

## محاسبه نرخ خرابی و ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم فتوولتائیک به روش مونت کارلو با در نظر گرفتن شرایط آب و هوایی

نجمه شهیدی راد<sup>۱</sup>، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ مهدی نیرومند<sup>۲</sup>، استادیار؛ رحمت‌اله هوشمند<sup>۳</sup>، استاد

- ۱- گروه مهندسی برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران - shahidirad\_n@eng.ui.ac.ir  
 ۲- گروه مهندسی برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران - mehdi\_niroomand@eng.ui.ac.ir  
 ۳- گروه مهندسی برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران - hooshmand\_r@eng.ui.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله، با توجه به رشد فزاینده استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک در شبکه قدرت و اهمیت آنها، قابلیت اطمینان یک سیستم فتوولتائیک محاسبه شده است. در این راستا ابتدا نرخ خرابی عناصر سیستم با استفاده از استاندارد Fides Guide و با در نظر گرفتن شرایط محیطی، شامل متغی‌های تابش، دما و رطوبت محاسبه شده است. سپس عملکرد زیرسیستم‌های یک سیستم فتوولتائیک از نگاه قابلیت اطمینان ارزیابی شده و قابلیت اطمینان کل سیستم با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو، ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد، دما بیشترین تأثیر را بر نرخ خرابی عناصر دارد. همچنین، نرخ خرابی کلید و خازن مبدل از دیگر عناصر بیشتر است. الگوریتم پیشنهادی برای نیروگاه فتوولتائیک ۲۰ کیلووات در دانشگاه اصفهان اجرا شده است. نتایج شبیه‌سازی، توانایی الگوریتم پیشنهادی در تعیین دقیق قابلیت اطمینان سیستم را مشخص می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** سیستم‌های فتوولتائیک، نرخ خرابی، نرخ تعمیر، استاندارد Fides Guide، قابلیت اطمینان، مونت کارلو.

## Failure Rate Calculation and Reliability Assessment of a PV System based on Monte-Carlo Simulation Considering Environmental Conditions

N. Shahidi Rad<sup>1</sup>, MSc Student; M. Niroomand<sup>2</sup>, Assistant Professor; R.A. Hooshmand<sup>3</sup>, Professor

- 1- Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran, Email: shahidirad\_n@eng.ui.ac.ir  
 2- Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran, Email: mehdi\_niroomand@eng.ui.ac.ir  
 3- Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran, Email: hooshmand\_r@eng.ui.ac.ir

**Abstract:** In this paper, regarding to the growing utilization of photovoltaic (PV) systems in power grid, reliability of a PV system is calculated. In this regard, using FIDES Guide and considering environmental conditions, i.e., irradiation, temperature and humidity, failure rate of each component is calculated. According to the failure/repair rates and also sub-system operations, the reliability of PV system is evaluated based on Monte-carlo simulation. The results show that the temperature has the greatest effect on failure rate of each component. The most failures are related to the IGBT and capacitor. The proposed algorithm is implemented on a 20-KW PV power plant of university of Isfahan. The results show the ability of suggested algorithm to determine the reliability of PV power plant with high accuracy.

**Keywords:** Photovoltaic, reliability, failure rate, repair rate, Fides guide standard, reliability, Monte Carlo.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۲۲

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۳۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۲۸

نام نویسنده مسئول: مهدی نیرومند

نشانی نویسنده مسئول: گروه مهندسی برق - دانشکده مهندسی برق - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران.

## ۱- مقدمه

به دلیل رشد صنعت در چند دهه‌ی گذشته، مصرف انرژی جهانی به شدت افزایش یافته است و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند خورشید، مورد توجه قرار گرفته است. از سال ۱۹۹۰ تاکنون، میانگین رشد سالانه انرژی ناشی از منابع تجدیدپذیر، ۲/۲٪ می‌باشد. این رشد بیشتر ناشی از رشد انرژی‌های بادی و خورشیدی است که به ترتیب ۲۴/۳٪ و ۴۶/۲٪ بوده است [۱]. یکی از راه‌های ساده و مطمئن استفاده از انرژی خورشید، تبدیل مستقیم انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی با استفاده از سیستم فتوولتائیک می‌باشد.

اجزای اصلی یک سیستم فتوولتائیک شامل آرایه فتوولتائیک<sup>۱</sup>، مبدل DC به DC، اینورتر و بخش‌های کنترلی می‌باشد [۲]. قابلیت اطمینان این اجزا بستگی به بار و شرایط محیطی دارد. بیشترین عامل خرابی در سیستم فتوولتائیک به دلیل خرابی ناشی از استرس‌های الکتریکی و حرارتی اینورتر است. در مقابل آن، قابل اعتمادترین قسمت نیز پنل‌های خورشیدی هستند که می‌توانند بیش از ۲۰ سال کار کنند [۳].

از آنجا که هدف اصلی یک طراح، بهبود عملکرد سیستم با افزایش بازده و قابلیت اطمینان و همچنین کاهش هزینه می‌باشد، در نتیجه بررسی قابلیت اطمینان این سیستم‌ها یک نیاز اساسی است. یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی قابلیت اطمینان نرخ خرابی می‌باشد. شرایط آب و هوایی در محاسبه نرخ خرابی عناصر سیستم تأثیرگذار است. همچنین مقادیر نرخ خرابی تجهیزات به صورت مشخص در دسترس نیست و لازم است با استفاده از استانداردهای موجود مقادیر آن را تخمین زد. قدیمی‌ترین استاندارد موجود که آخرین ویرایش آن در سال ۱۹۹۵ انجام شده است MIL-HDBK-217 [۴] می‌باشد. همچنین جهت تخمین نرخ خرابی قابل قبول لازم است به روزرسانی انجام شده و فرسودگی و کیفیت محصول لحاظ شود؛ در حالی که در MIL217 فرسودگی در نظر گرفته نشده و به روزرسانی نیز انجام نشده است [۵]. به دلیل مشکلات بیان شده، استانداردهای جدیدی همچون IEC-TR62380 [۶] و Fides Guide [۷] برای تخمین دقیق‌تر تهیه شده‌اند. در استاندارد IEC-TR62380، تأثیر دما بر نرخ خرابی عناصر به صورت مستقیم لحاظ نشده است [۸]. در حالی که در واقعیت دما یکی از مؤثرترین پارامترها بر نرخ خرابی می‌باشد. با توجه به دلایل بیان شده، در این مقاله از استاندارد Fides Guide، استفاده شده است. استاندارد Fides Guide در سال ۲۰۰۹ توسط چند شرکت فرانسوی ارائه شده است. داده‌هایی که Fides Guide برای ارائه مدل‌های پیش‌بینی خود از آنها استفاده می‌کند، از دو منبع پایگاه داده تحلیل خرابی‌های سیستم‌های نظامی و غیرنظامی و تولیدکنندگان تجهیزات تأمین می‌شود. این استاندارد با در نظر گرفتن شرایط محیطی مانند دما و تابش، استرس‌های حرارتی و الکتریکی، فرسودگی، آلودگی‌های محیطی، کیفیت ساخت و اثر فرآیندهای مختلف در مدت طول عمر اجزا، نرخ خرابی دقیقی را تخمین می‌زند [۹]. در [۱۰ و ۱۱] مقادیر نرخ خرابی

اجزای سیستم فتوولتائیک و بادی با در نظر گرفتن شرایط آب و هوایی و استفاده از استاندارد Fides Guide محاسبه شده است.

