

مقاله پذیرفته شده

عنوان مقاله: بررسی مشخصه‌های رنگی مواد رنگزای آنتوسیانین کاربردی در سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزای طبیعی

نویسندگان: ساناز شیراحمدحقیقی، راضیه جعفری، مزگان حسین‌نژاد

شماره مقاله: JCST-2001-1078

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸-۱۰-۱۵

تاریخ اصلاح: ۱۳۹۹-۵-۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹-۶-۱۱

خواهشمند است این مقاله به صورت زیر در مراجع قید شود:

س. شیراحمدحقیقی، ر. جعفری، م. حسین‌نژاد. بررسی مشخصه‌های رنگی مواد رنگزای آنتوسیانین کاربردی در سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزای طبیعی. نشریه علمی علوم و فناوری رنگ، (۱۳۹۹)، JCST-2001-1078.

این فایل pdf مقاله ویرایش نشده است که برای چاپ پذیرفته شده است. مکتب مقاله توسط دفتر نشریه علوم و فناوری رنگ تهیه شده و قبل از چاپ برای ویرایش نهایی به نویسنده مسئول مقاله ارسال می‌شود.

Accepted Manuscript

Title: Investigating of colorimetric characteristics of anthocyanin dyes applied in dye-sensitized solar cells

Authors: S. Shirahmad Haghighi, R. Jafari, M. Hosseinnazhad



To appear in: Journal of Color Science and Technology

Receives date: 05-01-2020

Revises date: 11-08-2020

Accepted date: 01-09-2020

Please cite this article as:

S. Shirahmad Haghighi, R. Jafari, M. Hosseinnazhad. Investigating of colorimetric characteristics of anthocyanin dyes applied in dye-sensitized solar cells. *J. Color. Sci. Tech.* (2020), JCST-2001-1078.

This is a PDF file of an unedited manuscript that has been accepted for publication. The manuscript will undergo copyediting, typesetting, and review of the resulting proof before it is published in its final form.

بررسی مشخصه‌های رنگی مواد رنگزای آنتوسیانین کاربردی در سلول‌های خورشیدی

حساس شده به مواد رنگزای طبیعی

ساناز شیراحمدحقیقی^۱، راضیه جعفری^{۲*}، مژگان حسین‌نژاد^۳

۱- کارشناسی ارشد، گروه پژوهشی فیزیک رنگ، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴

۲- استادیار، گروه پژوهشی فیزیک رنگ، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴

۳- استادیار، گروه پژوهشی مواد رنگزای آلی، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴

چکیده

امروزه توجه به انرژی پاک خورشیدی برای کاهش آلاینده‌گی سوخت‌های فسیلی رو به افزایش است. سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا، انرژی خورشیدی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. یکی از اجزا مهم سلول خورشیدی ماده رنگزا است. مواد رنگزای طبیعی به دلیل قیمت پایین و سهولت دسترسی بسیار مناسب هستند. برای این منظور ۹ ماده رنگزای طبیعی بر پایه آنتوسیانین‌ها برای کاربرد در سلول خورشیدی انتخاب و استفاده شدند. برای اولین بار از نمودار انعکاسی، فضا رنگ‌های CIELAB و CIELCH برای بررسی رفتار رنگی مواد رنگزای طبیعی استفاده شد و حجم گاموت رنگی آن مورد ارزیابی قرار گرفت. مواد رنگزای طبیعی اعمال شده در ساختار سلول خورشیدی دارای خلوص و روشنایی متفاوتی می‌باشند. در نهایت با استفاده از الگوریتم شناخته شده مرتبط، حجم گاموت رنگی برای مواد رنگزای طبیعی بر پایه آنتوسیانین در حدود 2.67×10^4 به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: مشخصه‌های رنگی، مواد رنگزای آنتوسیانین، انرژی سبز، سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا.

Investigating of colorimetric characteristics of anthocyanin dyes applied in dye-sensitized solar cells

Sanaz Shirahmad Haghghi¹, Razieh Jafari^{1,*}, Mozhgan Hosseinnezhad²

1- Department of Color Physics, Institute for Color Science and Technology, P. O. Box 16765-654, Tehran, Iran

2- Department of Organic Colorants, Institute for Color Science and Technology, P. O. Box 16765-654, Tehran, Iran

Abstract

Today, attention is paid to clean solar energy to reduce fossil fuel pollution. Dye-sensitized solar cells (DSSCs) convert light energy into electrical energy. One of the important components of DSSCs is the dye. Natural dyes are very convenient because of their low cost and ease of access. For this end, 9 natural dyes based on anthocyanin were selected and employed in DSSCs structure. For the first time, the reflection diagrams, CIELAB and CIELCH color spaces were achieved to study the color behavior of natural dyes applied in DSSCs. According to the results, the natural dyes applied in DSSCs structure have different color and lightness. Besides, the color gamut volume of anthocyanin based natural dyes applied in DSSCs was computed about 2.67×10^4 using well-known algorithm.

Keywords: Colorimetric characteristics, Anthocyanin natural dyes, Green energy, Dye-sensitized solar cells.

