



بررسی رابطه مولفه‌های تصویر حرارتی و مشخصه‌های ماژول فتوولتائیک

محمد قوشچیان^۱، علی حاجی احمد^{۲*}، شاهین رفیعی^۳، علیرضا کیهانی^۴، محمد رسول شعبانی شادانی^۵
^۱دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تهران، mghoushchian@ut.ac.ir
^{۲*}استادیار گروه مهندسی ماشینهای کشاورزی، دانشگاه تهران، hajiahmad@ut.ac.ir
^۳استاد گروه مهندسی ماشینهای کشاورزی، دانشگاه تهران، shahinrafiee@ut.ac.ir
^۴استاد گروه مهندسی ماشینهای کشاورزی، دانشگاه تهران، akeyhani@ut.ac.ir
^۵دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تهران، mr.shabani.4@gmail.com

چکیده

آزمون کیفیت نیروگاه‌های فتوولتائیک تحت شرایط عملیاتی با استفاده از تصویربرداری فروسرخ طی سال‌های اخیر اهمیت فراوانی یافته است. اجسام از خود امواج الکترومغناطیسی ساطع می‌کنند که طیف پیوسته‌ای را می‌پوشاند و طبق قانون پلانک هر جسمی که دمایش بالاتر از صفر مطلق باشد (۲۷۳- درجه سانتیگراد)، انرژی از خود ساطع می‌کند که مقدار آن به دمای جسم بستگی دارد. دوربین‌های حرارتی دما را ثبت کرده و به هر پیکسل یک رنگ مناسب اختصاص می‌دهند. یک مدل رنگ، مدلی ریاضی است که هر رنگ را براساس مختصاتش در سه بعد یا سه محور در این فضا تعریف می‌کند. این تحقیق بر روی یک ماژول فتوولتائیک پلی کریستال صورت گرفت و اطلاعات جریان، ولتاژ و تصویر حرارتی ماژول در طول روز جمع‌آوری شد و فضاهای رنگی مختلف از تصاویر حرارتی گرفته شده استخراج شدند؛ پس از انجام تحلیل‌های آماری، مشاهده شد، به ترتیب پارامترهای a^* ، G ، L^* و R بیشترین میزان همبستگی را با توان خروجی ماژول فتوولتائیک داشتند و پس از بررسی معادلات مختلف برای تعیین توان خروجی ماژول با توجه به پارامترهای تصویر حرارتی، مشاهده شد؛ a^* با معادله درجه ۳ ارائه شده با ضریب همبستگی ۰/۹۲۸ با توان خروجی ماژول فتوولتائیک ارتباط دارد. کلمات کلیدی: ماژول فتوولتائیک، تصویر حرارتی، آزمون کیفیت

Investigation of the Relationship between Thermal Picture Components and Photovoltaic Module Characteristics

Mohammad Ghoushchian¹, Ali Hajiahmad^{2*}, Shahin Rafiee³, Alireza keyhani⁴, MohammadRasoul shabani shadiani⁵

¹Msc. Student of University of Tehran, mghoushchian@ut.ac.ir

^{2*}Faculty member of University of Tehran, hajiahmad@ut.ac.ir

³Faculty member of University of Tehran, shahinrafiee@ut.ac.ir

⁴Faculty member of University of Tehran, akeyhani@ut.ac.ir

⁵Msc. Student of University of Tehran, mr.shabani.4@gmail.com

ABSTRACT

The quality test of photovoltaic power plants by infrared imaging under operational conditions has been great importance in recent years. The objects emit electromagnetic waves that cover the continuous spectrum, and according to Planck's law, any object with absolute temperatures above zero (-273°C), emits energy which depends on the temperature of the object. Thermal cameras record the temperature and assign a suitable color to each pixel. A color model is a mathematical model which defines any color in terms of its coordinates in three dimensions or three axes in this space. In this research, a photovoltaic polycrystalline module was introduced and the current, voltage, and thermal image of the module were collected throughout the day and different color spaces were extracted from the thermal images. After statistical analysis, a^* , G , L^* and R parameters were found to have the highest correlation with the output power of the photovoltaic module. After examining different equations for determining the output power of the module with respect to the thermal image parameters, found that a^* was correlated with the output power of the photovoltaic module by presented 3rd order equation and correlation coefficient of 0.928.

