



عیب یابی تجهیزات فتوولتائیک بر مبنای پردازش تصویر مادون قرمز

اصغر کریمی، عضو هیئت علمی، موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی استان اصفهان

As.karimi@gmail.com

پریسا اشتری، کارشناسی، موسسه آموزش عالی صفهان

Ashtari.parisa@gmail.com

فرزاد حاجی محمدی، کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی،

نجف آباد، ایران

farzad.hajimohammadi@gmail.com

چکیده

در سال های اخیر با توجه به رعایت مسائل زیست محیطی، نصب منابع تولید پراکنده¹ (DG) همچون منابع خورشیدی در سیستم های تولید انرژی الکتریکی گسترش روز افزونی داشته است. برای این منظور تلاش های فراوانی برای بهبود کیفیت مازول های فتوولتائیک صورت گرفته، که منجر به افزایش بازده این منابع گردیده است. آگاهی از وضعیت سلامت سیستم های فتوولتائیک² (PV) نصب شده و میزان استهلاک آن ها از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین، به یک روش تشخیص مناسب نیاز داریم که توانایی ارائه اطلاعات دقیق و بدون ابهام در این زمینه را داشته باشد. در این مقاله یک سناریوی تشخیصی ارائه شده است که شامل دو فاز متفاوت است. فاز اول مبنی بر پردازش تصویر مادون قرمز (ترموگرافی) تجهیزات فتوولتائیک می باشد که منجر به ارائه یک خروجی کمی و کیفی برای هر سلول از یک پنل خورشیدی می گردد. فاز دوم از خروجی های به دست آمده در فاز اول به عنوان پارامترهای ورودی استفاده نموده و وضعیت الکتریکی پنل خورشیدی را مورد مطالعه قرار داده و تجزیه و تحلیل های لازم صورت می گیرد. در نهایت می توان تصمیم گیری صحیحی در مورد وضعیت کلی میزان استهلاک، توان خروجی، بازده و ... تجهیزات فتوولتائیک انجام داد. قابل ذکر است که تحلیل های فاز اول و دوم این مقاله به ترتیب به کمک نرم افزارهای FLIR و Etap صورت گرفته است.

کلیدواژه ها: سلول های فتوولتائیک، پنل های خورشیدی، پردازش تصویر مادون قرمز

¹ Distributed Generation

² Photovoltaic



1- مقدمه

با توجه به مطالعه اخیر موسسه فرانهور (Fraunhofer) در مورد سیستم‌های انرژی خورشیدی¹ (ISE)، امروزه حداکثر بازده سلول‌های فتوولتائیک (PV) به 46 درصد رسیده است، اما این عملکرد به طور موثر تنها در نتایج آزمایشگاهی به دست آمده است [1]. رکورد قبلی بازده (44/7٪) توسط ISE به دست آمده است و در مقاله مرجع [2] ارائه شده است. این مقادیر (همچنین دیگر نتایج حاصل از سال 1976) توسط آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر² در یک نمودار شناخته شده و مشهور خلاصه شده است [3]. به هر حال، با یک دید واقعی‌تر، بازده ماژول‌های PV تجاری از 8 تا 22 درصد می‌باشد (حد پایین به سلول‌های PV آمورف (سیلیکونی) و اورگانیک و مقادیر بالاتر به نوع منوکریستال (کریستالی) اشاره دارد).

گاهی اوقات تلفات توان به علت گرد و غبار و یا خاک در ماژول‌های PV می‌باشد. اما امکان دارد این تلفات ناشی از مشکلات داخلی سلول (مشکلات الکتریکی) نیز باشد. در موارد قبلی، اثر افزایش دما مطابق جدول (3) مرجع [4] گزارش شده است.

افزایش غیرطبیعی درجه حرارت یک سلول PV (که سلول داغ (hot cell) نامیده می‌شود) باعث کاهش شدید بازده آن می‌گردد و بر انرژی تولیدی حاصله نیز، تاثیر گذار است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش دما به میزان 10 درجه سانتی‌گراد در سطح سلول، منجر به افزایش توان تلفاتی در حدود 4٪ می‌گردد (این hot cell، را روشن (light) می‌نامیم، در حالی که با افزایش 18 درجه سانتی‌گرادی، توان تلفاتی سلول در حدود 7 تا 10٪ کاهش می‌یابد. (این hot cell، را قوی (strong) می‌نامیم).

به طور کلی مشکلات داخلی و نواقص ایجاد شده در یک سلول خورشیدی به دو گروه اصلی تقسیم‌بندی می‌شوند [5] - [7]: گروه اول شامل مشکلات ناشی از مواد (وابسته به ساختار داخلی مواد) و گروه دوم خطاهای مبتنی بر فرایند (ایجاد شده در طول فرایند تولید) را پوشش می‌دهند. به منظور بررسی عمیق‌تر این پدیده‌ها، برخی از نقص‌های خاص و شناخته شده مدلسازی شده و به سلول‌های PV با عملکرد صحیح اعمال شده است و اثرات حرارتی آنها به طور عمده با استفاده از روش اجزای محدود (FEM) بررسی می‌گردد [8] و [9].