روش‌های مختلفی برای آنالیز قابلیت اطمینان وجود دارد. در مقالات [۲۵-۱۲]، تنوع گسترده‌ای از روش‌های ارزیابی قابلیت اطمینان مشاهده می‌شود. در [۱۲] با در نظر گرفتن توان ورودی سیستم و محاسبه نرخ خرابی، قابلیت اطمینان به روش شمارش حالت ارزیابی شده است. اما در این مقاله همه اجزای سیستم فتوولتائیک لحاظ نشده است. در [۱۳-۱۵] از روش درخت خطا برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم PV استفاده شده است. با وجود اینکه درخت خطا یک ابزار قدرتمند برای ارزیابی قابلیت اطمینان محسوب می‌شود، اما نیاز به تلاش قابل توجهی در تشکیل درخت خطا دارد.

عموماً در محاسبه قابلیت اطمینان با استفاده از روش‌های شمارش حالت و درخت خطا، نرخ تعمیر لحاظ نمی‌شود در حالی که این پارامتر بر قابلیت اطمینان تأثیرگذار می‌باشد. اگر نرخ تعمیر تجهیزات در سیستم فتوولتائیک در نظر گرفته شود، نیاز به استفاده از روش‌های پیچیده‌تری برای ارزیابی قابلیت اطمینان آن است. یکی از این روش‌ها، استفاده از مدل مارکوف می‌باشد. در [۱۶-۲۱] قابلیت اطمینان سیستم با در نظر گرفتن نرخ تعمیر و خرابی، با مدل مارکوف محاسبه شده است.

در این مقالات از روش‌های تحلیلی برای محاسبه قابلیت اطمینان استفاده شده است. در روش‌های تحلیلی، از مدل‌سازی ریاضی همراه با ساده‌سازی استفاده می‌شود که به دلیل دور شدن از حالت واقعی، دقت نتایج کاهش می‌یابد. بر خلاف آن در روش‌های مشابه‌سازی، سیستم واقعی مورد مطالعه قرار می‌گیرد و نتایج دقیق‌تری به دست می‌آید.

یکی از روش‌های شبیه‌سازی پرکاربرد در تحلیل قابلیت اطمینان سیستم‌های الکتریکی، استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو است [۳، ۲۲ و ۲۵]. استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو در سیستم‌های پیچیده مانند سیستم ترکیبی فتوولتائیک-بادی مناسب به نظر می‌رسد؛ زیرا کارایی محاسباتی آن مستقل از سائز و پیچیدگی سیستم است. در [۲۲] قابلیت اطمینان سه ساختار به صورت پنل‌های فتوولتائیک سری با اینورتر مرکزی، مبدل DC به DC آیشاری<sup>۲</sup> با اینورتر مرکزی و میکرو اینورترها بدون در نظر گرفتن نرخ تعمیر، به روش شبیه‌سازی مونت کارلو انجام شده است. در [۲۴] نیز طول عمر اتصالات کلید IGBT<sup>۳</sup> استفاده شده در اینورتر، به روش مونت کارلو، محاسبه شده است. کارهای صورت گرفته در حوزه ارزیابی قابلیت اطمینان دارای نواقصی می‌باشند از جمله:

۱. سیستم در دو حالت خراب و سالم در نظر گرفته شده است؛ در حالی که حالت نیمه‌ظرفیت در برآورد کارکرد سیستم فتوولتائیک مؤثر است.
۲. کلیه اجزای سیستم فتوولتائیک در نظر گرفته نشده است.
۳. ارزیابی قابلیت اطمینان همراه با محاسبه دقیق نرخ خرابی انجام نشده است.
۴. الگوریتم مناسبی برای اجرای روش مونت کارلو در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم فتوولتائیک ارائه نشده است.

کنترل مبدل DC به DC در نقطه بیشینه توان<sup>۸</sup> می‌باشد. ساختار سیستم فتوولتائیک به صورت شکل (۱) می‌باشد.

اجزای مورد استفاده در این ساختار در ادامه بیان می‌شود.

### مجموعه پنل فتوولتائیک

مجموعه پنل در نظر گرفته شده برای سیستم فتوولتائیک، شامل ۱۰۸ پنل است که ولتاژ مدار باز هر پنل ۴۲ ولت و توان هر کدام ۱۸۵ وات می‌باشد. این ۱۰۸ پنل به صورت ۳۶ رشته موازی است که هر رشته شامل ۳ پنل و یک فیوز سری است.

### مبدل DC به DC

در سیستم مورد نظر، مبدل DC به DC، یک بوست درهم‌تنیده<sup>۹</sup> سه‌فاز با مقادیر نامی ولتاژ ورودی ۱۲۶ ولت، ولتاژ خروجی ۴۰۰ ولت و توان ۲۰ کیلو وات می‌باشد. بوست سه فاز نسبت به تک‌فاز از قابلیت اطمینان بالاتری برخوردار است چراکه با خراب شدن یک عنصر مبدل، کل مبدل خراب نمی‌شود.

### اینورتر

اینورتر مورد نظر در این سیستم، اینورتر سه‌فاز تمام پل می‌باشد. ولتاژ ورودی اینورتر ۴۰۰ ولت DC و ولتاژ خروجی آن ۲۲۰ ولت مؤثر می‌باشد.

### بخش‌های کنترلی

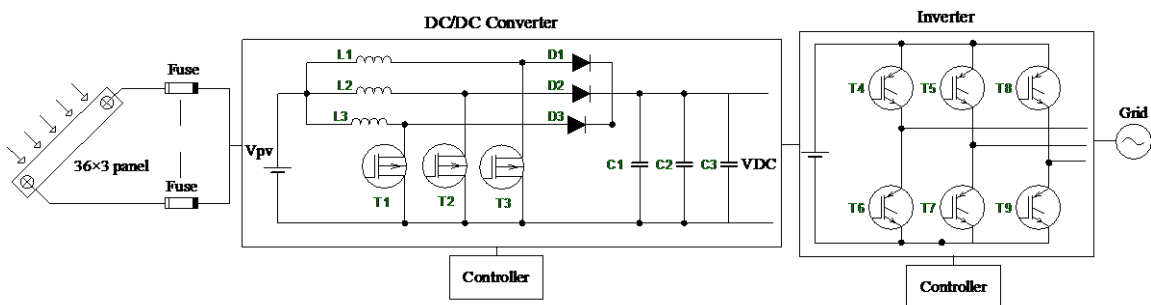
سیستم مورد نظر شامل دو بخش کنترلی، یکی برای کنترل کردن مبدل با قابلیت MPPT و دیگری برای کنترل کردن اینورتر می‌باشد. پس از آشنایی با سیستم فتوولتائیک مورد مطالعه، به ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم پرداخته خواهد شد. در بخش (۳) نرخ خرابی عناصر سیستم فتوولتائیک بر اساس اطلاعات آب و هوایی و با استفاده از استاندارد Fides Guide محاسبه شده‌است.