Keywords: Photovoltaic module, thermal image, quality test



با توجه به تقاضای رو به رشد مصرف کنندگان در سطح جهانی، نیاز به تولید برق افزایش یافته است. در عین حال، افزایش بهای گاز طبیعی و تأکید مقررات بر محدود کردن انتشار گازهای گلخانه‌ای، هزینه تولید برق با استفاده از سوخت‌های فسیلی را افزایش داده است. به همین دلیل، استفاده از سایر منابع انرژی برای تولید برق، از جمله تولید برق خورشیدی با استفاده از سامانه‌های فتوولتائیک، افزایش یافته است. سامانه‌های فتوولتائیک به علت مزایای زیاد، کاربرد فراوان دارند. اولین نوع آن‌ها در ماهواره‌ها، آزمایش و کارایی خود را به خوبی انجام داده‌است. عمر طولانی (حدود ۲۰ سال)، قابلیت نصب و راه‌اندازی در شرایط جغرافیایی ویژه مانند مناطق صعب‌العبور و کوهستانی، قابلیت استفاده در سامانه‌های متحرک، نگهداری آسان، عدم وابستگی به شبکه در نقاط دور دست و قابلیت استفاده به صورت متصل به شبکه، مزایایی هستند که آینده درخشانی را برای استفاده از سامانه‌های فتوولتائیک ترسیم می‌کنند. میزان تولید برق از طریق سامانه‌های فتوولتائیک در جهان در هر پنج سال دو برابر می‌شود. پیشرفت‌های صنعتی و تکامل فناوری‌های مورد استفاده در تولید سلول‌های فتوولتائیک، بهره‌وری بالاتر و استفاده وسیع‌تر از این سامانه‌ها را در پی دارد. به طوری که در طول دو دهه گذشته، هزینه ساخت و نصب یک سامانه فتوولتائیک بسیار کاهش یافته و توان تولیدی هر واحد نصب شده، چند برابر شده است (بی‌نام، ۱۳۹۶).

در سراسر جهان تعداد بسیار زیادی از تأسیسات فتوولتائیک نصب شده است و تقاضا برای روش‌های ارزیابی کیفیت ماژول‌های فتوولتائیک نصب شده در حال افزایش است. تکنیک‌های تصویربرداری، مانند تصویربرداری فرو سرخ، بسیار محبوب هستند. مزایای بسیاری برای ارائه تصاویر دو بعدی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به این موارد اشاره کرد: اندازه‌گیری در شرایط عملیاتی (بدون وقفه در کار نیروگاه)، سریع و بدون تماس بودن و همچنین غیر مخرب بودن این روش.

دوربین حرارتی یا ترموویژن ابزاری است جهت شناسایی عیوب در نگهداری و تعمیرات مبتنی برپایش وضعیت، در واقع هر عیبی که خود را با اختلاف دما آشکار کند بوسیله دوربین‌های حرارتی قابل شناسایی می‌باشد. نحوه کار دوربین‌های حرارتی به این صورت است که این سیستم‌ها از تابشی که از خود اجسام ساطع می‌گردد برای تصویر برداری استفاده می‌کنند. همانطور که می‌دانیم اجسام از خود امواج الکترومغناطیسی ساطع می‌کنند که طیف پیوسته‌ای را می‌پوشاند و طول موج پیک و میزان توان گسیلندگی آن به دمای جسم بستگی دارد و طبق قانون پلانک هر جسمی که دمایش بالاتر از صفر مطلق باشد (۲۷۳- درجه سانتیگراد)، انرژی از خود ساطع می‌کند.

همه اشیاء به نوعی از خود اشعه‌های مادون قرمز منتشر می‌کنند و این یکی از راه‌های انتقال حرارت است. مثلاً یک ذغال بر افروخته در حال انتشار هزاران اشعه مادون قرمز است و به این صورت حرارت آن به دست ما منتقل می‌شود. به علاوه، فقط نزدیک نیمی از انرژی خورشید به صورت نور‌های مرئی به ما می‌رسد و مابقی ترکیبی از انوار مادون قرمز و فرابنفش است.

هر چه یک شیء داغ‌تر باشد، اشعه‌های مادون قرمز ساطع شده از آن نیز بیشتر است. دوربین‌های حرارتی می‌توانند این تابش‌ها را مشاهده کنند و آن‌ها را به تصویری تبدیل کنند که برای چشمان ما نیز قابل دیدن باشد؛ درست مثل دوربین‌های دید در شب که نور‌های مادون قرمز نامرئی را دریافت کرده و آن‌ها را به تصاویر قابل مشاهده مبدل می‌کنند.