در واقع، FEM به صورت گسترده جهت مطالعه اثرات در کاربردهای صنعتی برای اهداف تشخیصی خطا به کار می‌رود. بنابراین، برای مثال، در مرجع [10]، این روش به منظور مدل‌سازی سه نوع مختلف از نقایص که معمولاً در ماژول‌های PV دیده می‌شود، مورد استفاده قرار گرفته است (شنت لبه خطی و یا ایجاد حفره برای سلول‌های mono-Si و poly-Si و نفوذ رسانا برای سلول‌های amorphous-Si) که شامل یک تجزیه و تحلیل دقیق از درجه دما می‌باشد. به هر حال، این نقایص تنها مواردی نیستند که در حال حاضر شناخته شده است و می‌توان موارد دیگری نظیر هوا به دام

¹ Institute for Solar Energy² National Renewable Energy Laboratory



افتاده، شنت لبه غیر خطی، نوع شاتکی، خش و ذرات آلومینیوم را نام برد. با توجه به اینکه بسیاری از این نقایص دیگر نه تعریف و نه مدل می گردند، به همین دلیل، بررسی این مشکلات و نواقص یک زمینه کاری و تحقیقاتی مهم و گسترده در آینده محسوب می شود. ولی آنچه مسلم است در حال حاضر، نقص ها و معایب با افزایش درجه حرارت نمایان می گردند.

از آنجا که یک ماژول PV نمی تواند نقطه به نقطه با استفاده از یک دماسنج مورد بررسی قرار گیرد، این موضوع با استفاده از ترموگرافی کنترل می شود، تا نقاط داغ مشخص گردیده و انجام بررسی های موثر و منظم در راستای برطرف نمودن آنها در سلول های خورشیدی میسر گردد. [11]. به عنوان مثال، در [12]، تجزیه و تحلیل حرارتی برای شناسایی عدم تطابق خطا در ماژول های PV استفاده می شود. در مرجع [13]، از این روش برای تشخیص شکاف های خیلی ریز استفاده شده است و در [14]، ترموگرافی برای بهبود بازده انرژی در شرایط سایه جزئی ارائه شده است. همچنین در [15]، این روش برای کنترل کیفیت ماژول های PV به کار برده شده است، علاوه بر سایر روش های غیر مخرب دیگر مانند تصویربرداری الکترو - لومینسانس [16] و پیشنهاد ترکیب هم زمان تکنیک های لومینسانس و ترموگرافی در طول فرایند تولید در مرجع [17]، در حال حاضر، یک مقایسه بین تصویربرداری لومینسانس و ترموگرافی ثابت می کند که هیچ برتری بین این دو روش در تشخیص معایب سلول های خورشیدی وجود ندارد (همان طور که در جدول (1) مرجع [18] نشان داده شده است)، ولی به هر حال ترموگرافی نسبت به سایر روش ها مزیت هایی دارد. در واقع، امروزه این روش - ها منجر به ارائه ی یک ابزار قوی، مقاوم و در دسترس به منظور تشخیص معایب ناشی از دلایل مختلف، شده است، مانند:

1- دوربین های حرارتی قابل حمل و ثابت

2- تجهیزات ارزان قیمت

3- سنسورهای نوع شناسی متفاوت

به عنوان مثال، یک سیستم کنترل خودکار برای نیروگاه فتوولتائیک قادر به تشخیص یک ماژول معیوب از بقیه ماژول های سالم می باشد که اخیرا در [19] پیشنهاد شده است که شامل یک دوربین مادون قرمز (IR) نصب شده بر روی یک حامل هوایی بدون سرنشین است. با این وجود ترموگرافی ساده و دوربین های حرارتی (ترموویژن) و یا پردازنده های تصویری که بر روی کامپیوتر اجرا می شوند، تنها اطلاعاتی ساده در مورد هر سلول (به عنوان مثال، دمای یک پیکسل انتخاب شده، میانگین دمای مناطق مستطیلی، دمای مناطق غیرهمجوار و غیره) را ارائه می دهند.

این سناریو انگیزه ی این مقاله در پیشنهاد یک کار تشخیصی به منظور تجزیه و تحلیل کمی و کیفی تجهیزات PV را نشان می دهد که بر مبنای سطح هر سلول منفرد و بر اساس پردازش خودکار تصاویر مادون قرمز دریافتی در نرم افزار FLIR اجرا شده است. مراحل شبیه سازی شامل چندین مرحله و محاسبات فراوان است، زیرا تعداد ماژول های PV که معمولا در طی یک دوره تعمیر و نگهداری مورد بررسی قرار می گیرند، ممکن است زیاد باشد به عنوان مثال یک نیروگاه خورشیدی با



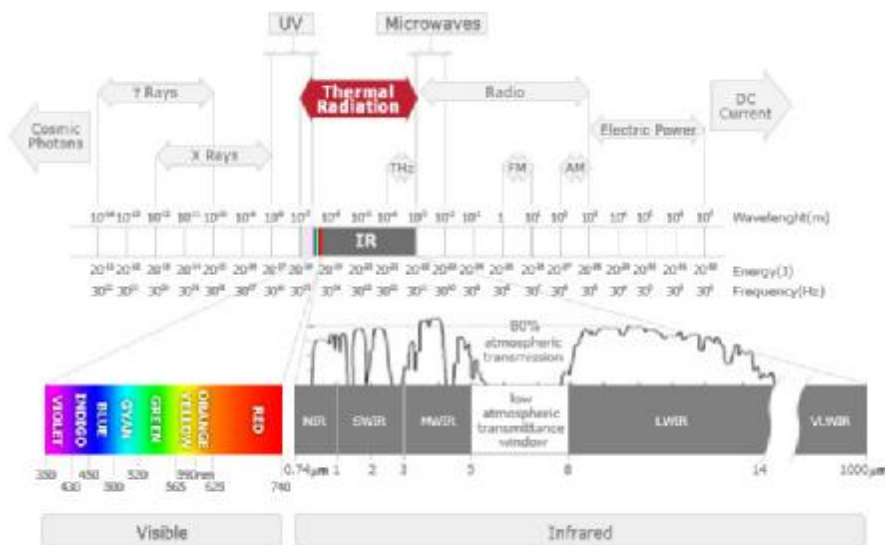
ظرفیت 1MW می تواند شامل بیش از 5000 ماژول PV باشد. در بخش دوم، ما یک پلت فرم نرم-افزاری ارائه می دهیم که با استفاده از کتابخانه نرم افزار [20] Etap گردش کار را اجرا می کند و ما را قادر می سازد تا در یک زمان بسیار کوتاه تشخیص صحیح و درستی انجام دهیم