سلول‌های خورشیدی یا فتولتاییک، دستگاهی است که انرژی خورشیدی را به‌طور مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند [۱]. در سال ۱۹۹۱ گراتزل^۱ و همکارانش برای اولین بار موفق به ارائه سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا^۲ شدند [۲]. در ابتدا در ساخت سلول‌های خورشیدی از کمپلکس روتنیوم به‌عنوان ماده رنگزا استفاده شد که این دسته از مواد رنگزا معایبی همچون تهیه و خالص‌سازی دشوار و قیمت بالایی داشتند [۳]، به همین دلیل پژوهشگران تلاش کردند تا مواد رنگزایی را ارائه دهند که علاوه بر قیمت پایین، تهیه آن‌ها نیز ساده و مقرون‌به‌صرفه باشد [۴]. در این بین مواد رنگزای طبیعی یک گزینه مناسب برای جایگزینی بخش گران‌قیمت حساس‌کننده‌های سلول‌های خورشیدی شدند. در سال‌های اخیر اجزا مختلف گیاهان مانند گلبرگ گل‌ها، برگ و پوست درختان به‌عنوان مواد حساس‌کننده در ساختار سلول خورشیدی مورد استفاده و ارزیابی قرار گرفت. مواد رنگزای طبیعی مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی به چهار طبقه کاراتونوئیدها، فلاونوئیدها، کلروفیل‌ها، [بتالاین](#)^۳‌ها و آنتوسیانین‌ها تقسیم می‌شوند [۵-۷]. در این پژوهش مواد رنگزایی که به‌عنوان حساس‌کننده در سلول‌های خورشیدی استفاده شده است از طبقه آنتوسیانین‌ها است. آنتوسیانین‌ها بیشترین ترکیبات حساس به نور هستند که به‌طور طبیعی در میوه‌ها، گلبرگ گل‌ها، گل‌ها، باکتری‌ها، برگ‌ها و پوست درختان وجود دارند. گروه کربونیل و هیدورکسی موجود در ساختار آنتوسیانین‌ها باعث شده که به‌راحتی با سطح دی‌اکسید تیتانیوم پیوند داده و جذب شوند. آنتوسیانین دلیل وجود فام‌های جذاب قرمز مایل به زرد تا آبی در گیاهان، میوه‌ها و برگ‌ها می‌باشند [۸]. در تحقیقات صورت گرفته در سال ۲۰۱۸، پنگ^۴ و همکارانش مشخصات سلول‌های خورشیدی بر پایه گیاهان طبیعی را مورد بررسی قرار دادند. بررسی‌ها نشان داد که کلم قرمز بیشترین بازده تبدیل انرژی معادل ۰٫۱۶۲ را داراست [۹]. هم‌چنین در سال ۲۰۱۱، هویژی^۵ و همکارانش ۲۰ ماده رنگزای طبیعی که به‌عنوان حساس‌کننده در سلول‌های خورشیدی کاربرد داشتند را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که میوه منگوستن دارای بیشترین بازده تبدیل، معادل ۱٫۱۷ است [۱۰]. مطالعات متعددی در حوزه بازده تبدیل انرژی حساس‌کننده‌های طبیعی انجام شده است اما تاکنون خواص رنگی سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا به ندرت مورد بررسی قرار گرفته است. در سال ۲۰۱۱، آلوریا^۶ و همکارانش، اثر حلال‌های مختلف (اتیلن گلیکول^۷ و اتیلن دی‌امین^۸) را بر روی خواص نوری نانو ذرات کادمیم سولفید^۹ به‌عنوان نیمه‌هادی در

^۱ Gratzel

^۲ Dye-sensitized solar cells (DSSCs)

^۳ Betalain

^۴ Peng

^۵ Huizhi

^۶ Oliveira

^۷ Ethylene glycol

^۸ Ethylene diamine

مقاله پذیرفته شده

سلول‌های خورشیدی مطالعه کردند. در این راستا مشخصات رنگی نانو ذرات کادمیم سولفید تحت روشنایی استاندارد D65 و مشاهده‌کننده استاندارد CIE1964 بدست آمد. نتایج این مطالعه نشان داد که کادمیم سولفید که در اتیلن دی آمین سنتز شده دارای رنگ نارنجی و کادمیم سولفید سنتز شده در اتیلن گلاپکول رنگ زرد را داراست [۱۱]. در پژوهشی دیگر، جعفری و همکارانش ویژگی‌های رنگی سلول‌های خورشیدی بر پایه بلوبری و تمشک را مورد بررسی و آزمایش قرار دادند. نتایج نشان داد که میزان بازده تبدیل انرژی بلوبری از تمشک بیشتر است. هم‌چنین بررسی رفتار انعکاسی دو ماده در محدوده آبی طیف متفاوت بوده و میزان انعکاس بلوبری در طول موج ماکزیم انعکاس تقریبی ۴۷۰ نانومتر بیشتر می‌باشد. بررسی مشخصه‌های رنگی نشان داد که دو نمونه از فام‌های متفاوتی برخوردار هستند و میزان خلوص نمونه بلوبری از نمونه تمشک بسیار بیشتر است [۱۲].

در یک جمع‌بندی مشخص شد که تحقیقاتی در زمینه بررسی گاموت رنگی مواد رنگزای آنتوسیانین مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی انجام نشده است. در این مقاله مشخصات دو بعدی ۹ ماده رنگزای طبیعی در فضای رنگی CIELCH و CIELAB بررسی شد. در نهایت برای بدست آوردن مرز و حجم گاموت رنگی از الگوریتم Convex hull استفاده شد. به همین دلیل در تحقیق حاضر، مشخصات ۹ ماده رنگزای طبیعی از نوع [بتالابین](#) به کار رفته در سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزا مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه حجم گاموت رنگی نمونه‌ها نیز تعیین گردید که پیش‌بینی می‌شود مبنای مطالعات بعدی در مقایسه حجم گاموت‌های رنگی اشغال شده توسط مواد رنگزای طبیعی قرار گیرد.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد

در این پژوهش ۹ ماده رنگزای طبیعی که در طبقه آنتوسیانین‌ها قرار دارند، مورد استفاده قرار گرفته است. در این راستا از مواد رنگزای طبیعی شامل آلبالو، تمشک، بلوبری، انارترش، چغندر قند، کلم قرمز، تربچه، پوست بادمجان و میوه‌آزدها استفاده شد.

۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها

به منظور استخراج مواد رنگزای طبیعی ابتدا منابع گیاهی جمع‌آوری و تمیز شده، سپس در دمای اتاق تاریک خشک گردید. ۲۰ گرم از پودر نمونه گیاهی در ۱۰۰ میلی لیتر حلال خالص خیس‌مانده شده و به مدت ۱۰ ساعت در محیط تاریک و خنک نگهداری گردید. پس از طی زمان مناسب حلال حاوی مواد رنگزای طبیعی از باقیمانده موجود جدا شده و توسط روتاری تحت خلاء تغلیظ شد. در نهایت عصاره‌های تغلیظ شده در محیط تاریک با دمای 4°C برای تهیه فوتوالکتروود نگهداری شد. برای تهیه فوتوالکتروود، خمیر شفاف نانو کریستال TiO_2 (۱۵ نانومتر) به روش دکتر بلید بر روی شیشه FTO اعمال شده و سپس به مدت ۳۰ دقیقه در دمای 450°C خشک گردید. فیلم دی‌اکسید تیتانیوم با محلول آبی TiCl_4 و با غلظت ۱ mM به روش حمام شیمیایی لایه نشانی

مقاله پذیرفته شده

شده و به مدت ۳۰ دقیقه در دمای 450°C خشک گردید. سپس فیلم خشک شده تا دمای 100°C سرد شد. الکتروود آند به مدت ۴ ساعت در عصاره ماده رنگزای طبیعی مورد نظر غوطه‌ور شده و سپس به مدت ۱۵ دقیقه در اتانل قرار داده شد تا ماده رنگزای جذب نشده برطرف گردد [۱۷-۱۳].

۲-۲-۲- اندازه‌گیری طیف انعکاسی و محاسبه ویژگی‌های رنگی

جهت اندازه‌گیری انعکاس طیفی فوتوآندهای ساخته شده بر پایه مواد رنگزای طبیعی از دستگاه اسپکتروفوتومتر ۶۴-SP محصول شرکت X-Rite استفاده شد. اندازه‌گیری‌های در محدوده طیف مرئی از ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر و با گام‌های ۱۰ نانومتری انجام شد. هندسه اندازه‌گیری دستگاه (d/8) بوده و انعکاس آینه‌ای لحاظ شده، شایان ذکر است که تاثیر نور غیرمرئی در اندازه‌گیری نمونه‌ها حذف شد. در گام بعدی با استفاده از طیف انعکاسی اندازه‌گیری شده، مقادیر محرکه‌های سه‌گانه نمونه‌ها تحت استاندارد روشنایی D65 و مشاهده کننده استاندارد CIE1964 محاسبه گردید. به این ترتیب، پارامترهای رنگی نمونه‌ها در فضا رنگ‌های CIELAB و CIELCH محاسبه شد.

۲-۲-۳- تعیین گاموت رنگی

مشخصات رنگی نمونه‌ها اغلب در فضا‌های سه بعدی نظیر CIEXYZ، CIELAB و CIELCH توصیف می‌گردند. در واقع سیستم‌های رنگی سه بعدی ویژگی‌های رنگی را در سه محور شرح می‌دهند. فضا رنگ CIELAB بیانگر مشخصات رنگی نمونه‌ها در سه بعد a^* ، b^* ، L^* است که پارامتر L^* نشان‌دهنده روشنایی و پارامتر a^* نشان‌دهنده ویژگی قرمز-سبزی و پارامتر b^* نشان‌دهنده میزان زرد-آبی بودن نمونه‌ها است [۲۰-۱۸]. از طرف دیگر فضا رنگ CIELCH به عنوان یک فضای قطبی در سیستم رنگی دکارتی CIELAB توصیف می‌شود که مشخصات نمونه‌ها را با پارامترهای L^* ، C^* و h° بیان می‌کند. در حالی که پارامتر C^* نشان‌دهنده خلوص و پارامتر h° نشان‌دهنده زاویه فام است [۲۱-۱۹]. یکی از مهمترین ویژگی‌های هر دستگاه توصیف کننده رنگ (چاپگر، نمایشگر و...) گاموت رنگی آن است. گاموت رنگی هر دستگاه به عنوان زیرمجموعه‌ای از رنگ‌های مشخص است که توسط آن دستگاه قابل حصول می‌باشد. عموماً دستگاه‌های مختلف گاموت رنگی متفاوتی دارند. برای یک تصویر گاموت رنگی به صورت مجموعه‌ای از رنگ‌های قابل تولید تعریف می‌شود. برای دستگاه‌های مختلف مانند نمایشگرها و چاپگرها نیز گاموت رنگی مجموعه‌ای از رنگ‌های است که دستگاه می‌تواند ارائه دهد. به طور کلی گاموت رنگی هر دستگاه به عنوان یک مشخصه مهم در خروجی آن دستگاه در نظر گرفته می‌شود که وابسته به عوامل متعددی است [۲۲]. به عنوان مثال در چاپگرها زمانی که دستگاه، کاغذ، شرایط چاپ و شرایط مشاهده کننده تغییر می‌کند، گاموت رنگی نیز تغییر می‌کند [۲۲، ۲۳].