دوربین‌های حرارتی تعدادی دستگاه اندازه‌گیری کوچک به نام میکروبولومتر وجود دارد. (به ازای هر پیکسل یک عدد). میکروبولومترها از داخل دوربین‌ها ثابت کرده و به هر پیکسل یک رنگ مناسب اختصاص می‌دهند، به همین خاطر است که اکثر دوربین‌های حرارتی نسبت به تلویزیون‌ها و صفحه نمایش‌های مدرن دارای رزولوشن بسیار اندکی هستند. در حقیقت، بهترین رزولوشن دوربین‌های حرارتی فعلی چیزی در حدود ۴۸۰×۶۴۰ است (click.ir)

در سال‌های اخیر، به دلیل محدودیت و گرانی سوخت‌های فسیلی و نیز مسائل زیست‌محیطی، استفاده از انرژی‌های نو، رشد بسیاری داشته است. انرژی خورشید به صورت مستقیم و غیرمستقیم، در دسترس‌ترین منبع انرژی تجدیدپذیر است و تابش خورشید بزرگترین منبع تجدیدپذیر انرژی روی کره زمین است که اگر فقط یک درصد از صحرای جهان با نیروگاه‌های خورشیدی به کار گرفته شوند، همین مقدار برای تولید برق سالانه جهان کافی خواهد بود.

کشور ایران در منطقه‌ای با میزان بالایی از جذب انرژی خورشیدی قرار گرفته است؛ اگر میانگین انرژی تابشی خورشید در روز بالاتر از ۳/۵ کیلووات ساعت در مترمربع (۳۵۰۰ وات/ساعت) باشد، استفاده از مدل‌های انرژی خورشیدی نظیر کلکتورهای خورشیدی یا سامانه‌های فتوولتائیک، اقتصادی و مقرون به صرفه است. در بسیاری از قسمت‌های ایران، انرژی تابشی خورشید بسیار بالاتر از این میانگین بین‌المللی است و در برخی از نقاط حتی بالاتر از ۷ تا ۸ کیلو وات ساعت بر مترمربع اندازه‌گیری شده است اما به طور متوسط، انرژی تابشی خورشید بر سطح سرزمین ایران حدود ۴/۵ کیلووات ساعت بر مترمربع است (بی‌نام، ۱۳۹۳).

پایش وضعیت قاعده‌مند و عیب‌یابی ماژول‌های فتوولتائیک به منظور اندازه‌گیری بازدهی الکتریکی آن‌ها، یک روش معتبر است که می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در مورد اثر الکتریکی و یا کاهش عملکرد احتمالی ماژول‌های معیوب ارائه دهد. در حقیقت تأثیر عیوب منحصر به فرد بر عملکرد الکتریکی ماژول‌های معیوب، مبهم و نامشخص است و در نتیجه در مقیاس یک رشته ماژول یا یک نیروگاه فتوولتائیک، به سختی قابل تشخیص است.



علاوه بر این و مهم‌تر از همه اینکه هیچ اطلاعاتی از محل فیزیکی دقیق هر کدام از عیوب در دسترس نیست؛ مگر آنکه هر یک از ماژول‌ها به صورت جداگانه بررسی شود که در وسعت زیاد، این کار از لحاظ فنی و اقتصادی امکان پذیر نیست (Tsanakas et al., 2015).

تشخیص مبتنی بر تصویربرداری گرمایی فرو سرخ برای ارائه‌ی این اطلاعات کمی از دست رفته و همچنین رفع محدودیت‌های ذکر شده، مناسب‌تر به نظر می‌رسد. سنجش‌های گرمایی فرو سرخ میدانی از ماژول‌های فتوولتاییک در حال کار انجام می‌شود و در حالت عملیاتی کار ماژول‌ها در نقطه حداکثر توان و در شرایط پایدار روشنایی صورت می‌پذیرد. بدیهی است در این شرایط، گرما و برق از طریق تابش تصادفی تولید می‌شود که در یک ماژول سالم فتوولتاییک، انتظار می‌رود تا توزیع دمای یکنواخت بروی سطح تولید کند. از آنجا که اکثر عیوب، تأثیر قابل توجهی بر وضعیت (رفتار) گرمایی ماژول فتوولتاییک می‌گذارند، این عیوب از روی توزیع غیریکنواخت دما در سطح آن‌ها که در تصویر گرمایی ماژول معیوب مشخص می‌شود؛ تشخیص داده می‌شوند. به عبارت دیگر، تصویربرداری گرمایی فرو سرخ می‌تواند اثر گرمایی و مکان فیزیکی دقیق نقص به‌وجود آمده را نشان دهد (نشان دهنده سلول، گروه سلول‌ها و یا ماژول معیوب (تشخیص کیفی) (Kontges et al., 2014).

