب در محدوده ۶۸۰-۷۰۰ نانومتر و همچنین یک پیک بازتابی شدید در محدوده ۶۸۰ تا ۷۴۰ نانومتر وجود دارد. پیک بازتابی در محدوده ۷۵۰ نانومتر تا محدوده ۱۱۰۰ نانومتر ادامه پیدا می‌کند. ضمن اینکه در این تحقیق شناسه ماتریسی زیرلایه در ماتریس انتقال، هوا ($n=1$) در نظر گرفته شده است و تاثیری در مقدار بازتابندگی لایه طراحی شده ندارد. در صورتی که از سایر مواد به عنوان زیر لایه استفاده شود باید محاسبات آن در ماتریس انتقال لحاظ گردد. از آنجایی که لایه طراحی شده در مناطق با پوشش گیاهی مورد استفاده قرار خواهد گرفت، عملکرد بازتابندگی طیفی این لایه با بازتابندگی طیف چندین نوع خاک و گیاه مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. بنابراین میزان همبستگی و معیارهای شباهت طیفی مابین لایه طراحی شده و طیف چندین نوع گیاه و خاک محاسبه خواهد شد.

پردازش آن در نرم‌افزار Matlab لایه بهینه شده، استخراج می‌گردد. شکل (۵) نشان دهنده فلوجارت ساختار الگوریتم ژنتیک هستند.



شکل ۵. فلوجارت الگوریتم ژنتیک

۴. نتایج و بحث

در این تحقیق به عنوان مورد مطالعاتی از ماده ژرمانیم (Ge) به عنوان ماده با ضریب شکست بالا و از ماده سولفید روی (ZnS) به عنوان ماده با ضریب شکست پایین استفاده شده است. این دو ماده همچنین در فیلتر تداخلی چند لایه در تحقیق می‌آو و همکاران [۸] مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق با انتخاب پریود ۲ و دو ماده ژرمانیم و سولفید روی مجموعاً ۵ لایه وجود خواهد داشت. در این بخش نتایج حاصل از ارزیابی ماتریس انتقال و همچنین لایه طراحی شده بررسی خواهیم کرد.

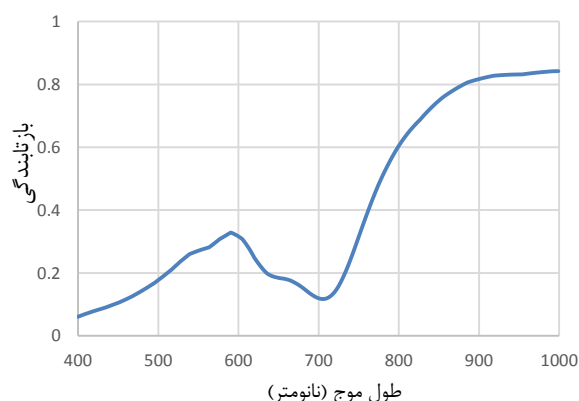
۴-۱. ارزیابی ماتریس انتقال

از ماتریس انتقال در این تحقیق به منظور محاسبه میزان بازتابندگی ساختار چند لایه‌ای استفاده شده است. محاسبه بازتابندگی ساختار چند لایه‌ای در بسیاری از تحقیقات توسط نرم‌افزارهای مختلف صورت گرفته است. به دلیل عدم دسترسی به اطلاعات کمی تحقیقات گذشته، ارزیابی با رسم نمودارهای بازتابندگی ساختار لایه‌ها صورت گرفته است. در شکل (۵)، میزان بازتابندگی لایه شبیه‌سازی شده طلا (Au) در تحقیق نیلسون و همکاران [۱۴] در نرم‌افزار FILM 2000 در کنار میزان بازتابندگی لایه طلا (Au) به کمک ماتریس انتقال نمایش داده شده است. همان طور که از نمودارهای شکل (۶) مشخص است شباهت بسیار زیادی در میزان بازتابندگی لایه مورد نظر به کمک ماتریس انتقال با بازتابندگی محاسبه شده در تحقیق نیلسون و همکاران [۱۴] وجود دارد که نشان می‌دهد این ابزار به درستی عمل می‌کند.