در این مقاله سعی شده‌است نواقص کارهای انجام گرفته رفع شده و روش مناسبی برای تخمین دقیق نرخ خرابی اجزای سیستم فتوولتائیک و محاسبه قابلیت اطمینان ارائه شود. از این‌رو از جمله نوآوری‌های این مقاله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. تعمیرپذیری اجزای سیستم در ارزیابی قابلیت اطمینان لحاظ شده است.
  ۲. مجموعه پنل و مبدل DC به DC در سه حالت تولید کامل، نیمه‌ظرفیت و از کار افتاده در نظر گرفته شده‌است.
  ۳. نرخ خرابی کلیه اجزای سیستم فتوولتائیک با استفاده از استاندارد Fides Guide محاسبه شده‌است.
  ۴. جهت محاسبه نرخ خرابی اطلاعات آب و هوایی سالانه شهر اصفهان در نظر گرفته شده‌است.
  ۵. ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم با در نظر گرفتن کلیه اجزای سیستم PV شامل پنل‌های فتوولتائیک، مبدل DC به DC، اینورتر و بخش کنترلی انجام شده‌است.
  ۶. از مبدل DC به DC و اینورتر سه فاز (در هم تنیده) استفاده شده است.
  ۷. ساختار ارائه شده برای نیروگاه فتوولتائیک ۲۰ کیلووات واقع در شهر اصفهان، مورد مطالعه قرار گرفته‌است.
- این مقاله شامل ۷ قسمت است. در بخش ۲ به معرفی سیستم فتوولتائیک و بررسی اجزای آن پرداخته شده‌است. در بخش ۳ پس از تحلیل اطلاعات آب و هوایی، چگونگی محاسبه نرخ خرابی عناصر با استفاده از استاندارد Fides Guide توضیح داده شده‌است. در بخش ۴ الگوریتم ارائه شده برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم فتوولتائیک به روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو معرفی و چگونگی تحلیل عملکرد زیرسیستم‌ها و سیستم فتوولتائیک توضیح داده شده‌است. در بخش ۵ نتایج شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای نیروگاه فتوولتائیک ۲۰ کیلو وات دانشگاه اصفهان بیان شده و در بخش ۶ آنالیز حساسیت انجام شده‌است. نتیجه‌گیری نیز در بخش ۷ بیان شده‌است.

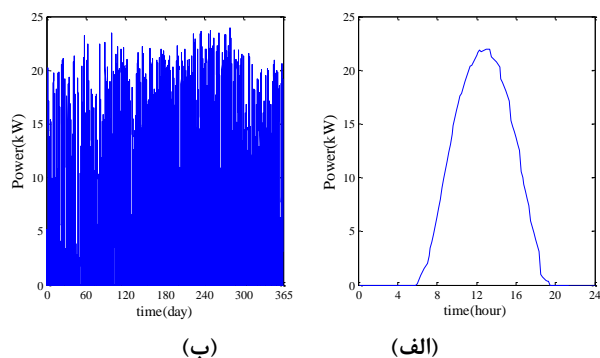
## ۲- معرفی سیستم فتوولتائیک مورد مطالعه و اجزای آن

سیستم فتوولتائیک مورد مطالعه، شامل مجموعه پنل فتوولتائیک، مبدل DC به DC، اینورتر و بخش‌های کنترلی برای کنترل اینورتر و



شکل ۱: ساختار سیستم فتوولتائیک ۲۰ کیلووات

است که  $\gamma = -0.45\%/^{\circ}\text{C}$  و  $T_o = 25^{\circ}\text{C}$ ،  $E_o = 1000\text{W}/\text{m}^2$ ،  $P_{max} = 185\text{W}$  است. توان تولیدی این پنل در شکل (۳) رسم شده است.



شکل ۳: نمودار توان (kW)، الف) روزانه و ب) سالیانه

نرخ خرابی عناصر سیستم فتوولتائیک به شدت وابسته به توان ورودی است [۱۰]. جهت افزایش دقت در محاسبه نرخ خرابی عناصر، توان تولیدی مجموعه پنل فتوولتائیک را به ۱۰ بازه که با نام وضعیت<sup>۱</sup> معرفی می‌شود، تقسیم کرده و دما و رطوبت در هر یک از وضعیت‌ها استخراج شده است (جدول ۱). نکته قابل ذکر این است که مقادیر این جدول به صورت روزانه محاسبه و در ۳۶۵ روز میانگین‌گیری شده است. وضعیت سکون<sup>۱۱</sup>، حالتی است که سیستم توانی تولید نمی‌کند که آن هم در زمان شب می‌باشد. پارامتر دیگری که در استاندارد Fides Guide نیاز است، چرخه<sup>۱۲</sup> می‌باشد. این پارامتر نشان می‌دهد که هر وضعیت چند بار از بیشینه دما گذر کرده است. مثلاً در روزهایی که توان سیستم ۱۰٪-۲۰٪ توان نامی است، در هر روز دو بار به بیشینه دمای ۱۹/۵۴ درجه سانتیگراد رسیده است. بنابراین تعداد چرخه  $2 \times 365 = 730$  شده است.

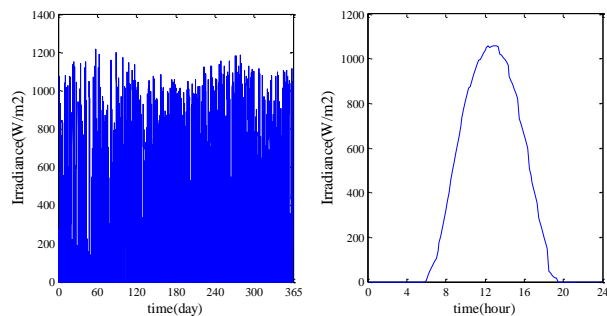
با توجه به راندمان سیستم براساس کاتالوگ شرکت SMA در توان‌های مورد نظر، توان تلفاتی مجموعه مبدل و اینورتر را محاسبه کرده و با استفاده از نسبت تلفات عناصر نیمه‌هادی (IGBT ۲/۲، ماسفت ۱/۸، دیود ۱) تلفات هر یک از اجزاء قابل محاسبه است. با استفاده از توان تلفاتی و مقاومت حرارتی کلیدها، دمای پیوند کلیدها طبق رابطه (۲) محاسبه می‌شود [۱۱].

$$T_j = T_a + R_{ha} P_{total} + R_{jh} P_{switch} \quad (2)$$

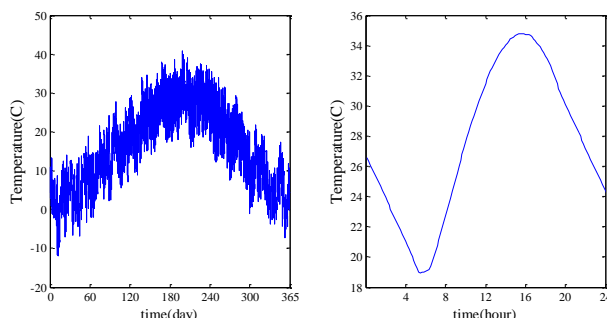
که در آن  $T_j$  دمای پیوند،  $T_a$  دمای محیط،  $P_{switch}$  توان تلفاتی کلید،  $P_{total}$  توان تلفاتی کل تراشه و  $R_{ha}$  و  $R_{jh}$  مقاومت‌های حرارتی خنک‌کننده-محیط<sup>۱۲</sup> و مقاومت حرارتی پیوند-خنک‌کننده<sup>۱۴</sup> کلید هستند. مقادیر دمای پیوند کلیدها در جدول (۲) آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش توان دمای پیوند نیز افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که به عنوان مثال اختلاف دما در حالت سکون و توان کامل IGBT حدود ۶۰ درجه سانتیگراد است.