آنچه باعث می‌شود تصویربرداری گرمایی فرو سرخ برای تشخیص خطای ماژول‌های فتوولتاییک جذاب‌تر شود، این واقعیت است که تصاویر گرمایی را می‌توان با روش سریع، با حداقل ابزار، بدون استفاده از هیچ حسگری و بدون قطع کردن سامانه فتوولتاییک در حال کار، به‌دست آورد. رشد تأسیسات و نیروگاه‌های فتوولتاییک، در دهه اخیر به نحو غیر قابل انکاری چشم‌گیر بوده و تقریباً نرخ رشد نمایی داشته است. در نتیجه فتوولتاییک به یک کاربرد اصلی انرژی‌های تجدید پذیر تبدیل شده و نقش بسیار رقابتی در بازار جهانی انرژی دارد. علاوه بر این، با توجه به مطالعات بلند مدت انتظار می‌رود با توجه به رویکرد به سمت جایگزین‌هایی که انتشار آلاینده‌های کربن کمتری دارند؛ سرمایه‌گذاری در فتوولتاییک‌ها روند رو به رشد خود را حفظ کند (Gan and Li, 2015).

در اصل، این عیوب که باعث عملکرد غیر طبیعی می‌شوند، معمولاً با کاهش توان الکتریکی خروجی، پروفیل‌های غیر طبیعی دما در سطح ماژول‌ها، تنش‌های گرمایی / مکانیکی بیش از حد و حتی خطر ایمنی برای تأسیسات فتوولتاییک مشخص (توصیف) می‌شوند. با توجه به این مشکلات، امروزه بخشی مهمی از تحقیق و توسعه بر روی استراتژی‌های بهینه‌سازی نگهداری و تشخیص کارآمد عیوب برای نیروگاه‌های عملیاتی فتوولتاییک متمرکز شده است. با توجه به تجربیات به‌دست آمده از کنترل کیفیت، مدلسازی و آزمون وضعیت؛ ماژول‌ها در حال حاضر دارای دوره‌های گارانتی تا ۲۵ یا ۳۰ سال هستند که باعث می‌شود بازده محدود آن‌ها به طور قابل توجهی حیران شود. (Buerhop and Scheuerpflug, 2015).

فضاهای رنگ

فضای رنگ (Color Space)، روشی است که با آن می‌توان رنگ‌ها را مشخص، ایجاد و تجسم کرد.

انسان رنگ‌ها را بر اساس سه متغیر زیر تشخیص می‌دهد:

روشنایی (Brightness)

رنگ مایه (Hue)

اشباع (Saturation)

می‌توان بر همین مبنا، مدلی ریاضی برای رنگ ایجاد کرد. برای چنین مدلی که سه متغیر دارد نیاز به فضایی با سه بعد داریم.

یک مدل رنگ (Color Model)، مدلی ریاضی است که هر رنگ را بر اساس مختصاتش در سه بعد یا سه محور در این فضا تعریف می‌کند.

مدل RGB

در RGB رنگ‌ها با ترکیب کردن نورهای آبی، سبز و قرمز ایجاد می‌شوند. این مدل به شکل مکعبی تجسم می‌گیرد. رأسی که بر نقطه‌ی صفر قرار دارد، مکان رنگ سیاه و رأس مقابل سفید است. سه رأس مکان رنگ‌های قرمز، سبز و آبی و سه رأس باقیمانده، مکان ترکیب‌های دوتایی از این سه رنگ است. هر رنگی در این مکعب، نقطه‌ایست که با مختصاتش نسبت به سه محور تعریف می‌شود. اگر هر محور را از صفر تا ۲۵۵ درجه‌بندی کنیم. سیاه با این مشخصه $R=0, G=0, B=0$: نمایش داده می‌شود.

مدل $L^*a^*b^*$

کاملترین فضای رنگی است که توسط کمیته بین‌المللی نورپردازی تعیین شده و تمام رنگ‌های قابل مشاهده برای چشم انسان را توصیف می‌کند. سه مختصات L^*, a^*, b^* بیانگر مشخصاتی میباشند که ذکر می‌گردد.

L^* : نشان دهنده شدت روشنایی است. $L^* = 0$ به منزله سیاه و $L^* = 100$ نشان دهنده پراکندگی روشنایی یا نور کامل است.

a^* : موقعیت آن بین سبز و قرمز متغیر است، مقادیر منفی a^* نشان دهنده رنگ‌های سبز و مقادیر مثبت آن به منزله رنگ‌های قرمز هستند.

b^* : موقعیت آن بین آبی و زرد متغیر است، مقادیر منفی b^* نشان دهنده رنگ‌های آبی و مقادیر مثبت آن به منزله رنگ‌های زرد هستند.

مدل رنگ Lab مدل جامعی بوده و مد رنگی سی‌ام‌وای کی و مد رنگی آر جی بی زیر مجموعه‌ای از این مدل هستند. بر خلاف مدل‌های رنگی RGB و CMYK، رنگ‌های Lab، تقریباً نزدیک به بینایی انسان طراحی شده است.



یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



انجمن مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون ایران

Buali Sina University

این فضاهای رنگ شبیه ترین فضاها به سیستم بینایی انسان می باشند و در پردازش تصویر نیز کاربردهای بسیاری دارند ، زیرا در این فضاها L از رنگ جدا شده است بنابراین برای پردازشهایی نظیر Histogram Equalization و ... کافی است پردازش روی مولفه L صورت پذیرد . پس از اتمام پردازش ویژگی های رنگی با L ترکیب شوند .

مدل HSV/HSL

در این فضای رنگ، Hue (رنگ مایه) توصیف کننده رنگ خالص است که رنگ را بر اساس درجه در دایره رنگ مشخص می کند. Saturation (اشباع) نشان می دهد یک رنگ خالص تا چه اندازه رقیق یا غلیظ است و Value یا Lightness شدت روشنایی را مشخص می کند این مدل به شکل استوانه ایست که از پایین به بالا، روشنایی را و از داخل به بیرون، شدت رنگ را نشان می دهد، چرخش به دور آن نیز، نمایش رنگ مایه است.

در یک پژوهش که در آن رویکردی برای تشخیص و تجزیه و تحلیل خودکار ماژول های فتوولتاییک در تصاویر فرو سرخ ارائه شده؛ با استفاده از خطوط اتصال سلول های هر ماژول، می توان ناهنجاری های قابل توجه مانند نقاط داغ مناطق گرم را شناسایی کرد. برای شناسایی چنین نقضی ابتدا ماژول را در تصاویر فرو سرخ شناسایی کرده و پس از آزمون های آماری، عیوب ماژول تشخیص داده می شود. ارزیابی کمی از خطوط اتصال سلول ها و تجزیه و تحلیل در تصاویر فرو سرخ ثبت شده، کاربرد این رویکرد را نشان می دهد (Dotenco et al., 2016). پژوهش ها نشان داده است که تجهیزات جدید رباتیک و هواپیما برای پروازهای نزدیک بر فراز ماژول های فتوولتاییک می تواند مشکلات پنهان کیفیت آن ها و قابلیت اطمینان دستگاه را نشان دهند. وظایف جدیدی مانند عکاسی هوایی با وضوح بالا و نقشه های سه بعدی می تواند به عنوان روش های تست برای بهینه سازی عملکرد نصب و راه اندازی سامانه های فتوولتاییک به کار گرفته شود (Tyutyundzhiev et al., 2015).

اکیانی و همکاران (۲۰۱۰)، پردازش و تفسیر تصاویر گرافیکی گرمایی به دست آمده از یک نیروگاه فتوولتاییک متصل به شبکه (۲۰ کیلو وات) را پیشنهاد کردند. در این پژوهش تصریح شده، آنالیز فرو سرخ اجازه می دهد تا ارزیابی قابل اعتمادی از وضعیت و سلامتی نیروگاه و به طور همزمان تشخیص اقدامات مورد نیاز تعمیر و نگهداری صورت گیرد و به طور خاص، شناسایی تفاوت های احتمالی بین رشته ها و مکان یابی سریع نقاط داغ، خرابی ها و یا سایر مشکلات، ارائه شده است. این پژوهش نشان داده است که آنالیز فرو سرخ می تواند برای تحلیل بازده نیروگاه فتوولتاییک مفید باشد. در واقع، بازده به دمای ماژول های فتوولتاییک بستگی دارد و گره های بیش از حد، باعث کاهش انرژی تولید شده می شود. این مقاله برخی از مسائل خاص مربوط به نیروگاه های فتوولتاییک را نشان داده است و این امکان را برای اندازه گیری دما برای نقاط داغ خاص و همچنین مناطق وسیع فراهم کرده است.

در پژوهش دیگری نیز ذکر شده است که مزارع بزرگ فتوولتاییک، اهدافی پیچیده برای نظارت و ارزیابی عملکرد هستند. در این مقاله، تجارب میدانی با استفاده از یک پهپاد گزارش شده است. پهپاد مجهز به دوربین گرمایی و مژگی برای تشخیص نقص هایی که باعث تخریب عملکرد می شوند؛ استفاده می شود. پژوهش های آن ها نشان می دهد که تجهیزات جدید رباتیک و هواپیما برای پروازهای نزدیک به ماژول های فتوولتاییک همراه با دوربین ها می توانند مشکلات پنهان کیفیت مواد به کار رفته و قابلیت اطمینان دستگاه را نشان دهند. همچنین این محققان بیان کرده اند، کارهای جدید مختلفی مانند: عکاسی هوایی با وضوح بالا، فتوگرامتری سه بعدی، میدان سه بعدی و ... می توانند به عنوان روش های تست برای بهینه سازی عملکرد تأسیسات فتوولتاییک استفاده شوند (Tyutyundzhiev et al., 2015).