برای تشریح مرزهای گاموت الگوریتم‌های مختلفی وجود دارد که از مشهورترین آن‌ها می‌توان به الگوریتم‌های Convex hull،

مقاله پذیرفته شده

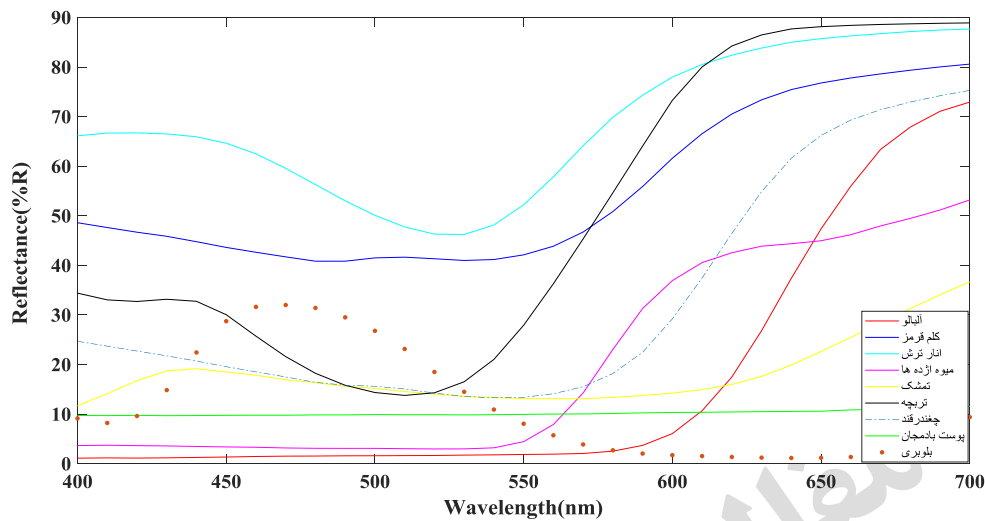
Alpha shape و Segment maxima اشاره کرد. این الگوریتم‌ها را می‌توان برای تعیین مرز گاموت در تصاویر یا دستگانه یا هر دو آن‌ها استفاده کرد. عموماً گاموت‌رنگی نمونه‌ها در فضاهای دو بعدی یا سه بعدی از فضا رنگ‌های متداول تعریف می‌شوند. همچنین به کمک الگوریتم‌های معرفی شده امکان محاسبه حجم گاموت رنگی اشغال شده توسط نمونه‌ها وجود دارد [۲۴]. در پژوهش حاضر از الگوریتم Convex hull به منظور تعیین محدوده رنگی اشغال شده توسط فوتوآندهای مبتنی بر مواد رنگزای آنتوسیانین استفاده شد. در روش Convex hull بعد از تعریف مختصات نقاط در فضای رنگی (مثلاً فضای رنگی CIELAB) نقطه‌ای که کوچکترین x را دارد انتخاب می‌شود، سپس نقطه‌ای که نسبت به آن کمترین زاویه را دارد مکان‌یابی شده و این کار به تداوم ادامه می‌یابد [۲۴، ۲۵]. یکی از مهم‌ترین مزیت‌های الگوریتم Convex hull این است که این روش شامل مجموعه از داده‌های ورودی است؛ بنابراین می‌توان برای تخمین حجم گاموت رنگی نیز از آن استفاده کرد. در این راستا و به منظور تعیین حجم گاموت رنگی اشغال شده توسط فوتوآندهای حساس شده به مواد رنگزای آنتوسیانین از روش مثلث‌بندی^{۱۰} استفاده شد. مثلث‌بندی در حقیقت روشی برای تقسیم‌بندی فضا از یک مجموعه نقاط نمونه است. مثلث‌بندی دلونی^{۱۱} در سال ۱۹۳۴ توسط بی. دلونی پیشنهاد شد به این ترتیب که با ماکزیمم کردن زاویه‌ها از تولید مثلث‌های باریک جلوگیری می‌شود. قانون اصلی برای ایجاد مثلث‌بندی دلونی قانون دایره است. مثلث‌بندی دلونی، نوعی مثلث‌بندی است که در آن دایره محیطی هر مثلث شامل هیچ راسی از رئوس مثلث‌های دیگر نباشد [۱۲]. برای تعیین و محاسبه گاموت رنگی مواد رنگزای آنتوسیانین مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی، الگوریتم Convex hull با استفاده از روش مثلث‌بندی دلونی استفاده شد. در به کارگیری توابع مورد استفاده نیز از نرم افزار MATLAB R2018b استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

یکی از مواردی که در سلول‌های خورشیدی نسل سوم دارای اهمیت زیادی می‌باشد، گستره جذب نور خورشید توسط عامل حساس کننده می‌باشد. اهمیت این موضوع از آنجا است که هرچه ماده رنگزا دارای طیف جذبی بزرگتری باشد، امکان تهییج و تولید الکترون تهییج یافته تسهیل می‌شود. اندازه‌گیری رنگ و مشخص کردن حوزه جذبی مواد رنگزا می‌تواند در پیش‌بینی عملکرد ماده رنگزا در افزاره اپتوالکترونیک کمک کننده باشد [۲۶]. البته زمان بهینه برای لایه‌نشانی مواد رنگزا بر روی سطح نیمه هادی به منظور کسب غلظت بهینه دارای اهمیت زیادی است. زیرا بیشترین جذب در کوتاه‌ترین زمان، علاوه بر صرفه‌جویی در زمان و هزینه، سبب ارائه بازده حداکثری در افزاره اپتوالکترونیک می‌گردد. در این پژوهش، زمان ۱۰ ساعت برای کسب بیشینه جذب انتخاب گردید. شکل ۱ انعکاس طیفی ۹ ماده رنگزای طبیعی مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی را در محدوده طول موج‌های مرئی از

¹⁰ Triangulation

¹¹ Delaunay triangulation



شکل ۱- منحنی انعکاسی ۹ فوتوآند حساس شده با مواد رنگزای طبیعی در محدوده طول موج مرئی.