### ۳- محاسبه نرخ خرابی عناصر

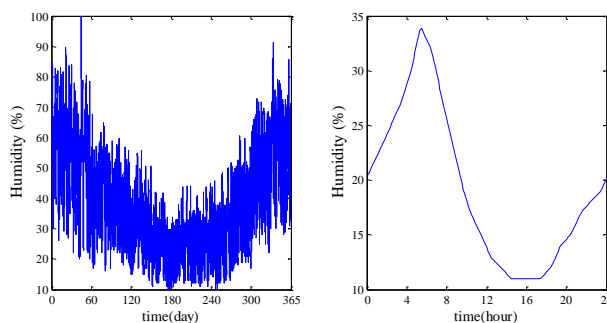
برای تخمین نرخ خرابی، از اطلاعات آب و هوای شهر اصفهان استفاده شده است. این اطلاعات توسط حسگرهای دما، تابش و رطوبت که در محل سیستم نصب شده‌اند، استخراج شده و شامل شدت تابش، دما و رطوبت محیط است. این اطلاعات هر ۱۰ دقیقه یکبار ثبت شده است. نمودار این داده‌ها برای بازه یک ساله در شکل (۲) مشاهده می‌شود.



الف)



ب)



ج)

شکل ۲: نمودار مشخصات آب و هوایی سالیانه و روزانه اصفهان. الف) شدت تابش ( $\text{W}/\text{m}^2$ )، ب) دما ( $^{\circ}\text{C}$ )، ج) رطوبت (%)

با توجه به داده‌های آب و هوایی در دسترس و با استفاده از رابطه (۱) توان تولید شده توسط ۱۰۸ پنل محاسبه می‌شود [۱۰].

$$P = \frac{E_e}{E_o} P_{max} [1 + \gamma(T - T_o)] \quad (1)$$

که در آن  $P$  توان تولیدی پنل،  $E_e$  شدت تابش خورشید،  $\gamma$  ضریب دمایی،  $T$  دمای محیط است و  $E_o$ ،  $P_{max}$  و  $T_o$  به ترتیب توان ماکزیمم، شدت توان و دما تحت شرایط استاندارد است. پنل مورد مطالعه STP185S

جدول ۱: توان سیستم فتوولتائیک در وضعیت‌های مختلف

وضعیت	مدت زمان وضعیت (ساعت)	متوسط دما (°C)	بیشینه دما (°C)	طول چرخه (ساعت)	چرخه	اختلاف بیشینه و کمینه دما (°C)	متوسط رطوبت (درصد)
سکون	۴۵۳۶	۱۴/۲۰	۱۹/۰۲	۶/۲۱	۷۳۰	۹/۰۱	۴۰/۳۲
۱۰٪	۶۱۷	۱۵/۲۹	۱۹/۰۲	۰/۸۵	۷۳۰	۸/۲۲	۳۹/۶۹
۲۰٪	۴۴۴	۱۶/۰۶	۱۹/۵۴	۰/۶۰	۷۳۰	۷/۸۷	۳۷/۸۳
۳۰٪	۳۷۰	۱۶/۰۸	۱۹/۲۵	۰/۵۲	۷۱۴	۶/۶۷	۳۷/۷۴
۴۰٪	۳۷۵	۱۷/۵۷	۲۰/۹۹	۰/۵۴	۶۹۶	۷/۳۳	۳۴/۰۸
۵۰٪	۳۷۱	۱۸/۵۷	۲۱/۵۷	۰/۵۵	۶۸۰	۶/۷۹	۳۱/۵۷
۶۰٪	۳۲۶	۱۸/۸۹	۲۱/۸۴	۰/۴۹	۶۷۰	۵/۹۳	۳۰/۸۸
۷۰٪	۳۷۵	۲۰/۲۱	۲۲/۸۰	۰/۶۰	۶۲۴	۵/۸۳	۲۸/۴۳
۸۰٪	۳۵۲	۲۰/۷۶	۲۳/۲۴	۰/۵۹	۵۸۸	۵/۲۲	۲۶/۷۲
۹۰٪	۳۵۹	۲۱/۷۵	۲۳/۸۶	۰/۷۰	۵۱۲	۴/۶۴	۲۴/۸۶
۱۰۰٪	۶۳۵	۲۳/۳۳	۲۴/۸۸	۱/۵۲	۴۱۶	۳/۸۶	۲۲/۵۴

جدول ۲: دمای پیوند کلیدهای نیمه‌هادی

وضعیت	دمای پیوند IGBT	دمای پیوند دیود	دمای پیوند ماسفت
سکون	۱۴/۲۰	۱۴/۲۰	۱۴/۲۰
۱۰٪	۱۸/۳۳	۱۶/۶۸۵	۱۷/۵۸۶
۲۰٪	۲۳/۲۷	۱۹/۳۶۹	۲۱/۵۰۹
۳۰٪	۲۷/۵۰	۲۱/۳۲۱۱	۲۴/۷۱۲
۴۰٪	۳۳/۴۷	۲۴/۸۶۶۲	۲۹/۵۸۶
۵۰٪	۳۹/۴۷	۲۸/۱۵۹۵	۳۴/۳۶۹
۶۰٪	۴۴/۱۶	۳۰/۴۸۴۶	۳۷/۹۸۸
۷۰٪	۵۰/۷۵	۳۴/۲۲۶۴	۴۳/۲۹۷
۸۰٪	۵۶/۷۹	۳۷/۲۹۰۹	۴۷/۹۹۳
۹۰٪	۶۴/۳۸	۴۱/۳۱۱۹	۵۲/۹۷۴
۱۰۰٪	۷۳/۴۹	۴۶/۳۵۰۳	۶۱/۲۴۶

$$\lambda_{physical} = \sum_i^{phase} \left( \frac{t_{annual}}{8760} \right)_i \times (\lambda_{OTH} \times \pi_{Thermal} + \lambda_{OTCase} \times \pi_{TCyCase} + \lambda_{OTSolderJoint} \times \pi_{TCySolderJoint} + \lambda_{ORH} \times \pi_{RH} + \lambda_{OMech} \times \pi_{Mech}) \times \pi_{induced} \quad (4)$$

در رابطه (۴) برای محاسبه  $\lambda_{physical}$  استرس‌های فیزیکی مانند دما، رطوبت و لرزش‌های مکانیکی تاثیرگذار هستند. در این مقاله از استرس‌های مکانیکی صرف‌نظر شده‌است. به‌طور کلی ضرایب  $\lambda_0$  مربوط به ماهیت عنصر است و با استفاده از جداول موجود در استاندارد استخراج می‌شود. ضرایب  $\pi$  مربوط به شرایطی است که مدار در آن کار می‌کند و با استفاده از روابط (۵) تا (۸) محاسبه می‌شود. عبارت  $\lambda_{OTH} \times \pi_{Thermal}$  به دمای عنصر مربوط می‌شود و به دلیل بزرگی این ضریب، نرخ خرابی به شدت وابسته به دما است.  $\pi_{Thermal}$  با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$\pi_{Thermal} = \pi_{EI} \times e^{11604 \times 0.7 \times \frac{1}{293} \frac{1}{T_j \text{ Component} + 273}} \quad (5)$$