دونتکو و همکاران در سال ۲۰۱۶، روش پردازش تصویر پیشنهادی برای ارزیابی خودکار تصاویر فرو سرخ از نیروگاه های فتوولتاییک را پایه محکمی برای نظارت بر سامانه های آینده و سامانه های تشخیص زود هنگام معرفی کرده اند. همچنین ذکر شده است که دو مؤلفه برای شناسایی ماژول های فتوولتاییک و طبقه بندی نقص در ماژول ها برای هر نرم افزار تحلیلی در آینده اساسی هستند. روش پردازش تصویر آن ها، یک ماژول فتوولتاییک منحصر به فرد را در یک تصویر فرو سرخ هوایی به طور قابل اعتماد تشخیص می دهد. همچنین ناهنجاری های دمایی عمده که اغلب ناشی از نقص های ماژولی هستند، شناسایی و به درستی به سه گروه اصلی: ماژول های بیش از حد داغ، نقاط داغ و زیر رشته های بیش از حد داغ طبقه بندی می کند. این محققین بیان کرده اند که در ترکیب با داده های بیشتر در مورد ماژول های فتوولتاییک نصب شده و اطلاعات مربوط به طرح فضایی و الکتریکی نیروگاه فتوولتاییک، تشخیص ماژول های فتوولتاییک و همچنین تفسیر نقص های شناسایی می تواند بهینه شود.

همچنین در مقاله دیگری به این موضوع پرداخته شده است و بیان شده، قابلیت اطمینان بازرسی های انجام شده از طریق نقشه های تولید شده و گسل های شناسایی شده در ماژول های خاص، با اندازه گیری های داخلی و خارجی در سطح زمین انجام شده است. تصاویر میکروسکوپی، نشانه های زیادی از سلول های ترک خورده و مسیرهای حلزونی را نشان داده اند. تصاویر فرو سرخ حرارتی بیشتر در فضای باز، حضور پارامترهای گرمایی غیر طبیعی گسل ها را تأیید کرد که قبلاً با خصوصیات جریان-ولتاژ، مرتبط و کمی سازی شده بود و مقدار مربوط به تلفات توان خروجی را نیز تعیین می کند. در نهایت تصویربرداری برق درختی، گسل های مشکوک در دو مورد از ماژول های مورد بررسی و وضعیت خوب ماژول مرجع را تأیید کرده است (Tsanakas et al., 2017).



آزمایش‌ها بر روی یک ماژول فتوولتائیک پلی کریستال انجام گرفت که در شکل (۱) نشان داده شده است و همچنین اطلاعات فنی آن نیز در جدول (۱) ذکر شده است.

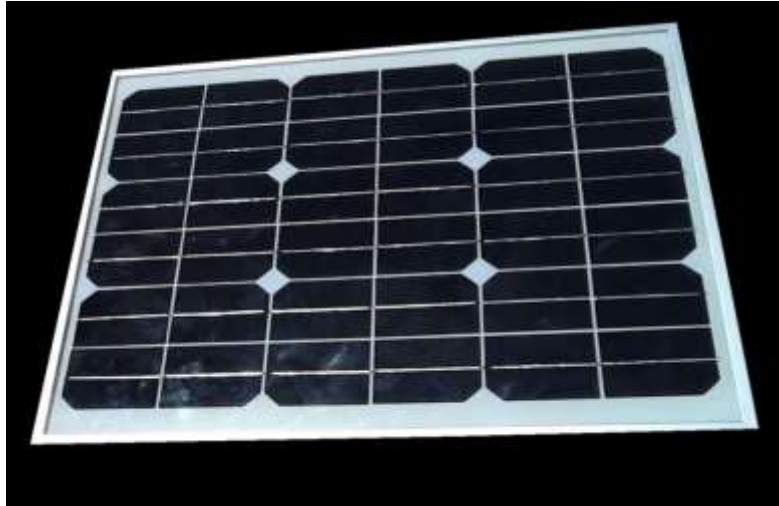


Figure 1. Photovoltaic module

شکل ۱- ماژول فتوولتائیک

جدول ۱- اطلاعات فنی ماژول فتوولتائیک

Table 1. Photovoltaic module Technical Data

Peak power(Pmax)	10(W)
Maximum Power Current(Imp)	0.55(A)
Maximum Power Voltage(Vmp)	18.00(V)
Shot Circuit Current(Isc)	0.61(A)
Open Circuit Voltage(Voc)	21.6(V)

برای تهیه عکس‌های حرارتی از دوربین FLIR one pro استفاده شد که مشخصات فنی آن در جدول (۲) به طور کامل شرح داده شده است.

Table 2. FLIR One Pro Specifications.