طیف لایه طراحی شده دارد. در بین تمامی معیارهای شباهت طیفی ارائه شده، گیاه بلوط کمترین مقدار را به خود نسبت داده است.

برای مثال معیار زاویه طیفی (SAM) در این تحقیق شامل کمترین مقدار برای طیف بلوط با میزان ۱۳,۲۵ و همچنین بیشترین مقدار با میزان ۲۵,۱ برای نوعی خاک است. برای سایر گیاهان و خاک‌های مختلف مقادیر این معیار بین ۱۳,۵ تا ۲۵,۱ است. با مقایسه جدول‌های (۳) و (۴) متوجه می‌شویم که مقادیر معیار شباهت طیفی جدول (۴) بیشتر از مقادیر معیار شباهت طیفی جدول (۳) هستند و این نشان‌دهنده شباهت طیفی بیشتر لایه طراحی شده به طیف گیاهان است و در میان گیاهان مختلف گیاه بلوط بیشترین شباهت طیفی را نسبت به سایر گیاهان دارد.

در واقع گیاه بلوط، همان گیاه هدف بود که در تابع شایستگی مورد استفاده قرار گرفت. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت خروجی الگوریتم ارائه شده در این تحقیق وابسته به تعیین بازتابندگی طیف ماده هدف است. این ماده می‌تواند گیاه، خاک و یا هر نوع ماده دیگر باشد. الگوریتم ارائه شده در این تحقیق سعی در بهینه‌سازی ضخامت لایه‌ها دارد به گونه‌ای که بیشترین شباهت با ماده هدف حاصل شود. لذا این تحقیق راهکار مناسبی را جهت تولید رنگدانه بومی محلی ارائه می‌دهد. بررسی مواد مناسب دیگر استتاری جهت تولید رنگدانه خارج از بحث در این تحقیق است و می‌تواند در تحقیقات آتی مورد ارزیابی و بررسی قرار گیرد.



شکل ۷. نمودار طیفی لایه‌ی طراحی شده با ضخامت‌های بهینه حاصل از الگوریتم ژنتیک

بازتابندگی گیاهان و خاک‌های مختلف از نرم‌افزار Envi 5.3 استخراج می‌شود. جدول‌های (۳) و (۴) میزان همبستگی و شباهت طیفی هر از گیاهان و خاک‌های مختلف را با بازتابندگی لایه‌ی مورد نظر نمایش می‌دهد. با مقایسه جدول‌های (۳) و (۴) مشخص می‌شود که طیف ساختار چند لایه بیشترین میزان شباهت را با طیف گیاهان دارد. هر چه مقدار معیار شباهت طیفی میان دو ماده کمتر باشد، آن دو ماده به صورت نسبی از نظر طیفی، شباهت بیشتری نسبت به هم دارند.

همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد بیشترین میزان همبستگی لایه‌ی طراحی شده با مقدار ۰,۹۲ برای گیاه بلوط (Leather Oak) است. همچنین معیارهای شباهت طیفی ارائه شده در این جدول‌ها نشان می‌دهد گیاه بلوط بیشترین میزان شباهت را به