که در آن  $T_{j\_component}$  دمای پیوند کلید است و  $\pi_{EI}$  برای کلید ۱ و برای دیود وابسته به ولتاژ است. عبارت  $\lambda_{OTCase} \times \pi_{TCyCase}$  به شکل عنصر مربوط می‌شود و  $\lambda_{OTSolderJoint} \times \pi_{TCySolderJoint}$  مربوط به لحیم کاری است که به تغییرات دمایی مدار چایی و همچنین شکل عنصر وابسته است. عبارات  $\lambda_{ORH} \times \pi_{RH}$  ضریب مربوط به رطوبت است. روابط (۶) تا (۸) جهت محاسبه عبارات فوق استفاده شده‌است.

$$\pi_{TCySolderJoint} = \left( \frac{12 \times N_{annual}}{t_{annual}} \right) \times \left( \frac{\min(\theta_{Cy}, 2)}{2} \right)^{\frac{1}{3}} \times \left( \frac{\Delta T_{Cycling}}{20} \right)^{1.9} \times e^{1414} \times \left[ \frac{1}{313} - \frac{1}{T_{max\_Cycling} + 273} \right] \quad (6)$$

### نرخ خرابی کلیدهای نیمه‌هادی

پس از تقسیم‌بندی توان، دما و رطوبت و محاسبه دمای پیوند کلیدها، می‌توان با استفاده از روابط موجود در استاندارد Fides Guide نرخ خرابی را محاسبه کرد. فرمول پایه در محاسبه نرخ خرابی کلیه عناصر طبق رابطه (۳) می‌باشد [۷].

$$\lambda = \lambda_{physical} \times \pi_{PM} \times \pi_{Process} \quad (3)$$

که در آن  $\lambda$  نرخ خرابی عنصر است. ضریب  $\pi_{PM}$  (قسمت ساخت) نشان دهنده کیفیت و کنترل فنی بر ساخت سیستم است و روش ارزیابی متناسب با ماهیت سیستم متفاوت است. مقدار پیش فرض ۱/۷ برای اجزای فعال و ۱/۶ برای دیگر قطعات پیشنهاد شده‌است [۷]. ضریب  $\pi_{Process}$  نشان‌دهنده کیفیت و کنترل فنی بر توسعه، تولید و استفاده در طول عمر محصول است و مقدار پیش فرض ۴ برای آن پیشنهاد شده است [۷].  $\lambda_{physical}$  کلید طبق رابطه (۴) به دست می‌آید.

خازن‌های الکترولیتی، سرامیکی و تانتالیوم است، ضرایب قابل محاسبه می‌باشد.

$$\lambda_{physical} = \lambda_{0Capacitor} \times \sum_i^{phase} \left( \frac{t_{annual}}{8760} \right)_i \times (\pi_{Thermo\_electrical} + \pi_{TCy} + \pi_{Mechanical})_i \times (\pi_{induced})_i \quad (10)$$

که در آن  $\lambda_{0Capacitor}$  ضریبی است بر اساس نوع خازن تعیین می‌شود، مثلاً برای خازن الکترولیتی با دی‌الکتریک جامد، این ضریب برابر ۰/۴ است. ضرایب  $\pi$  در روابط (۱۱) و (۱۲) آمده‌است.

$$\pi_{Thermal} = \gamma_{TH\_EI} \times \left( \frac{I}{S_{refrence}} - \frac{V_{applied}}{V_{rated}} \right)^3 \times e^{11604} \times E_a \times \left[ \frac{1}{293} - \frac{1}{T_{board\_ambient} + 273} \right] \quad (11)$$

$$\pi_{TCyCase} = \left( \frac{12 \times N_{annual}}{t_{annual}} \right) \times \left( \frac{\min(\theta_{Cy}, 2)}{2} \right)^{\frac{1}{3}} \times \left( \frac{\Delta T_{Cycling}}{20} \right)^{1.9} \times e^{1414} \times \frac{1}{313} \times \frac{1}{T_{max\_Cycling} + 273} \quad (12)$$

ضرایب  $\gamma_{TH\_EI}$ ،  $S_{refrence}$  و  $E_a$  برای انواع خازن‌ها در استاندارد بیان شده‌است. ضرایب مؤثر در نرخ خرابی خازن الکترولیتی پوست، خازن الکترولیتی کنترل‌کننده و خازن سرامیکی کنترل‌کننده در جدول (۴) آمده‌است. پس از استخراج ضرایب فوق، با استفاده از روابط (۳) و (۱۰)، مقادیر نرخ خرابی محاسبه می‌شود.

### ۳-۳- نرخ خرابی کنترل‌کننده

در سیستم فتولتائیک مورد بررسی یک کنترل‌کننده برای اینورتر و یک کنترل‌کننده برای مبدل وجود دارد که مدار آن برای هر یک شامل تعدادی تراشه و خازن است. روابط نرخ خرابی تراشه در استاندارد Fides Guide همان روابط (۳) و (۴) است. ضرایب  $\lambda$  طبق رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود.

$$\lambda_{0\_Stress} = e^{-a} \times N_p^b \quad (13)$$

روابط لازم جهت محاسبه ضرایب  $\pi$  تراشه همانند روابط (۵) تا (۸) است. این ضرایب در جدول (۵) آمده‌است.

$$\pi_{TCyCase} = \left( \frac{12 \times N_{annual}}{t_{annual}} \right) \times \left( \frac{\Delta T_{Cycling}}{20} \right)^4 \times e^{1414} \times \frac{1}{313} \times \frac{1}{T_{max\_Cycling} + 273} \quad (7)$$

$$\pi_{RH} = \left( \frac{RH_{ambient}}{70} \right)^{4.4} \times e^{11604} \times \left[ \frac{1}{293} - \frac{1}{T_{board\_ambient} + 273} \right] \quad (8)$$

که در آن،  $t_{annual}$  مدت زمان هر وضعیت در واحد ساعت،  $RH_{ambient}$  رطوبت،  $T_{board\_ambient}$  متوسط دمای محیط،  $T_{i\_component}$  متوسط دمای پیوند،  $\Delta T_{Cycling}$  متوسط اختلاف دمای چرخه‌ها،  $T_{max\_cycling}$  متوسط بیشینه دمای چرخه‌ها،  $N_{annual}$  تعداد چرخه‌ها و  $\theta_{cy}$  مدت زمان چرخه‌ها در هر یک از وضعیت‌های جدول (۱) است.  $\pi_{induced}$  که از رابطه‌ی (۹) محاسبه می‌شود، از مقدار ۱ (در بهترین شرایط) تا ۱۰۰ را در بر می‌گیرد.

$$\pi_{induced\_i} = (\pi_{Placement} \times \pi_{Application} \times \pi_{ruggedising})^{0.51 \ln(C_{sensitivity})} \quad (9)$$

که در آن  $\pi_{Placement}$  نشان‌دهنده اثر قرار دادن هر بخش در سیستم،  $\pi_{Application}$  نشان دهنده تأثیر شرایط محیطی استفاده از محصول و  $\pi_{ruggedising}$  نشان‌دهنده سیاست‌گذاری‌های مرتبط با توسعه محصول است. در صورتی که  $\pi_{ruggedising}$  محاسبه نشود، می‌توان مقدار ۱/۷ را برای آن قرار داد.  $C_{sensitivity}$  نشان‌دهنده ضریب حساسیت استرس‌های ذاتی نسبت به تکنولوژی بخش مورد نظر است و در عناصر نیمه‌هادی ۵/۲۰ است [۱۷]. برای هر یک از عناصر استفاده شده در سیستم فتولتائیک لازم است ضرایب موجود در روابط (۵) تا (۸) محاسبه شود. ضرایب مؤثر در نرخ خرابی نیمه‌هادی‌ها در جدول (۳) آمده‌است. پس از استخراج ضرایب بیان شده و میانگین‌گیری وزن‌دار، نرخ خرابی کلید نیمه‌هادی با استفاده از روابط (۳) و (۴) قابل محاسبه خواهد بود.