ادامه مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است: بخش دوم شامل خلاصه روابط میان گروه های طیف مادون قرمز، سنسورهای دوربین های حرارتی و رفتار شیشه ای بر ماژول PV می باشد. در بخش سوم روند کار تشخیصی ارائه و مراحل اصلی آن نشان داده شده است. نتایج روش پیشنهادی در قسمت چهارم آورده شده است، و در پایان نتیجه گیری در بخش پنجم و انتهای این مقاله ارائه گردیده است.

2- آنالیز مادون قرمز و مشخصات دوربین حرارتی

شکل (1) نمودار طول موج زوم شده بر روی طیف مرئی و مادون قرمز را نشان می دهد. همان طور که نشان داده شده است، باند مادون قرمز بلافاصله پس از رنگ قرمز طیف مرئی، که نام خود را از آن می گیرد، ظاهر می شود. علاوه بر این، معمولاً به سایر زیر باندها که توسط صفات near (بالاتر از محدوده قابل مشاهده)، shortwave، midwave، longwave مشخص گردیده اند تقسیم می شوند. بسیار مهم است که ترکیب طیف مادون قرمز، زمانی که این طیف برای تجهیزات PV به کار می رود، به دلایل زیر به درستی در نظر گرفته شود:

- 1- سنسورهای حرارتی دوربین تنها محدوده طیفی خاصی از تابش را دریافت نموده و قادر به دریافت کل طیف IR نمی باشند بنابراین، دانستن مشخصات دوربین حرارتی مورد استفاده بسیار مهم است.
- 2- شیشه حفاظتی تجهیزات PV که شیشه های خورشیدی نامیده می شوند با توجه به طول موج تابش های ساطع شده رفتار متفاوتی از خود بروز می دهند. (مات برای طول موج مادون قرمز longwave و شفاف برای مادون قرمز midwave).



شکل 1: زیر باندهای مادون قرمز near longwave midwave shortwave



با توجه به نکته دوم مطرح شده، اگر IR مورد استفاده با استفاده از یک دوربین حرارتی midwave یا یک longwave ساخته شده باشد تفاوت عملکرد قابل توجهی خواهیم داشت. عملکرد دوربین های حرارتی در محدوده مادون قرمز midwave از نقطه نظر تکنولوژی بسیار پیچیده هستند، چرا که آنها نیاز به یک سیستم خنک کننده برای آشکارساز حرارتی دارند. این امر باعث افزایش قیمت و گران شدن آنها گردیده که منجر به کاهش انتشار آنها می گردد.

3- نکات پیاده سازی

خلاصه گردش کار تشخیصی ارائه شده در این مقاله در شکل (2) نشان داده شده است. هر گام الگوریتم شامل مراحل پیش پردازش، ورودی، پردازش و خروجی به کمک نرم افزار FLIR و در نهایت تجزیه و تحلیل الکتریکی توسط نرم افزار Etap می باشد.

3-1- ورودی

فاز ورودی علاوه بر تصویر دریافتی جهت تجزیه و تحلیل، پارامترهای محیطی و مقادیر آستانه ای مورد نیاز و لازم برای اطمینان از صحت تشخیص را نیز شامل می شود.

3-2- پیش پردازش

پس از بارگذاری تصویر و تعریف منطقه مورد مطالعه¹، ماژول PV را ثبت و مشخص می کنیم. یک مرحله پیش پردازش، برای اصلاح دیدگاه و در نهایت کاهش نویز مورد نیاز است. جهت اصلاح چشم انداز، به یک تصویر "بدون تغییر" که در آن تمام سلول های PV به یک منطقه مشابه تغییر اندازه داده شده اند، نیاز است. قابل ذکر است که فیلتراسیون انجام شده در این مرحله به منظور کاهش نویز فیلتر هیستوگرام² است.

3-3- پردازش

مرحله پردازش شامل استخراج بالاترین و پائین ترین دما و همچنین متوسط دمای منطقه مورد مطالعه به کمک فیلتراسیون مادون قرمز می باشد.

3-4- خروجی

هنگامی که ماژول PV به طور کامل تجزیه و تحلیل شد، همه نتایج تولید شده، به صورت عددی و گرافیکی در یک قالب آسان برای تفسیر، گرد آوری و جمع می شوند.