شکل ۱ بیانگر آن است که بیشترین میزان انعکاس این دسته از مواد رنگزای طبیعی در محدوده طول موج ۶۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر و در محدوده رنگ‌های قرمز مایل به زرد تا آبی است. به‌منظور شناخت بهتر رفتار رنگی، توزیع نمونه‌ها در دیاگرام a^*b^* و C^*L^* از فضا رنگ‌های CIELAB و CIELCH به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند. همچنین جدول ۱، بازده تبدیل انرژی مواد رنگزای طبیعی آنتوسیانین و مشخصه‌های رنگی نمونه‌ها را در فضا رنگ‌های CIELAB، CIELCH نشان می‌دهد. مطابق جدول ۱، عمده مواد رنگزای طبیعی به‌کاررفته در سلول‌های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزای طبیعی در طبقه آنتوسیانین‌ها قرار دارند. همان‌طور که قبلاً گفته شد، مواد رنگزای آنتوسیانین فام قرمز کم رنگ تا آبی را شامل می‌شوند و به دلیل داشتن گروه کربونیل و هیدروکسی موجود در ساختارشان به‌راحتی با سطح دی‌اکسید تیتانیوم پیوند داده و جذب می‌شوند. با توجه به جدول ۱ و نتایج به‌دست‌آمده از بازده تبدیل انرژی در مقالات مرتبط، بررسی‌ها نشان داد که مواد رنگزای آنتوسیانین بازده تبدیل انرژی بالاتری را دارند. بنابراین مقایسه نتایج بازده تبدیل انرژی و گروه شیمیایی ماده رنگزا نشان داد که مواد رنگزای آنتوسیانین به جز کلم قرمز بازده تبدیل انرژی بالاتری در مقایسه با سایر مواد رنگزای طبیعی دارند. با توجه به اینکه بازدهی حساس‌کننده براساس مواد رنگزای طبیعی مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی کم است اما در عوض استفاده از مواد رنگزای طبیعی به‌جای مواد رنگزای مصنوعی از مزایای در دسترس بودن، زیست‌سازگاری و همچنین روش تهیه آسان برخوردار است.

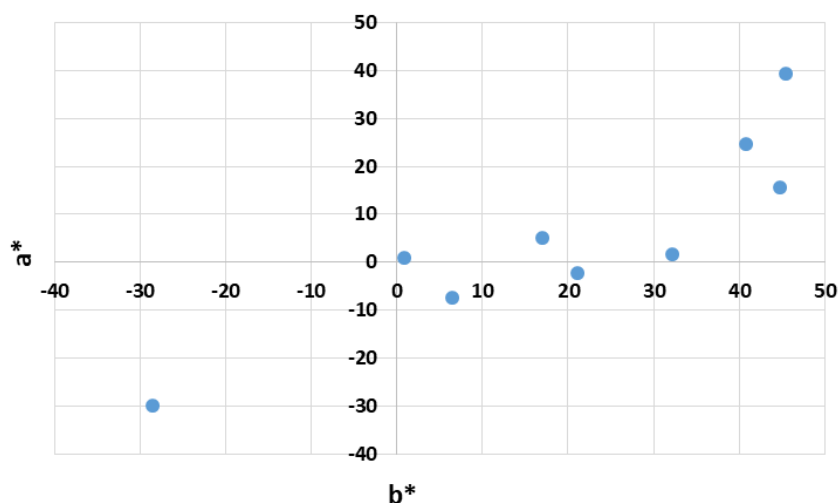
شکل ۲، رفتار رنگی نمونه‌ها را در دیاگرام a^*b^* از فضا رنگ CIELAB نشان می‌دهد. محور a^* از مقادیر مثبت تا منفی به ترتیب بیانگر میزان قرمز بودن تا سبز بودن نمونه‌هاست و محور b^* نیز از مقادیر مثبت و منفی بیانگر زرد تا آبی بودن نمونه‌هاست. مطابق