## نرخ خرابی خازن

نرخ خرابی خازن نیز با از استاندارد Fides Guide قابل محاسبه است. رابطه اصلی نرخ خرابی خازن مانند رابطه (۳) می‌باشد.  $\lambda_{physical}$  برای خازن طبق رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود. متناسب با نوع خازن که شامل

جدول ۳: ضرایب نرخ خرابی کلیدهای نیمه‌هادی

وضعیت	$\pi_{Thermal} IGBT$	$\pi_{Thermal} Mosfet$	$\pi_{Thermal} Diode$	$\pi_{TCy} Case$	$\pi_{TCy} Solder Joints$	$\pi_{RH}$
سکون	۰	۰	۰	۰/۰۵۷۶	۰/۳۰۷۱	۰/۰۵۳۶
۱۰٪	۰/۸۵۲	۰/۷۹۴	۰/۷۴۶۹	۰/۲۹۲۷	۱/۴۲۱۸	۰/۰۵۷۸
۲۰٪	۱/۳۵۷	۱/۱۵۳	۰/۹۹۹۳	۰/۳۴۴۵	۱/۶۴۳۲	۰/۰۵۲۵
۳۰٪	۱/۹۹۷	۱/۵۵۰	۱/۲۴۲۱	۰/۲۰۷۷	۱/۳۲۹۷	۰/۰۵۲۲
۴۰٪	۳/۳۸۰	۲/۴۰۷	۱/۷۸۳۰	۰/۲۹۹۵	۱/۵۹۳۵	۰/۰۴۱۷
۵۰٪	۵/۶۲۷	۳/۶۵۵	۲/۴۹۰۰	۰/۲۲۰۶	۱/۳۸۱۵	۰/۰۳۴۷
۶۰٪	۸/۲۶۰	۴/۹۷۰	۳/۱۵۵۹	۰/۰۷۶۷	۱/۱۵۹۸	۰/۰۳۳۱
۷۰٪	۱۳/۹۲۲	۷/۷۰۶	۴/۵۲۳۹	۰/۱۱۱۱	۰/۹۸۹۳	۰/۰۲۷۹
۸۰٪	۲۲/۰۳۶	۱۱/۲۱۹	۶/۰۸۲۷	۰/۰۷۲۴	۰/۸۱۱۲	۰/۰۲۳۳
۹۰٪	۳۸/۳۵۹	۱۷/۸۲۳	۸/۸۴۴۰	۰/۰۳۸۸	۰/۵۸۸۰	۰/۰۱۹۷
۱۰۰٪	۷۲/۲۳۸	۳۶/۶۰۰	۱۳/۸۵۶	۰/۰۰۸۷	۰/۲۰۸۰	۰/۰۱۶۰

جدول ۴: ضرایب نرخ خرابی خازن الکترولیتی و سرامیکی

وضعیت	$\pi_{Thermal}$ خازن سرامیکی کنترل کننده	$\pi_{TCy}$ سرامیکی	$\pi_{Thermal}$ خازن الکترولیتی کنترل کننده	$\pi_{Thermal}$ خازن الکترولیتی بوست	$\pi_{TCy}$ الکترولیتی
سکون	۰	۰/۰۸۶۰	۰	۰	۰/۰۴۳۰
۱۰٪	۰/۵۴۰۴	۰/۳۹۸۱	۰/۶۵۶۲	۵/۲۴۹۸	۰/۱۹۹۱
۲۰٪	۰/۵۶۴۱	۰/۴۶۰۱	۰/۶۸۵۰	۵/۴۷۹۸	۰/۲۳۰۰
۳۰٪	۰/۵۶۴۷	۰/۳۷۲۳	۰/۶۸۵۷	۵/۴۸۶۰	۰/۱۸۶۲
۴۰٪	۰/۶۱۳۳	۰/۴۴۶۲	۰/۷۴۴۷	۵/۹۵۷۴	۰/۲۲۳۱
۵۰٪	۰/۶۴۷۵	۰/۳۸۶۸	۰/۷۸۶۲	۶/۲۹۰۰	۰/۱۹۳۴
۶۰٪	۰/۶۵۹۱	۰/۳۲۴۷	۰/۸۰۰۴	۶/۴۰۲۹	۰/۱۶۲۴
۷۰٪	۰/۷۰۸۰	۰/۲۷۷۰	۰/۸۵۹۷	۶/۸۷۷۶	۰/۱۳۸۵
۸۰٪	۰/۷۲۹۱	۰/۲۲۷۱	۰/۸۸۵۳	۷/۰۸۲۵	۰/۱۱۳۶
۹۰٪	۰/۷۶۸۹	۰/۱۶۴۶	۰/۹۳۳۷	۷/۴۶۹۶	۰/۰۸۲۳
۱۰۰٪	۰/۸۳۶۵	۰/۰۵۸۲	۱/۰۱۵۸	۸/۱۲۶۳	۰/۰۲۹۱

جدول ۵: ضرایب نرخ خرابی تراشه‌های کنترل کننده

وضعیت	$\pi_{Thermal}$ HCPL3120	$\pi_{Thermal}$ UC3525	$\pi_{Thermal}$ 78XX	$\pi_{Thermal}$ ICL7667	$\pi_{TCy}$ Case	$\pi_{TCy}$ Solder Joints	$\pi_{RH}$
سکون	۳/۶۰۲۸	۶/۴۹۳۳	۱۸/۱۳۵۹	۴/۶۵۲۶	۰/۰۵۷۶	۰/۳۰۷۱	۰/۰۵۳۶
۱۰٪	۳/۹۵۵۳	۷/۰۹۹۶	۱۹/۶۹۲۰	۵/۰۹۸۷	۰/۲۹۲۷	۱/۴۲۱۸	۰/۰۵۷۸
۲۰٪	۴/۲۲۳۷	۷/۵۵۹۴	۲۰/۸۶۵۷	۵/۴۳۷۸	۰/۳۴۴۵	۱/۶۴۳۲	۰/۰۵۲۵
۳۰٪	۴/۲۳۱۰	۷/۵۷۱۹	۲۰/۸۹۷۵	۵/۴۴۷۰	۰/۲۰۷۷	۱/۳۲۹۷	۰/۰۵۲۲
۴۰٪	۴/۸۰۰۲	۸/۵۴۳۴	۲۳/۳۵۹۸	۶/۱۶۵۰	۰/۲۹۹۵	۱/۵۹۳۵	۰/۰۴۱۷
۵۰٪	۵/۲۱۶۹	۹/۲۵۱۴	۲۵/۱۴۱۱	۶/۶۸۹۵	۰/۲۲۰۶	۱/۳۸۱۵	۰/۰۳۴۷
۶۰٪	۵/۳۶۱۱	۹/۴۹۵۹	۲۵/۷۵۴۰	۶/۸۷۰۹	۰/۰۷۶۷	۱/۱۵۹۸	۰/۰۳۳۱
۷۰٪	۵/۹۸۲۵	۱۰/۵۴۶۳	۲۸/۳۷۳۵	۷/۶۵۱۴	۰/۱۱۱۱	۰/۹۸۹۳	۰/۰۲۷۹
۸۰٪	۶/۲۵۸۱	۱۱/۰۱۰۶	۲۹/۵۲۵۳	۷/۹۹۷۰	۰/۰۷۲۴	۰/۸۱۱۲	۰/۰۲۳۳
۹۰٪	۶/۷۹۰۴	۱۱/۹۰۵۲	۳۱/۷۳۴۵	۸/۶۶۳۹	۰/۰۳۸۸	۰/۵۸۸۰	۰/۰۱۹۷
۱۰۰٪	۷/۷۲۸۲	۱۳/۴۷۴۳	۳۵/۵۸۰۹	۹/۸۲۶۶	۰/۰۰۸۷	۰/۲۰۸۰	۰/۰۱۶۰