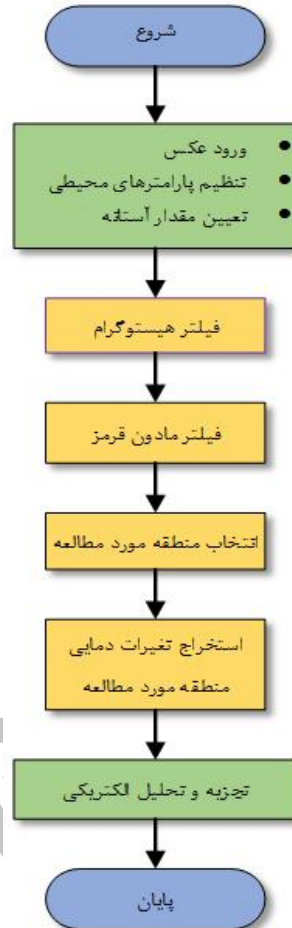
¹ ROI (Region Of Interest)

² Histogram

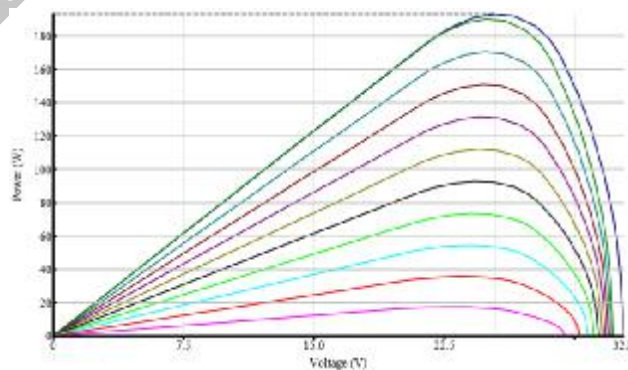


5-3- تجزیه و تحلیل الکتریکی مبتنی بر پردازش تصویر مادون قرمز

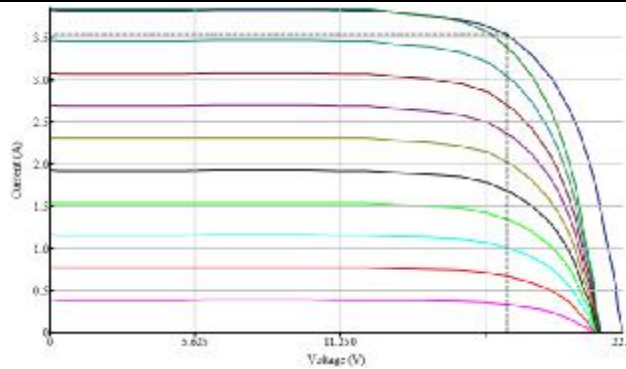
با استفاده از میانگین دمای به دست آمده از مراحل قبل، اثر آن بر روی مشخصه های الکتریکی ماژول خورشیدی مطابق اشکال (3) و (4) بررسی می گردد و در نهایت با نتایج به دست آمده از خروجی های الکتریکی، تصمیم صحیحی در مورد تعویض یا عدم نیاز به تعویض پنل فتوولتائیک گرفته می شود.



شکل 2: مراحل گردش کار تشخیصی



شکل 3: منحنی مشخصه های توان-ولتاژ (P-V) یک پنل فتوولتائیک



شکل 4: منحنی مشخصه های جریان-ولتاژ (I-V) یک پنل فتوولتائیک

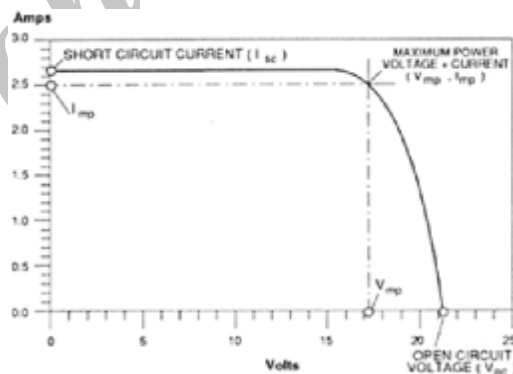
اثر دما بر روی بازده الکتریکی یک ماژول فتوولتائیک را می توان از طریق محاسبه توان ماکزیمم تولیدی ماژول فتوولتائیک و به کمک رابطه (1) محاسبه کرد:

$$P_m = V_m \times I_m = FF \times V_{oc} \times I_{sc} \quad (1)$$

که در این رابطه m ، مطابق شکل (5) بیانگر نقطه ماکزیمم توان از منحنی جریان-ولتاژ ماژول PV می باشد. V_{oc} و I_{sc} به ترتیب بیانگر مقادیر ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه هستند. FF مطابق رابطه (2) برابر است با نسبت حداکثر توان قابل دستیابی به حاصلضرب ولتاژ مدار باز در جریان اتصال کوتاه تولیدی.

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} \times I_{sc}} = \frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (2)$$

قابل ذکر است که مقدار شاخص FF ، در حقیقت مطابق شکل (4) سطح مستطیلی زیر منحنی I-V پنل خورشیدی می باشد که برای یک پنل سالم باید بزرگتر از 0/7 باشد.



شکل 5: منحنی جریان-ولتاژ ماژول PV

4- نتایج روش پیشنهادی

4-1- مشخصات سیستم خورشیدی مورد مطالعه

در این بخش، یک مورد مطالعه را ارائه خواهیم داد که مربوط به یک واحد خورشیدی تولید توان با ظرفیت 20 کیلووات است که در سقف یک ساختمان قرار دارند و در سمت جنوب قرار گرفته و دارای



40 درجه شیب است. پارامترهای ماژول های PV مورد استفاده در جدول (1) گزارش شده است. دوربین حرارتی استفاده شده Therma CAM B4 توسط FLIR است، ویژگی های آن در جدول (2) گزارش شده است. قابل ذکر است که این دوربین، یک دوربین حرارتی با طول موج بلند است (نگاه کنید به محدوده طیفی). آشکارساز غیر حرارتی، دارای وضوح 240×320 است و تصاویر IR خروجی نیز دارای کیفیت متوسط و بالا می باشد. اندازه گیری دقیق و تجزیه و تحلیل آن 76800 نقطه است.