Certifications	MFi (iOS version), RoHS, CE/FCC, CEC-BC, EN61233
Operating temperature	0 °C – 35 °C (32 °F to 95 °F) ,
Non-operating temperature	battery charging 0 °C to 30 °C (32 °F to 86 °F)
Size	-20 °C to 60 °C (-4 °F to 140 °F)
Weight	68mm W x34mm H x14mm D (2.7in x 1.3in x .6in)
Mechanical shock	36.5g
Thermal and visual cameras with MSX	Drop from 1.8m (5.9ft)
Thermal sensor	Pixel size 12μM, 8 – 14μM spectral range
Thermal resolution	160x120
Visual resolution	1440x1080
HFOV / VFOV	55 ° ± 1 ° / 43 ° ± 1 °
Frame rate	8.7Hz
Focus	Fixed 15cm – Infinity
Scene dynamic range	-20 °C to 400 °C (-4 °F to 752 °F)
Accuracy	±3 °C (5.4 °F) or ±5%, typical Percent of the difference between ambient and scene temperature. Applicable 60s after start-up when the unit is within 15 °C to 35 °C (59 °F to 95 °F) and the scene is within 5 °C to 120 °C (41 °F to 248 °F)
Thermal sensitivity (MRTD)	150mK
Emissivity settings	Matte: 95%, Semi-Matte: 80%, Semi-Glossy: 60%, Glossy: 30%
Shutter	Reflected background temperature is 22 °C (72 °F) Automatic/Manual

برای کشف رابطه بین مولفه های تصویر و توان خروجی ماژول، اطلاعات جریان، ولتاژ و تصویر حرارتی ماژول در طول روز جمع آوری شد که در مجموع ۸۱۶۳ داده برای هر کدام از پارامترها بدست آمد. سپس از تصاویر حرارتی رنگی بدست آمده پارامترهای مختلف سه فضای رنگی RGB، $L^*a^*b^*$ و HSV پس از جداسازی تصویر ماژول از پس زمینه و پیش پردازش های اولیه توسط کدنویسی های انجام شده در نرم افزار MATLAB R2016a استخراج شدند و با میانگین گیری مولفه های رنگی برای پیکسل های هر تصویر، یک عدد به ازاء هر کدام از مولفه های هر عکس بدست آمد. پس از آن تحلیل های آماری مختلف برای کشف رابطه بین مولفه های تصویر و توان خروجی ماژول انجام شد که در بخش نتایج و بحث تشریح شده است.

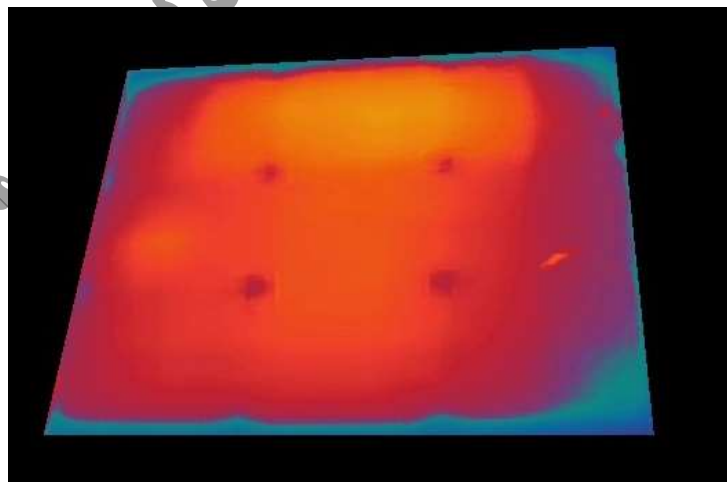


Figure 2. An example of thermal images of photovoltaic module separated from background

شکل ۲- نمونه ای از تصاویر حرارتی پنل فتوولتاییک جدا شده از پس زمینه



پس از تعیین میزان همبستگی پارامترهای رنگ با توان خروجی ماژول که در جدول (۳) نمایش داده شده، مشخص شد که به ترتیب a^* ، G ، L^* و R بیشترین همبستگی را با توان خروجی ماژول فتوولتائیک داشتند.

جدول ۳- میزان همبستگی پارامترهای رنگ با توان خروجی ماژول

Table 3. The correlation between color parameters and module output power

correlation	parameter
0.704	R
-0.755	G
-0.545	B
-0.723	L^*
0.779	a^*
-0.385	b^*
0.684	H
-0.621	S
-0.486	V

برای رابطه هر کدام از این پارامترها با توان خروجی برازش منحنی های مختلف در نرم افزار SPSS 16 انجام شد. در نهایت مشاهده شد برای همه پارامترها مناسب ترین معادله، معادله درجه ۳ بود. نتایج برازش منحنی برای a^* به عنوان بهترین پارامتر از نظر همبستگی با توان خروجی ماژول در جدول (۴) آمده است.