مقاله پذیرفته شده

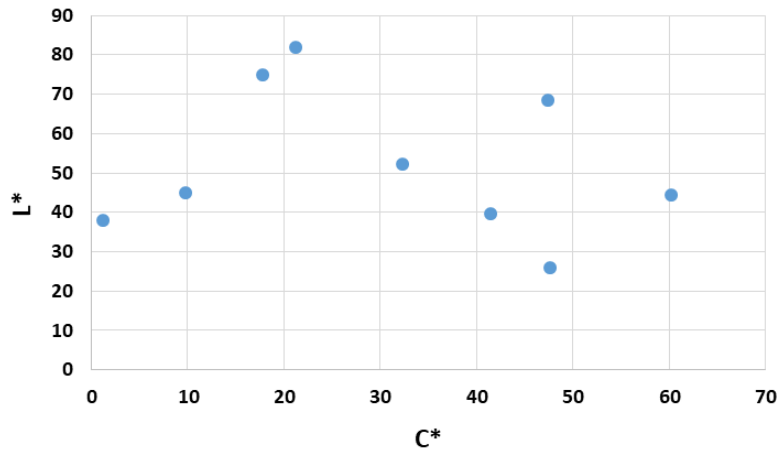
شکل ۲ و با بررسی توزیع نمونه‌ها که در ناحیه اول، سوم و چهارم فام واقع شده اند مشخص می‌شود که نمونه‌ها از فام‌های قرمز مایل به زرد تا آبی برخوردارند. شکل ۳، توزیع نمونه‌ها را در دیگرام $L^* a^* b^*$ از فضا رنگ CIELCH نشان می‌دهد. به نحویکه مقدار C^* بیانگر میزان خلوص نمونه‌ها بوده و پارامتر L^* نیز میزان روشنایی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۳ و جدول ۱، بیشترین مقدار روشنایی مربوط به نمونه انار ترش ($L^* = ۸۱/۹۸$) و کمترین مقدار روشنایی مربوط به نمونه آلبالو ($L^* = ۲۶/۰۱$) می‌باشد. از طرفی مقایسه خلوص نمونه‌ها بیانگر آن است که مقادیر خلوص در محدوده $(۱/۲ - ۶۰/۱۶) C^*$ است که به ترتیب مربوط به نمونه‌های پوست بادمجان و میوه اژدها است.

جدول ۱- مشخصات رنگی ۹ ماده رنگزای طبیعی مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی بر پایه آنتوسیانین.

نمونه‌ها	x	y	z	L^*	a^*	b^*	C^*	h°	بازده تبدیل انرژی
پوست بادمجان	۰/۳۲	۰/۳۳	۰/۳۵	۳۷/۹	۰/۸۴	۰/۸۶	۱/۲	۴۵/۷۸	۰/۶۴
آلبالو	۰/۵۷	۰/۳۳	۰/۱۰	۲۶/۰۱	۴۰/۷۴	۲۴/۶۶	۴۷/۶۲	۳۱/۱۹	۰/۱۸
کلم قرمز	۰/۳۵	۰/۳۳	۰/۳۲	۷۴/۹۸	۱۶/۹۸	۵/۱۵	۱۷/۷۴	۱۶/۸۶	۰/۶۴
تربچه	۰/۴۳	۰/۳۲	۰/۲۵	۶۸/۴۴	۴۴/۷۶	۱۵/۶۱	۴۷/۴۱	۱۹/۲۳	۱/۴۷
چغندر قند	۰/۳۹	۰/۳۰	۰/۳۱	۵۲/۱۹	۳۲/۲۳	۱/۷۷	۳۲/۲۸	۳/۱۵	۰/۹۸
بلوبری	۰/۱۶	۰/۲۵	۰/۵۹	۳۹/۷۷	-۲۸/۶۲	-۲۹/۹	۴۱/۳۹	۲۲۶/۲۵	۰/۸۷
تمشک	۰/۳۱	۰/۳	۰/۳۹	۴۴/۸۵	۶/۴۸	-۷/۳	۹/۷۶	۳۱۱/۶۱	۰/۶۹
انار ترش	۰/۳۴	۰/۳۱	۰/۳۵	۸۱/۹۸	۲۱/۰۷	-۲/۲۲	۲۱/۱۹	۳۵۳/۹۸	۰/۷۵
میوه اژدها	۰/۵۵	۰/۳۶	۰/۰۹	۴۴/۳۲	۴۵/۴۴	۳۹/۴۲	۶۰/۱۶	۴۰/۹۴	۰/۲۲



شکل ۲ - توزیع نمونه‌ها در دیگرام $a^* b^*$ از فضا رنگ CIELAB.

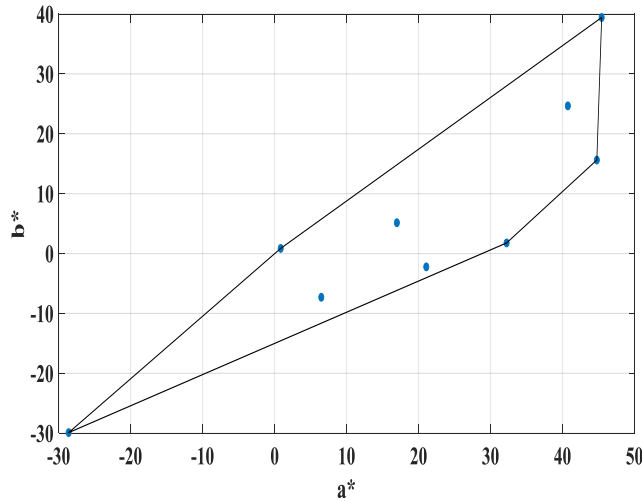


شکل ۳- توزیع نمونه‌ها در دیاگرام C^*L^* از فضا رنگ CIELCH.