این دوربین می تواند در دمایی بین -20 و $+100$ درجه سانتی گراد با حساسیت دمایی $0/08$ درجه سانتی گراد عمل کند، بنابراین امکان تشخیص تغییرات کوچک دما را می دهد. در مدت زمان استفاده، شرایط آب و هوایی خوب (درجه حرارت هوا برابر با 10 درجه سانتی گراد، تابش خورشید 650 وات / مترمربع و رطوبت نسبی 54 درصد) امکان تصحیح تصاویر را فراهم کرده است. قدرت انعکاس حرارت بر روی $0/85$ تنظیم شده است (این عدد وابسته به مواد و ضخامت شیشه خورشیدی است و معمولاً از $0/85$ تا $0/90$ است)، در حالی که درجه حرارت منعکس شده در هنگام استفاده، تغییر می یابد و وابسته به موقعیت متقابل دوربین حرارتی و هدف است.

جدول 1: پارامترهای الکتریکی ماژول های فتوولتائیک مورد مطالعه

PV module	PhotoWatt
Code	PV1650
Material	Poly-Si
P_n [W]	$210 \pm 3\%$
V_{oc} [V]	32.8
I_{sc} [A]	8.23
V_{mpp} [V]	25.36
I_{mpp} [I]	7.62
NOCT [°C]	46 ± 1

جدول 2: پارامترهای دوربین حرارتی مورد استفاده

Property	Value
Field of view	$23^\circ \times 17^\circ$
Min focus distance	0.3 m
Thermal sensitivity	0.08°C at 30°C
Image frequency	50-Hz noninterlaced
Focus	Manual
Detector type Focal	Focal Plane Array (FPA), uncooled microbolometer 320×240 pixels
Spectral range	$7.5\text{--}13 \mu\text{m}$
Digital zoom	1x, 2x, or 4x
Temperature range	-20 to $+100^\circ\text{C}$
Operating temperature range	-15 to $+50^\circ\text{C}$
Accuracy	$\pm 2^\circ\text{C}$, $\pm 2\%$
Repeatability	$\pm 1^\circ\text{C}$, $\pm 1\%$



4-2- فرآیند تحلیل عیب سیستم مورد مطالعه

بر اساس موارد گفته شده در قسمت قبل، تشخیص عیب پنل فتوولتائیک بر اساس تحلیل دمایی آن شامل مراحل زیر می باشد:

الف) ورودی

1- تهیه یک عکس دیجیتال از آرایه فتوولتائیک (شکل 6)

2- وارد کردن عکس در نرم افزار FLIR

ب) پیش پردازش

1- اعمال فیلتر هیستوگرام بر روی عکس به منظور افزایش کنتراست تصویر (شکل 7)

ج) پردازش

1- اعمال فیلتر مادون قرمز بر روی عکس دیجیتال ورودی به کمک نرم افزار FLIR (شکل 8)

د) خروجی

1- انتخاب ناحیه مورد نظر به کمک ابزارهای موجود در جعبه ابزار نرم افزار FLIR

2- استخراج حداقل و حداکثر و میانگین دمای ناحیه انتخاب شده (شکل 9)

ه) تحلیل الکتریکی

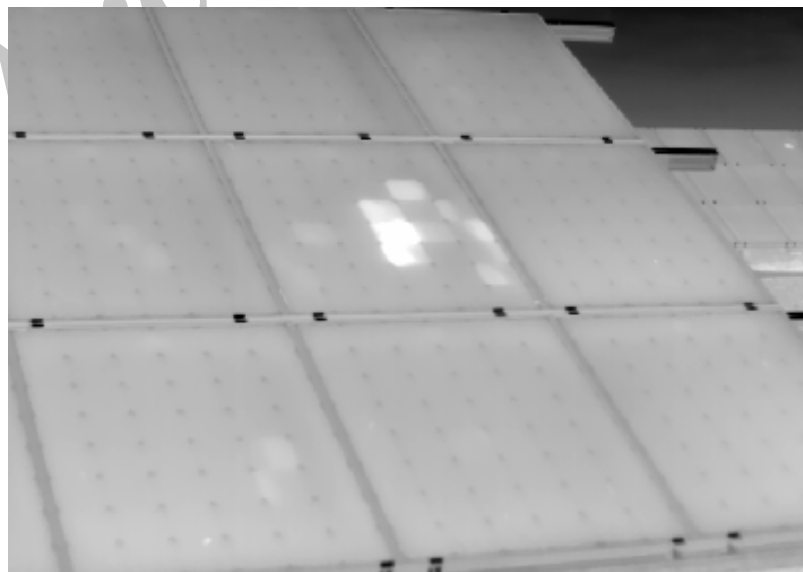
1- طراحی آرایه فتوولتائیک دز نرم افزار Etap و اعمال تغییرات دمایی به دست آمده از مرحله قبل

بر روی پارامترها و ضرایب دمایی موجود در نرم افزار، مانند دمای عادی عملکرد سلول فتوولتائیک¹ و...