۴-۳- نرخ خرابی فیوز

نرخ خرابی فیوز در استاندارد Fides Guide طبق روابط (۳) و (۱۴) محاسبه می‌شود. ضرایب مورد نیاز جهت محاسبه نرخ خرابی فیوز در جدول (۶) ارائه شده‌است.

$$\lambda_{physical} = \lambda_{0\_Fuse} \times \sum_i^{phase} \left( \frac{t_{annual}}{8760} \right)_i \times (\pi_{Thermo\_electrical} + \pi_{TCy} + \pi_{Mech} + \pi_{Chi}) \times (\pi_{induced})_i \quad (14)$$

ضرایب  $\pi$  رابطه فوق، طبق روابط (۱۵) تا (۱۸) محاسبه می‌شود.

$$\pi_{Thermo\_electrical} = 0.13 \times \left( \frac{1}{0.8} - \frac{I_{applied}}{I_{rated}} \right)^{1.5} \times e^{11604 \times 0.15 \times \left[ \frac{1}{293} - \frac{1}{T_{board\_ambient} + 273} \right]} \quad (15)$$

$$\pi_{TCyCase} = \left( \frac{12 \times N_{annual}}{t_{annual}} \right) \times \left( \frac{\min(\theta_{Cy}, 2)}{2} \right)^{\frac{1}{3}} \times \left( \frac{\Delta T_{Cycling}}{20} \right)^{1.9} \times e^{1414 \times \frac{1}{313} - \frac{1}{T_{max\_Cycling} + 273}} \quad (16)$$

$$\pi_{RH} = 0.24 \times \left( \frac{RH_{ambient}}{70} \right)^{4.4} \times e^{11604 \times \frac{1}{293} - \frac{1}{T_{board\_ambient} + 273}} \quad (17)$$

$$\pi_{CHI} = 0.06 \times \pi_{sal} \times \pi_{Envir} \times \pi_{App} \times \pi_{Prot} \quad (18)$$

در رابطه (۱۵)  $I_{rated}$  و  $I_{applied}$  به ترتیب جریان فیوز و جریان قابل تحمل فیوز هستند. دیگر پارامترها در بخش‌های قبل توضیح داده شده‌است. در رابطه (۱۸) آلودگی‌های نمکین<sup>۱۵</sup>، محیطی<sup>۱۶</sup>، تجهیزات<sup>۱۷</sup> و حفاظت محصولات<sup>۱۸</sup> بررسی شده‌است. در نهایت نرخ خرابی فیوز پس از محاسبات برابر با ۰/۰۴۲ خواهد بود.

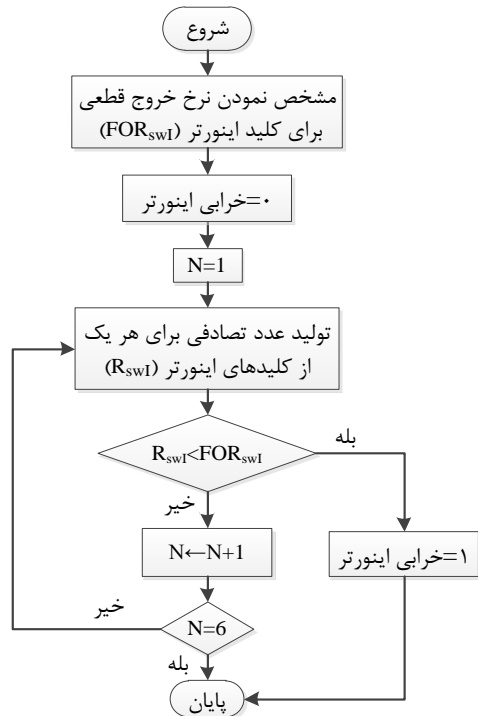
جدول ۶: ضرایب نرخ خرابی فیوز

وضعیت	$\pi_{Thermo-electrical}$	$\pi_{TCy}$	$\pi_{RH}$
سکون	۰/۱۶۱۲	۰/۱۵۶۶	۰/۰۵۳۶
۱۰٪	۰/۱۷۳۵	۰/۷۲۵۱	۰/۰۵۷۸
۲۰٪	۰/۱۸۸۸	۰/۸۳۸۰	۰/۰۵۲۵
۳۰٪	۰/۲۰۲۰	۰/۶۷۸۱	۰/۰۵۲۲
۴۰٪	۰/۲۲۲۹	۰/۸۱۲۷	۰/۰۴۱۷
۵۰٪	۰/۲۴۴۸	۰/۷۰۴۶	۰/۰۳۴۷
۶۰٪	۰/۲۶۲۵	۰/۵۹۱۵	۰/۰۳۳۱
۷۰٪	۰/۲۸۹۵	۰/۵۰۴۵	۰/۰۲۷۹
۸۰٪	۰/۳۱۵۱	۰/۴۱۳۷	۰/۰۲۳۳
۹۰٪	۰/۳۴۹۵	۰/۳۹۹۹	۰/۰۱۹۷
۱۰۰٪	۰/۳۹۴۲	۰/۱۰۶۱	۰/۰۱۶۰

نرخ تعمیر نیز با توجه به متوسط زمان لازم جهت تعمیر مشخص می‌شود. نتایج در جدول ۷ مشاهده می‌شود. پس از تعیین نرخ خرابی عناصر سیستم، در بخش ۴ شاخص‌های قابلیت اطمینان به روش مونت کارلو ارزیابی می‌شود.