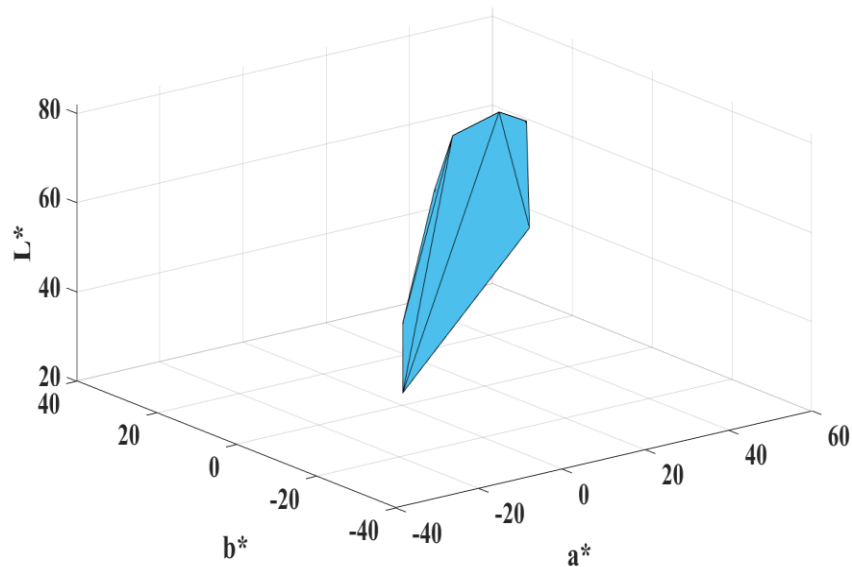
بطوریکه که اشاره شد از الگوریتم Convex hull برای تعیین مرز گاموت رنگی اشغال شده توسط نمونه‌ها در فضا رنگ CIELAB استفاده شد. شکل ۴، مرز گاموت ۹ ماده رنگزای طبیعی مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی را در فضای دو بعدی a^*b^* نشان می‌دهد. به منظور ترسیم شکل ۴، مثلث دلونی برای داده‌های رنگی دو بعدی (a^*, b^*) به دست آمد. در گام نخست الگوریتم Convex hull برای مجموعه نقاط دو بعدی توسط مثلث دلونی به کار برده شد. برای اینکه بتوان Convex hull سه بعدی از مجموعه داده‌های رنگی در فضا رنگ CIELAB به دست آورد، در ابتدا باید مثلث دلونی این مجموعه نقاط (L^*, a^*, b^*) ساخته شود. در گام بعدی حجم گاموت رنگی به کمک الگوریتم Convex hull تعیین و محاسبه شد. شکل ۵ گاموت رنگی ۹ ماده رنگزای طبیعی مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی را در فضا رنگ CIELAB نشان می‌دهد. سطح^{۱۲} حجم گاموت به دست آمده در شکل ۵ به صورت کلی و شماتیک نشان داده شده است.

^{۱۲} Surface

مقاله پذیرفته شده



شکل ۴- مرز گاموت رنگی ۹ ماده رنگزای طبیعی در دیاگرام دوبعدی a^*b^*



شکل ۵- حجم گاموت رنگی ۹ ماده رنگزای طبیعی در فضا رنگ CIELAB

نتایج نشان داد که حجم گاموتی که توسط الگوریتم Convex hull در مختصات رنگی سه بعدی در فضا رنگ CIELAB به دست آمد برابر $10^4 \times 2/67$ است. بطوریکه قبلا اشاره شد تحقیقات اندکی در خصوص رفتار رنگی مواد رنگزای طبیعی مورد استفاده در حساس کننده های سلول های خورشیدی انجام شده است. عمده تحقیقات در این خصوص مربوط به بررسی میزان بازدهی سلول های خورشیدی حساس شده به مواد رنگزای طبیعی بوده است. در این پژوهش گاموت رنگی مواد رنگزای آنتوسیانین مستخرج از منابع طبیعی گیاهی مورد بررسی قرار گرفته و تلاش برای بررسی مرز گاموت رنگی و حجم گاموت انجام گرفت که به عنوان مرجعی جهت ادامه تحقیقات و بررسی و مقایسه گاموت رنگی سایر مواد رنگزای طبیعی به کاررفته در سلول های خورشیدی می تواند مورد استفاده

قرار گیرد.

۴- نتیجه‌گیری

تحقیقات زیادی در خصوص میزان بازده تبدیل انرژی مواد رنگزای طبیعی مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی صورت گرفته است اما پژوهشی در خصوص محدوده رنگی قابل تولید توسط آن‌ها انجام نشده است. در تحقیق حاضر، ۹ عصاره ماده رنگزای طبیعی آلبالو، تمشک، بلوبری، انار ترش، چغندرقد، کلم قرمز، تربچه، پوست بادمجان و میوه اژدها مبتنی بر آنتوسیانین استخراج و به‌عنوان حساس‌کننده در سلول‌های خورشیدی به کار برده شد. سپس مشخصات رنگی آن‌ها در فضا رنگ‌های CIELCH و CIELAB به دست آمد. در مرحله بعد، الگوریتم Convex hull با استفاده از مثلث دلونی برای به دست آوردن مرزها و حجم گاموت رنگی اشغال شده توسط نمونه‌ها در فضا رنگ CIELAB به دست آمد. نتایج نشان داد که نمونه‌ها در ناحیه اول و چهارم فام واقع شده و از ته رنگ‌های قرمز مایل به زرد تا آبی برخوردار هستند. از طرف دیگر با استفاده از الگوریتم Convex hull حجم گاموت رنگی به دست آمده نیز محاسبه شد که برابر با $10^4 \times 2/67$ است. نتایج تحقیق حاضر می‌تواند به‌عنوان تحقیقات مقدماتی در مورد محاسبه گاموت رنگی مواد رنگزای طبیعی که به‌عنوان حساس‌کننده در سلول‌های خورشیدی سبز به کار برده می‌شوند در نظر گرفته شود.