(شکل 10)

3- محاسبه مجدد پارامترها و شاخص های الکتریکی پنل فتوولتائیک و مقایسه آن ها با مقادیر اصلی

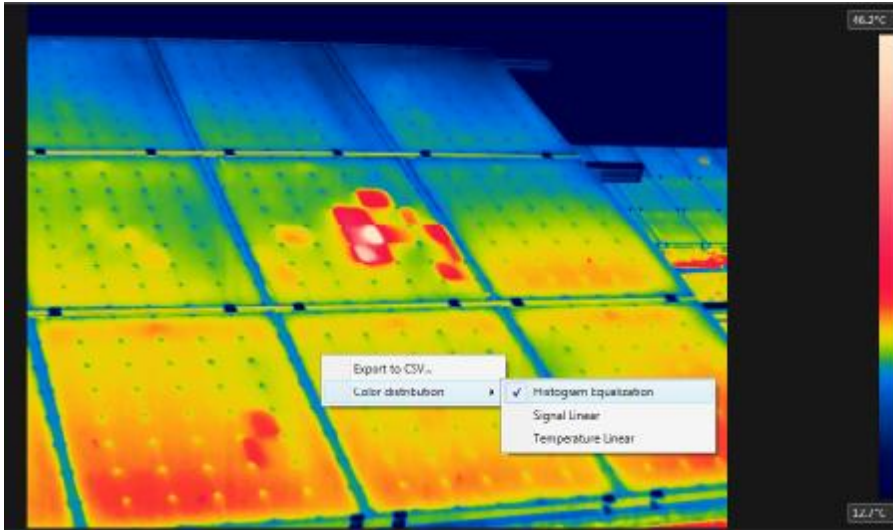
به منظور تحلیل سالم و معیوب بودن ماژول خورشیدی مورد نظر.