جدول ۳. میزان همبستگی و شباهت طیف گیاهان مختلف با طیف ساختار چند لایه

معیارها انواع گیاهان	R ²	ED	JMD	OPD	SAM	SCM	SID	SID-SAM	JMD-SAM
چمیس (گل)	۰/۹۰۴۷	۰/۲۴۶۴	۰/۲۱۷۴	۳/۶۵۵۷	۱۴/۶۲۴	۰/۹۰۵۱	۰/۰۸۳۸	۰/۰۲۱۲	۰/۰۵۶۷
چمیس سبز	۰/۸۶۱۹	۰/۳۳۷۰	۰/۲۸۷۵	۴/۵۹۳۸	۱۹/۴۰۳	۰/۸۶۲۱	۰/۱۴۰۵	۰/۰۴۶۷	۰/۰۹۸۱
گُست ردوود (خشک)	۰/۸۷۱۵	۰/۲۸۵۳	۰/۲۱۶۲	۴/۶۲۰۹	۱۶/۴۰۳	۰/۸۷۱۹	۰/۰۸۲۷	۰/۰۲۳۴	۰/۰۶۳۶
گُست ردوود (سبز)	۰/۸۸۴۰	۰/۳۰۵۳	۰/۲۳۴۲	۵/۱۶۱۱	۱۷/۵۶۳	۰/۸۸۴۲	۰/۰۹۷۰	۰/۰۲۹۳	۰/۰۷۱۴
بلوط لیتر	۰/۹۲۰۵	۰/۲۳۰۸	۰/۱۵۳۴	۳/۱۴۹۰	۱۳/۲۵۲	۰/۹۲۰۸	۰/۰۴۱۵	۰/۰۰۹۵	۰/۰۳۶۱
کامن باک بوش	۰/۸۸۵۰	۰/۳۰۳۱	۰/۲۲۳۸	۵/۴۰۵۸	۱۷/۳۳۰	۰/۸۸۵۲	۰/۰۸۸۴	۰/۰۲۶۳	۰/۰۶۹۸
کویت باش ۱	۰/۸۷۸۶	۰/۲۸۱۷	۰/۱۸۶	۴/۵۰۵	۱۶/۱۹۶	۰/۸۷۸۹	۰/۰۶۱۱	۰/۰۱۷۰	۰/۰۵۴
کویت باش ۱	۰/۸۷۹۸	۰/۲۸۷۶	۰/۱۹۸۳	۴/۷۴۴۱	۱۶/۵۳۸	۰/۸۸۰۱	۰/۰۶۹۴	۰/۰۱۹۸	۰/۰۵۸۹
داو وید	۰/۸۵۵۰	۰/۳۵۳۲	۰/۲۱۷	۶/۵۰۲۷	۲۰/۳۴۶	۰/۸۵۵۲	۰/۰۸۲۸	۰/۰۲۸۸	۰/۰۸۰۵
چمن خشک	۰/۸۶۰۶	۰/۳۲۹۶	۰/۲۰۸۹	۴/۸۱۵۴	۱۸/۹۷۳	۰/۸۶۱۱	۰/۰۷۷۱	۰/۰۲۵۱	۰/۰۷۱۸
گُست سیب	۰/۸۶۷۳	۰/۲۸۵۶	۰/۱۷۲۱	۴/۷۶۷۶	۱۶/۴۲۲	۰/۸۶۷۶	۰/۰۵۲۳	۰/۰۱۴۸	۰/۰۵۰۷
بلوط لایو	۰/۸۷۲۰	۰/۳۰۵۰	۰/۲۱۸۱	۵/۰۷۹۰	۱۷/۵۴۱	۰/۸۷۲۲	۰/۰۸۴۰	۰/۰۲۵۳	۰/۰۶۸۹

جدول ۴. میزان همبستگی و شباهت طیف خاک‌های مختلف با طیف ساختار چند لایه

معیارها انواع خاک	R ²	ED	JMD	OPD	SAM	SCM	SID	SID-SAM	JMD-SAM
پلاگیت	۰/۶۲۱	۰/۳۹۳۷	۰/۲۱۲۱	۲/۵۵۸	۲۲/۷۰۵	۰/۶۲۱۳	۰/۰۷۹۰	۰/۰۳۰۵	۰/۰۸۸۸
هاپلاستال	۰/۶۲۵۰	۰/۳۹۱۸	۰/۲۱۱۳	۲/۳۵۷۱	۲۲/۵۹۳۵	۰/۶۲۵۱	۰/۰۷۸۳	۰/۰۳۰۱	۰/۰۸۷۹
آگیالیو	۰/۶۳۶۷	۰/۴۰۰۲	۰/۲۲۸۲	۲/۱۴۵۸	۲۳/۰۸۳۹	۰/۶۳۶۷	۰/۰۹۱۶	۰/۰۳۵۹	۰/۰۹۷۲
فراگیولیوف	۰/۵۸۸۱	۰/۴۲۳۸	۰/۲۴۰۵	۲/۹۱۸۱	۲۴/۴۶۶۳	۰/۵۸۸۲	۰/۱۰۱۸	۰/۰۴۲۱	۰/۱۰۹۴
هاپلوبیت	۰/۶۱۴۷	۰/۴۳۴۷	۰/۲۲۰۱	۲/۴۰۹۲	۲۵/۱۰۵۰	۰/۶۱۴۸	۰/۰۸۳۲	۰/۰۴۰۱	۰/۰۸۷۴
هاپلاکول	۰/۶۴۵۸	۰/۳۸۴۶	۰/۲۱۲۰	۲/۱۱۴۹	۲۲/۱۷۳۲	۰/۶۴۵۹	۰/۰۷۸۹	۰/۰۷۸۹	۰/۰۸۶۴