جدول ۴- ضریب همبستگی معادلات مختلف برای ارتباط a^* و توان خروجی ماژول

Table 4. Correlation coefficient of different equations for a^* and module output power

R^2	Model
0.608	Linear
0.469	Logarithmic
0.281	Inverse
0.876	Quadratic
0.928	Cubic
0.611	Compound
0.472	Power
0.611	Growth
0.611	Exponential

به دلیل اینکه برای همه پارامترها مناسب ترین معادله، معادله درجه ۳ بود در جدول (۵) نتایج و جزئیات ضرایب استاندارد معادلات آن ها و ضریب همبستگی آن نیز برای پارامترهای منتخب ارائه شده است. در این معادلات y برابر توان خروجی ماژول و x برابر پارامتر تعیین شده می باشد.

جدول ۵- معادلات درجه ۳ استخراج شده برای پارامترهای منتخب و توان خروجی ماژول

Table 5. Cubic equations extracted for selected parameters and module output power

R^2	model	parameter
0.761	$y=0.634x-4.182x^2+4.354x^3$	R
0.888	$y=-0.4.832x+13.656x^2-9.760x^3$	G
0.799	$y=-4.845x+13.422x^2-9.474x^3$	L^*
0.928	$y=3.874x-11.559x^2+8.630x^3$	a^*



یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



۴- نتیجه گیری

همان طور که در بخش قبل مشاهده شد، به ترتیب پارامترهای a^* ، G ، L^* و R بیشترین میزان همبستگی را با توان خروجی ماژول فتوولتائیک داشتند و پس از بررسی معادلات مختلف برای تعیین توان خروجی ماژول با توجه به پارامترهای تصویر حرارتی، مشاهده شد a^* با معادله درجه ۳ ارائه شده با ضریب تبیین ۰/۹۲۸ با توان ماژول فتوولتائیک ارتباط دارد. بنابر این با استخراج این مولفه‌های رنگی از تصاویر حرارتی گرفته شده از ماژول فتوولتائیک می‌توان با دقت خوبی توان خروجی ماژول را پیش بینی کرد.

۵- مراجع

Acciani, G., Simione, G. B., & Vergura, S. (2010, March). Thermographic analysis of photovoltaic panels. In International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10), Granada, Spain, March (pp. 23-25).

Anonymous. (2014). International Energy Agency (IEA), World Energy Outlook.

Buerhop, C., Pickel, T., Dalsass, M., Scheuerpflug, H., Camus, C., & Brabec, C. J. (2016, June). aIR-PV-check: a quality inspection of PV-power plants without operation interruption. In Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2016 IEEE 43rd (pp. 1677-1681). IEEE.

Buerhop-Lutz, C., & Scheuerpflug, H. (2015). Inspecting PV-plants using aerial, drone-mounted infrared thermography system. 3rd Southern African Solar Energy Conference, South Africa, 11-13 May, 2015.

Dotenco, S., Dalsass, M., Winkler, L., Würzner, T., Brabec, C., Maier, A., & Gallwitz, F. (2016, March). Automatic detection and analysis of photovoltaic modules in aerial infrared imagery. In Applications of Computer Vision (WACV), 2016 IEEE Winter Conference on (pp. 1-9). IEEE.

Gan, P. Y., & Li, Z. (2015). Quantitative study on long term global solar photovoltaic market. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 46, 88-99.

Gini, R., Pagliari, D., Passoni, D., Pinto, L., Sona, G., & Dosso, P. (2013). UAV photogrammetry: Block triangulation comparisons. Int. Arch. Photogram. Remote Sens. Spat. Inf. Sci, 1, W2.

<https://click.ir/1395/12/08/how-does-thermal-imaging-work>

http://www.saba.org.ir/saba_content

<http://www.shana.ir/fa/newsagency>

Köntges, M., Kurtz, S., Packard, C., Jahn, U., Berger, K. A., Kato, K., ... & Iseghem, M. (2013). Performance and reliability of photovoltaic systems Subtask 3.2: Review of failures of photovoltaic models. IEA PVPS Task 13 external final report.

Tsanakas, J. A., Ha, L. D., & Al Shakarchi, F. (2017). Advanced inspection of photovoltaic installations by aerial triangulation and terrestrial georeferencing of thermal/visual imagery. Renewable Energy, 102, 224-233.

Tsanakas, J. A., Vannier, G., Plissonnier, A., Ha, D. L., & Barruel, F. (2015). Fault diagnosis and classification of large-scale photovoltaic plants through aerial orthophoto thermal mapping. In Proceedings of the 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2015 (pp. 1783-1788).

Tyutyundzhiev, N., Lovchinov, K., Moreno, F. M., Leloux, J., & Narvarte, L. (2015, September). Advanced PV modules inspection using multirotor UAV. In 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Campus Sur UPM. Ctra. Valencia km (Vol. 7).