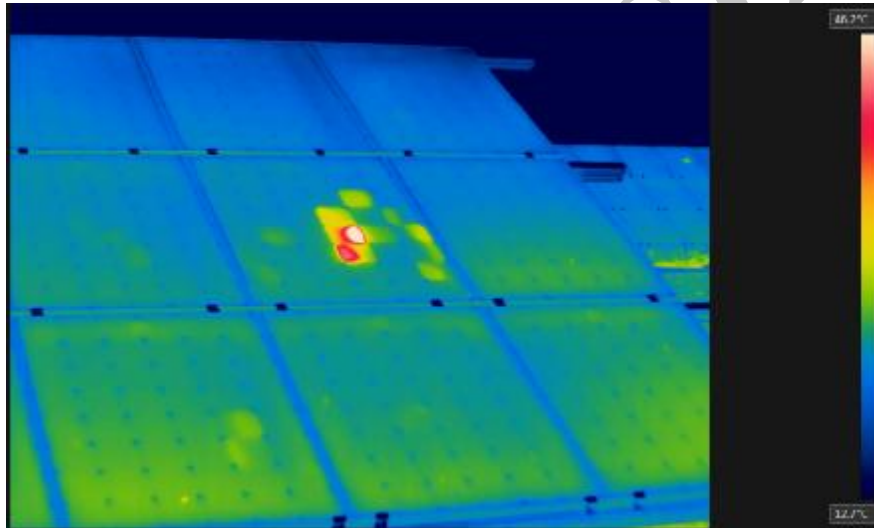
¹ Normal Operation Cell Temperature



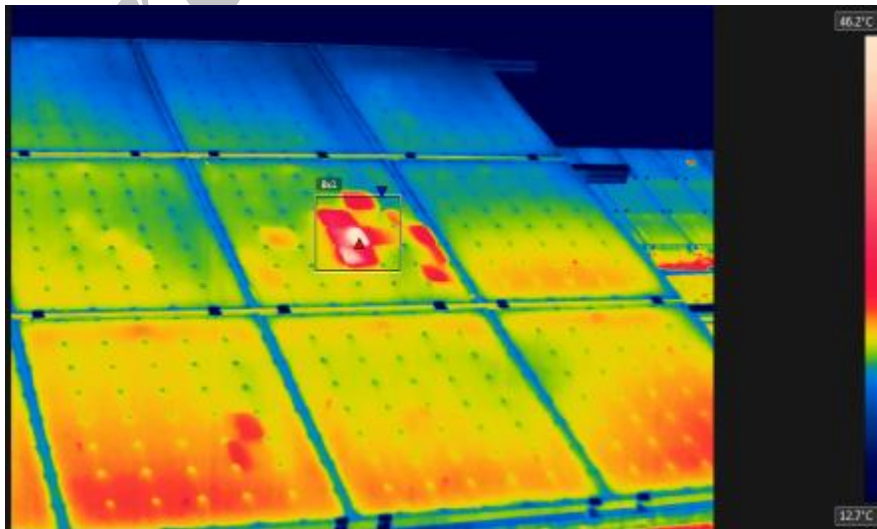
شکل 6: عکس دیجیتال از پنل فتوولتائیک



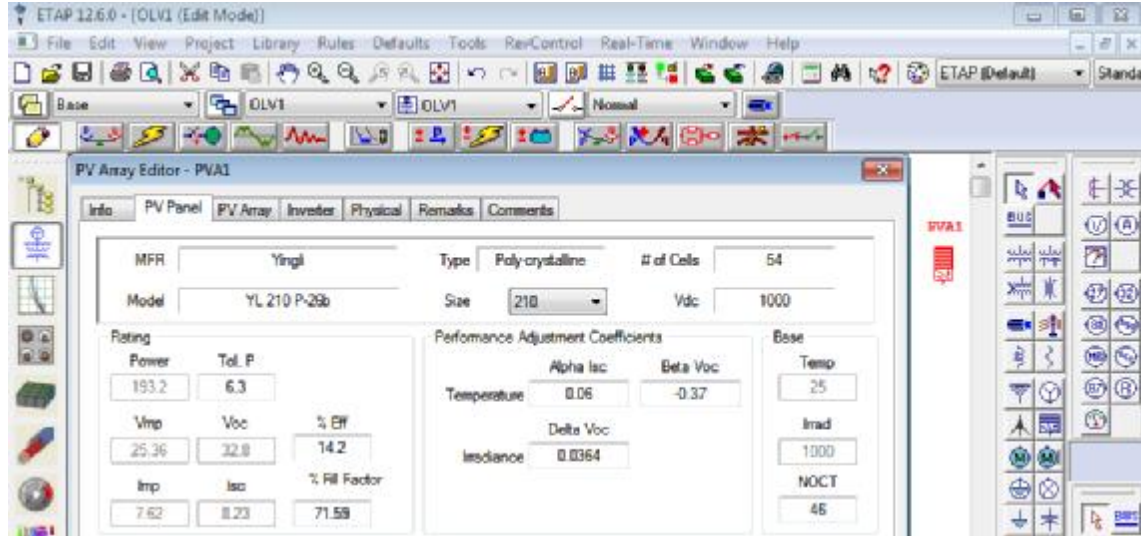
شکل 7: اعمال فیلتر هیستوگرام بر روی ورودی



شکل 8: اعمال فیلتر مادون قرمز بر روی ورودی

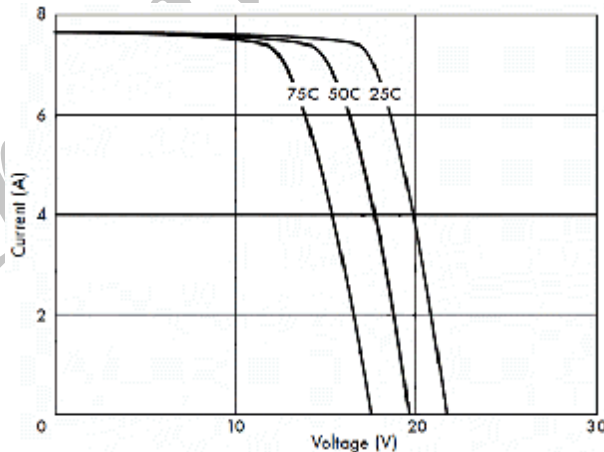


شکل 9: انتخاب ناحیه مورد مطالعه از پنل خورشیدی



شکل 10: طراحی یک آرایه فتوولتائیک به کمک نرم افزار Etap

با افزایش دمای ناحیه مورد مطالعه مطابق شکل (11) منحنی مشخصه I-V پنل خورشیدی به سمت چپ شیفت پیدا می کند و در حقیقت در جریان ثابت، منجر به کاهش ولتاژ مدار باز (V_{oc}) و همچنین ولتاژ ماکزیمم دریافتی (V_{mp}) پنل خورشیدی می گردد. نتایج خروجی مراحل قبل به صورت خلاصه در جدول (3) آورده شده است. نتایج حاکی از کاهش شاخص FF به کمتر از 0/7 به ازای افزایش 4 درجه ای دمای ناحیه مورد مطالعه از پنل خورشیدی می باشد که کمتر از حد قابل قبول آن است. لذا در این حالت می توان به تولیدکنندگان توان الکتریکی، تعویض پنل خورشیدی معیوب را پیشنهاد نمود.



شکل 11: اثر تغییرات دما بر منحنی جذب پنل فتوولتائیک

جدول 3: خروجی پارامترهای الکتریکی آرایه فتوولتائیک مورد مطالعه

دمای سلول	V_m	I_m	V_{oc}	I_{sc}	FF%
46	25/36	7/62	32/8	8/23	71/59
50	23/5	7/62	32	8/23	67/99



5- نتیجه گیری

استفاده از تکنولوژی خورشیدی در وسعت زیاد و در نتیجه احداث نیروگاه‌های خورشیدی بزرگ در سال‌های اخیر روندی رو به رشدی داشته و به سرعت در حال گسترش است. از طرف دیگر این تجهیزات نیاز به بازدیدهای دوره‌ای و پیشگیریانه دارند تا قبل از وقوع خرابی و عیب در تجهیزات مورد استفاده، آن‌ها را شناسایی و سپس تعمیر یا تعویض نمود. برای این منظور استفاده از پردازش تصویر مادون قرمز و تحلیل دمایی صفحات خورشیدی روشی بسار مناسب می باشد. به کمک این آنالیز بر اساس تغییرات دمای سلول های فتوولتائیک می‌توان نوع عیب را تشخیص داد و با توجه به تحلیل‌های بعدی تصمیم صحیحی در مورد تعمیر یا تعویض پنل اتخاذ نمود.