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق روشی نوین در طراحی لایه‌ای به منظور استفاده در رنگدانه‌های استتاری ارائه شد که از این رنگدانه می‌توان در کاربردهای استتاری در مناطق با پوشش گیاهی سبز استفاده کرد. به منظور تولید رنگدانه‌ی جدید از دو ماده ژرمانیم و سولفید روی استفاده شد تا لایه استتاری سبز رنگی به وسیله ماتریس انتقال و الگوریتم ژنتیک طراحی شود. در این تحقیق، بر اساس معیارهای شباهت طیفی و ضریب همبستگی ($R^2=0.92$) منحنی بازتابندگی طیفی ساختار چند لایه‌ای پیشنهاد شده مشابه گیاه سبز است و لذا پس از تولید می‌تواند به عنوان رنگدانه در رنگ مواد استتاری مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت خروجی الگوریتم ارائه شده در این تحقیق وابسته به تعیین بازتابندگی طیف ماده هدف است. این ماده می‌تواند گیاه، خاک و یا هر ماده دیگر باشد. الگوریتم ارائه شده سعی در بهینه‌سازی ضخامت لایه‌ها دارد به گونه‌ای که بیش‌ترین شباهت با ماده هدف حاصل شود. لذا این تحقیق راه کار مناسبی را جهت تولید رنگدانه بومی محلی ارائه می‌دهد. در صورتی که روش پیشنهادی این تحقیق در فاز اجرایی قرار بگیرد می‌توان از زیر لایه‌هایی چون پلی کربنات‌ها و شیشه استفاده کرد. لایه پس از تولید به یکی از روش‌های لایه نشانی، از روی سطح زیر لایه برداشته می‌شود و پس از ترکیب با ماده چسبنده (رزین) و افزودنی‌ها به عنوان رنگ نهایی معرفی می‌شود. از آنجایی که ماده چسبنده رزین در بازتابندگی نهایی رنگ به دست آمده تأثیر زیادی خواهد داشت بهتر است برای حصول نتایج دقیق‌تر از خود ماده چسبنده به عنوان زیر لایه استفاده کرد. بدین جهت باید ضریب شکست ماده چسبنده محاسبه شود.