۵- مراجع

- 1- P. Gevorkian, "Sustainable energy system engineering: The complete green building design resource", McGraw Hill Professional, 2007.
- 2- M. Hosseinnzhad, K. Gharanjig, S. Moradian, "Effect of antiaggregation agent on photovoltaic performance of indoline sensitized solar cells", Adv. Mater. Technol. 30, 189-192, 2015.
- 3- J. Halme, "Dye-sensitized nanostructures and organic photovoltaic cells: technical review and preliminary tests", New York, Dyers Company Publication Trust, 2002.
- 4- L. Tain, T. Oreilly, D. Zerulla, J. Sheridan, "Characterizing dye- sensitized solar cells", Optik, 122, 1225-1230, 2011.
- 5- X. F. Wang, "Dye-sensitized solar cells using a chlorophyll a derivative as the sensitizer and carotenoids having different conjugation lengths as redox spacers", Chem. Phys. Lett, 408, 409-414, 2005.
۶. م. حسین‌نژاد، ک. قرنچیک، "مروری بر مواد رنگزای طبیعی مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی نانو ساختار"، ۴، ۸۸-۸۱، ۱۳۹۳.
7. M. R. Narayan, "Review: Dye sensitized solar cells based on natural photosensitizers", Renew. Sustain. Energy Rev, 16, 208-215, 2012.
- 8- N. T. R. N. Kumara, "Layered co-sensitization for enhancement of conversion efficiency of natural dye sensitized solar cells", J. Alloys Compd. 581, 186-191, 2013.
- 9- G. Peng, Y. Dingyu, Z. Xinghua, S. Hui, L. Jitao, "Fabrication and characterization of dye-sensitized solar cells based on nature plants", Chem. Phys. Lett, 693, 16-22, 2018.
- 10- Z. Huizhi, W. Liqiong, G. Yurong, M. Tingli, "Dye-sensitized solar cells using 20 natural dyes as sensitizers", J. Photochem. Photobiol. A, 219, 188-194, 2011.
- 11- J.F. A. Oliveira, T.M. Milão, V. D. Araújo, M. L. Moreirac, C. E. Longo, M. I. B. Bernardi, "Influence of different solvents on the structural, optical and morphological properties of CdS nanoparticles", J. Alloys Compd, 509, 6880-6883, 2011.
- ۱۲- س. شیراحمدحقیقی، ر. جعفری، م. حسین‌نژاد، "بررسی ویژگی‌های رنگی سلول‌ها خورشیدی بر پایه بلوبری و تمشک"، همایش ملی مواد رنگزا، محیط‌زیست و توسعه پایدار، ۱۳۹۷.
- 13- M. Hosseinnzhad, S. Rouhani, K. Gharanjig, "Extraction and application of natural pigments for fabrication of green dye-sensitized solar cells", Opto-Electron. Rev, 26, 165-171, 2018.
- 14- M. Hosseinnzhad, S. Moradian, K. Gharanjig, "Natural Dyes Extracted from Black Carrot and Bramble for Dye-Sensitized Solar Cells: individual", Prog. Color. Coat, 8, 153-158, 2015.
- 15- M. Hosseinnzhad, K. Gharanjig, S. Moradian, M.R. Saeb, "In quest of power conversion efficiency in nature-

- inspired dye-sensitized solar cells: individual, co-sensitized or tandem configuration”, *Energy (Oxf.)*, 134, 864–870, 2017.
- 16- M. Hosseinnezhad, S. Moradian, K. Gharanjig, "Fruit extract dyes as photosensitizers in solar cells", *Curr. Sci*, 109, 953-956, 2015.
- 17- M. Hosseinnezhad, K. Gharanjig, "Natural dyes as photosensitizers for nanostructure dye-sensitized solar cells", *IJAST*, 2, 32-35, 2015.
- 18- R. McDonald. "Color Physics for Industry". Society of Dyers and Colorists, 111-138, 1997.
- ۱۹- ر. جعفری، ک. قرنجیک: "مطالعه مشخص‌های رنگی الیاف طبیعی رنگ‌رزی شده با مواد رنگ‌زای طبیعی"، نشریه علمی ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، ۱، ۶۳-۷۴، ۱۳۹۷.
- 20- M. Hosseinnezhad, R. Jafari, K. Gharanjig, "Characterization of a green and environmentally friendly sensitizer for a low cost dye-sensitized solar cell", *OPTO-ELECTRON REV*, 25, 98-93, 2017.
- 21- b. S. Roy, Bern's. "PRINCIPLES OF COLOR TECHNOLOGY", Mansell Color Science Laboratory, Rochester Institute of Technology, 84-87, 1954.
- 22- M. Ataefard, "Investigating the effect of paper properties on color reproduction of digital printing", Department of Printing Science and Technology, Institute for Color Science and Technology, *Prog. Org. Coat*, 77, 1376–1381, 2014.
- 23- S. Chen, "Effect of paper properties on xerographic print quality (Master of Science Thesis), Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry University of Toronto, 2009.
- 24- A. M. Bakke, F. Ivar, J. Y. Hardenberg. "Evaluation of Algorithms for the Determination of Color Gamut Boundaries", *JIST*, 54, 050502–050502, 2010.
- 25- J. Morvic, "Color gamut mapping", Hewlett- Packard Company, Barcelona, Spain, chapter, 8, 143-155, 2008.
- 26- M. Hosseinnezhad, K. GHaranjig, M. Khodadadi Yazdi, P. Zarrintaj, S. Moradian, M.R. Saeb, F.J. Stadler, "Dye-sensitized solar cells based on natural photosensitizers: A green view from Iran", *J. Alloy Cmpod.*, 828, 154329, 2020.