در این مقاله عکس دیجیتالی که با دوربین دیجیتال از سطح پنل خورشیدی گرفته می‌شود به عنوان ورودی به نرم افزار FLIR وارد می‌شود. به کمک این نرم افزار فیلتر هیستوگرام و مادون قرمز بر روی عکس اعمال گردیده و سپس ناحیه مورد نظر به منظور تحلیل دمایی انتخاب و حداکثر دما و میانگین آن استخراج می‌شود. دمای خروجی این تحلیل، به عنوان ورودی نرم افزار Etap مورد استفاده قرار گرفته و به کمک آن اثرات این تغییرات دمایی بر روی مقادیر ولتاژ و جریان خروجی پنل و ... تحلیل می‌گردد. در نهایت به کمک خروجی‌های به دست آمده می‌توان تصمیم صحیح و مطمئنی در مورد پنل مورد نظر گرفت که آیا ادامه کار آن در سیستم به لحاظ توان تولیدی و هزینه های تعمیر و نگهداری و ... صرفه اقتصادی دارد یا خیر. قابل ذکر است که با یک تحلیل دمایی (ترموگرافی) ساده نمی‌توان آنالیز صحیحی در مورد وضعیت پنل ارائه نمود. بنابراین روش ارائه شده در این مقاله در عمل و صنعت می‌تواند به عنوان یک روش تشخیصی مناسب مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

- [1] [Online]. Available: <http://www.ise.fraunhofer.de/en/press-and-media/pdfs-zu-presseinfos-englisch/2014/press-release-new-world-record-for-solar-cell-efficiency-at-46-percent.pdf>
- [2] F. Dimroth et al. (2014) *Wafer bonded four-junction GaInP/GaAs//GaInAsP/ GaInAs concentrator solar cells with 44.7% efficiency*, Prog. Photovolt. Res. Appl. vol. 22. (2014). pp. 277–282.
- [3] [Online]. Available: http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg
- [4] E. Skoplaki and J. A. Palyvos. (2009) *On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations*, Sol. Energy, vol. 83. (2009). pp. 614–624.
- [5] O. Breitenstein, J. P. Rakotoniaina, M. H. Al Rifai, and M. Werner. (2004) *Shunt type in crystalline solar cells*, Prog. Photovolt. Res. Appl. vol. 12. (2004). pp. 529–538.
- [6] J. P. Rakotoniaina, S. Neve, M. Werner, and O. Breitenstein. (2002) *Material induced shunts in multicrystalline silicon solar cells*, in Proc. Conf. PV Eur. (2002). pp. 24–27.
- [7] G. Acciani, O. Falcone, and S. Vergura. (2010) *Typical defects of PV-cells*, in Proc. IEEE Int. Symp. Ind. Electron. Jul. (2010). pp. 2745–2749.
- [8] S. Vergura, G. Acciani, and O. Falcone. (2009) *Modeling defects of PV-cells by means of FEM*, in Proc. Int. Conf. Clean Electr. Power. (2009). pp. 52–56.



- [9] S. Vergura, G. Acciani, and O. Falcone. (2009) *3-D PV-cell model by means of FEM*, in Proc. Int. Conf. Clean Electr. Power. (2009). pp. 35–40.
- [10] S. Vergura, G. Acciani, and O. Falcone. (2012) *A finite element approach to analyze the thermal effect of defects on silicon-based PV cells*, IEEE Trans Ind. Electron. vol. 59 no. 10. (2012). pp. 3860–3867.
- [11] J. A. Tsanakasa, D. Chrysostomoub, P. N. Botsarisa, and A. Gasteratosb. (2013) *Fault diagnosis of photovoltaic modules through image processing and Canny edge detection on field thermographic measurements*, Int. J. Sustain. Energy, vol. 34. (2013). pp. 1–22.
- [12] Y. Hu, W. Cao, J. Ma, S. J. Finney, and D. Li. (2014) *Identifying PV module mismatch faults by a thermography-based temperature distribution analysis*, IEEE Trans. Device Mater. Rel. vol. 14 no. 4. (2014). pp. 951–960.
- [13] A. Dolara, S. Leva, G. Manzolini, and E. Ogliari. (2014) *Investigation on performance decay on photovoltaic modules: Snail trails and cell microcracks*, IEEE J. Photovolt. vol. 4 no. 5. (2014). pp. 1204–1211.
- [14] Y. Hu, W. Cao, J. Wu, B. Ji, and D. Holliday. (2014) *Thermography-based virtual MPPT scheme for improving PV energy efficiency under partial shading conditions*, IEEE Trans. Power Electron. vol. 29 no. 11. (2014). pp. 5667–5672.
- [15] R. Ebner, B. Kubicek, and G. Ujvari. (2013) *Non-destructive techniques for quality control of PV modules: Infrared thermography, electro- and photoluminescence imaging*, in Proc. 39th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc. (2013). pp. 8104–8109.
- [16] S. Johnston et al. (2014) *Correlating multicrystalline silicon defect types using photoluminescence, defect-band emission, and lock-in thermography imaging techniques*, IEEE J. Photovolt. vol. 4 no. 1. (2014). pp. 348–354.
- [17] M. Peloso, L. Meng, and C. S. Bhatia. (2015) *Combined thermography and luminescence imaging to characterize the spatial performance of multicrystalline Si wafer solar cells*, IEEE J. Photovolt. vol. 5 no. 1. (2015). pp. 102–111.
- [18] O. Breitenstein et al. (2011) *Can luminescence imaging replace lock-in thermography on solar cells?* IEEE J. Photovolt. vol. 1 no. 2. (2011). pp. 159–167.
- [19] M. Aghaei, F. Grimaccia, C. A. Gonano, and S. Leva. (2015) *Innovative automated control system for PV fields inspection and remote control*, IEEE Trans. Ind. Electron. vol. 62 no. 11. (2015). pp. 7287–7296.
- [20] [Online]. Available: <http://etap.com/>