۶. مراجع

- [1] Farley, V.; Kastek, M.; Chamberland, M.; Lagueux, P.; Dulski, R.; Trzaskawka, P. "Multispectral and Hyperspectral Advanced Characterization of Soldier's Camouflage Equipment"; International Society for Optics and Photonics 2013, 8743, 11-24.
- [2] Hodgkin, V. A.; Hixson, J. G.; Corbin, T. "Impact of Waveband on Target-to-Background Contrast of Camouflage"; International Society for Optics and Photonics. 2012, 8355, 19-30.
- [3] Hu, Z. Y.; Chen H. S. "Research on New Green Camouflage Pigments"; Adv. Mater. Res. 2011, 282, 666-669.
- [4] Bohman, L. "Sensors against Ground Targets"; Swedish Defence Research Agency, 2012.
- [5] Ramsley, A. O.; Bushnell, W. B. "Development of the U.S. Woodland Battle Dress Uniform"; US Army Natick, 1981.
- [6] Frankel, K.; Sousa, S.; Cowan, R.; King, M. "Concealment of the Warfighter's Equipment through Enhanced Polymer Technology"; U.S. Army Natick Soldier Center Natick, 2004.
- [7] Zhang, H.; Zhang, J. Ch. "Near-Infrared Green Camouflage of Cotton Fabrics Using Vat Dyes"; Journal of the Textile Institute 2011, 99, 83-88.
- [8] Miao, L.; Ming, S.; Peng, Z.; Chao, W.; Liang, X. Y. "Design of Camouflage Material for Visible and Near Infrared Based on Thin Film Technology"; Proc. of SPIE. Conf. 2015, 9795, 21-31.
- [9] Tang J. F.; Gu, P. F.; Liu, X.; Li, H. "Modern Optical Thin Film Technology"; Machinery Industry Press: Beijing, 1989.
- [10] Wake, L.; Brady, R. "Formulating Infrared Coatings for Defence Applications"; Material Research Laboratory, 1993.
- [11] Sward, G. G.; Jacobsen, A. E. "Paint Testing Manual"; A. Soc. Test. Mater: Philadelphia, 1972.
- [12] Lee, H. S.; Staaf, O.; Ghaem, H. "IR-Properties of Some Binders for the Coatings Industry"; FOA-R-00-01576-615, 2000.
- [13] Brady, R. F. "The Chemistry of Film-Forming Resins"; J. Prot. Coatings Linings, 1987.
- [14] Nilsson, C.; Halberg, T. "Multilayer Structures for Low Emissive Paint"; Swedish Defence Research Agency, 2001.

- [21] Ding, J. G. "A Novel Method for Spectral Similarity Measure by Fusing Shape and Amplitude"; *J. Eng. Sci. Tech. Rev.* 2015, 8, 172-179.
- [22] Van, D. M.; Bakker, W. "Cross Correlogram Spectral Matching"; *Int. J. Remote Sensing* 1997, 18, 1197-1201.
- [23] Gower, J. C. "Measures of Similarity, Dissimilarity and Distance"; *Encyclopedia of Statistical Sciences* 1985, 5, 397-405.
- [24] Harsanyi, J. C.; Chang, C. I. "Hyperspectral Image Classification and Dimensionality Reduction: An Orthogonal Subspace Projection Approach"; *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 1994, 32, 779-785.
- [25] Chengteh, L.; Yang, W. "Development of the Colle-Salvetti Correlation-Energy Formula into a Functional of the Electron Density"; *Physical Review* 1988, 37, 785-803.
- [15] Hallberg, T.; Heikkila, T.; Karlsson, H.; Salonen, P. S.; Nilsson, C.; Janis, A. "Development of Low-Emissive Camouflage Paint"; Swedish Defence Research Agency, 2005.
- [16] Shen, F. C.; Feng, X. X.; Ma, T.; Zhang, T. C.; Zhang, H.; Gao, P. G. "Study on the Low-Emissive Camouflage Pigment"; *Adv. Mater. Res.* 2013, 624, 303-306.
- [17] Mao, Z.; Wang, W.; Liu, Y.; Zhang, L.; Xu, H.; Zhong, Y.; "Infrared Stealth Property Based on Semiconductor (M)-To-Metallic (R) Phase Transition Characteristics of W-Doped VO₂ Thin Films Coated on Cotton Fabrics"; *Thin Solid Films* 2014, 558, 208-214.
- [18] Apfel, J. H.; Gelber, R. M. "Infra-Red Interference Filter"; US Patent 3,290,203, 1972.
- [19] Vaziri, S. A.; Khalilzadeh, J. "Passive Laser Listening Countermeasure Using Antireflection Materials"; *Adv. Defence Sci. and Technol.* 2016, 3, 119-126 (In Persian).
- [20] Kruse, F. A.; Lefkoff, A. B.; Boardman, J. W.; Heidebrecht, K. B.; Shapiro, A. T.; Barloon, P. J.; Goetz, A. F. H. "The Spectral Image Processing System (SIPS) Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data"; *Remote Sensing of Environment* 1994, 44, 145-163.