جدول ۷: نرخ خرابی، زمان تعمیر و نرخ تعمیر عناصر سیستم

اجزاء کلی	اجزاء جزئی	$\mu$ (repair/year)	r (day)	$\lambda_p$ (fail/year)
مجموعه پنل فتوولتائیک	پنل	۷/۶۰	۴۸	۰/۰۰۱۸
	فیوز	۳۶/۵	۱۰	۰/۰۰۴۲
مبدل DC به DC	کلید (ماسفت)	۱۸/۲۵	۲۰	$۲/۳۴۱۶ \times ۱۰^{-۳}$
	دیود	۱۸/۲۵	۲۰	$۸/۵۳۴۷ \times ۱۰^{-۳}$
	خازن	۳۶/۵	۱۰	۰/۰۰۱۳
اینورتر	کلید (IGBT)	۱۸/۲۵	۲۰	۰/۰۰۵۰۱
کنترل کننده	کنترل کننده اینورتر	۱۲/۷	۳۰	۰/۰۲۴۲
	کنترل کننده مبدل	۱۲/۷	۳۰	۰/۰۱۶۲



شکل ۴ الگوریتم تعیین عملکرد اینورتر

در هر بار تکرار الگوریتم لازم است، الگوریتم‌های شکل (۴) اجرا شود و مقادیر خرابی اینورتر، خرابی کنترل کننده، تعداد خرابی پنل، تعداد خرابی خازن مبدل و تعداد خرابی کلید مبدل مشخص شود. با بررسی مقادیر بیان شده، عملکرد مدار در تکرار N ام مشخص می‌شود. بدین صورت که، اگر اینورتر یا مدار کنترلی خراب باشند و یا با خرابی هر سه خازن مبدل، مبدل DC به DC از کار بیفتد و یا با خرابی بیش از ۱ کلید مبدل یا بیش از ۱۸ پنل، توان کمتر از ۵۰٪ تولید شود، سیستم در حالت از کار افتاده قرار دارد. در غیر این صورت و اگر یک کلید مبدل خراب باشد یا خرابی پنل بین ۳ تا ۱۸ باشد، توان ۵۰٪-۹۰٪ تولید شده و سیستم در حالت نیمه ظرفیت قرار دارد. در صورتی که هیچ یک از شرایط بیان شده اتفاق نیفتد سیستم در حالت تولید کامل است. مراحل فوق به تعداد تکرار الگوریتم اجرا می‌شود و در نهایت با تقسیم تعداد هر یک از حالات از کار افتاده، نیمه ظرفیت و تولید کامل بر تعداد کل حالات، احتمال عملکرد سه حالت به دست می‌آید.

#### ۵- ارزیابی احتمال کارکرد سیستم مورد مطالعه در حالت‌های تولید کامل، نیمه ظرفیت و خراب به روش مونت کارلو

ساختار سیستم فتوولتائیک ۲۰ کیلو وات شکل (۱)، با مقادیر نرخ خرابی جدول (۷) مورد بررسی قرار گرفته است. براساس الگوریتم‌های پیشنهادی در شکل‌های (۴) و (۵)، احتمال کارکرد در حالت‌های از کار افتاده، نیمه ظرفیت و تولید کامل، با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو در برنامه MATLAB و با ۱۰۰۰۰۰ بار تکرار محاسبه و در جدول (۸) آمده است. عدد تکرار الگوریتم بر اساس دقت مورد نظر تعیین می‌شود. در این مقاله دقت ۰/۰۱٪ مدنظر بوده است. در تکرار نزدیک به ۱۰۰۰۰۰، میانگین

#### ۴- الگوریتم پیشنهادی در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم

با استفاده از الگوریتم‌های پیشنهادی ارائه شده در شکل‌های (۴) و (۵)، احتمال کارکرد سیستم در حالت‌های تولید کامل، نیمه ظرفیت و از کار افتاده به روش شبیه سازی مونت کارلو محاسبه می‌شود. جهت ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم فتوولتائیک، سیستم به زیرسیستم‌های اینورتر، مدار کنترلی، مبدل DC به DC و مجموعه پنل تقسیم می‌شود. سپس عملکرد آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. بر این اساس، ابتدا نرخ خروج اجباری (FOR<sup>۱</sup>) برای کلیه اجزاء طبق رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود [۲۶].

$$FOR = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (19)$$

که در آن  $\lambda$  نرخ خرابی و  $\mu$  نرخ تعمیر است. سپس برای هر یک از اجزاء، عدد تصادفی بین صفر و یک و با توزیع یکنواخت تولید می‌شود. پس از مقایسه عدد تصادفی با FOR مرتبط، کارکرد سیستم مشخص می‌شود.

در شکل (۴)، خرابی اینورتر بررسی شده است. FOR کلید اینورتر و عدد تصادفی برای هر یک از شش کلید اینورتر مشخص شده است. از دیدگاه قابلیت اطمینان، کلیدها در اینورتر با هم سری هستند. بنابراین در صورتی که هر یک از اعداد تصادفی متناظر با کلید اینورتر از FOR کوچکتر باشد، اینورتر خراب است و مقدار متغیر خرابی اینورتر برابر یک می‌شود؛ در غیر این صورت صفر باقی می‌ماند. عملکرد کنترل کننده نیز با الگوریتم مشابه با اینورتر بررسی شده است. به دلیل اجزای موازی در مجموعه پنل و مبدل DC به DC، خرابی آنها بر اساس تعداد خرابی‌ها مشخص می‌شود.

پس از بررسی زیرسیستم‌ها، با استفاده از الگوریتم پیشنهادی در شکل (۵)، بررسی احتمال کارکرد سیستم فتوولتائیک انجام می‌شود. با توجه به میزان دقت مورد نظر، تعداد تکرار الگوریتم مشخص می‌شود.



اجزاء مبدل DC به DC و مجموعه پنل کم است. به همین دلیل احتمال حالت نیمه ظرفیت که ناشی از خرابی پنل یا یک کلید از مبدل DC به DC است، بسیار کم می‌باشد.

### ۶- آنالیز حساسیت

با استفاده از آنالیز حساسیت، که به بررسی تأثیر نرخ خرابی بر احتمال تولید کامل، نیمه ظرفیت و از کار افتاده بودن سیستم می‌پردازد، می‌توان دریافت که کدام یک از عناصر بیشترین تأثیر را بر احتمال کارکرد سیستم دارد. نتایج نشان خواهد داد جهت بهبود عملکرد سیستم، لازم است کدام یک از عناصر سیستم بهبود یابد. احتمال تولید کامل، نیمه ظرفیت و از کار افتادگی سیستم بر حسب نرخ خرابی هر یک از عناصر که از ۰/۴ تا ۲ برابر مقدار واقعی تغییر کرده است در شکل (۶) رسم شده است.

همان‌طور که انتظار می‌رفت، با افزایش نرخ خرابی هر یک از اجزاء احتمال تولید کامل کاهش و احتمال از کار افتادگی و نیمه ظرفیت افزایش می‌یابد. در این نتایج مشاهده می‌شود که، کلید اینورتر بیشترین تأثیر را بر احتمال کارکرد سیستم دارد. افزایش نرخ خرابی کلید اینورتر باعث می‌شود که احتمال تولید کامل سیستم ۲/۱۲٪ کاهش یابد. مدار کنترلی نیز بعد از کلید اینورتر، بر عملکرد سیستم مؤثر است. مجموعه پنل که ساختار آن به صورت ۳۶ شاخه موازی است، با ۰/۳٪ تغییر، کمترین تأثیر را بر قابلیت اطمینان سیستم می‌گذارد. نتایج به دست آمده بر تحلیل تئوری نیز منطبق است. بنابراین جهت بهبود عملکرد سیستم لازم است احتمال خرابی اینورتر و مدار کنترلی را کاهش داد. همچنین استفاده از اینورترهای متعدد برای افزایش بازده و قابلیت اطمینان مطلوب می‌باشد.

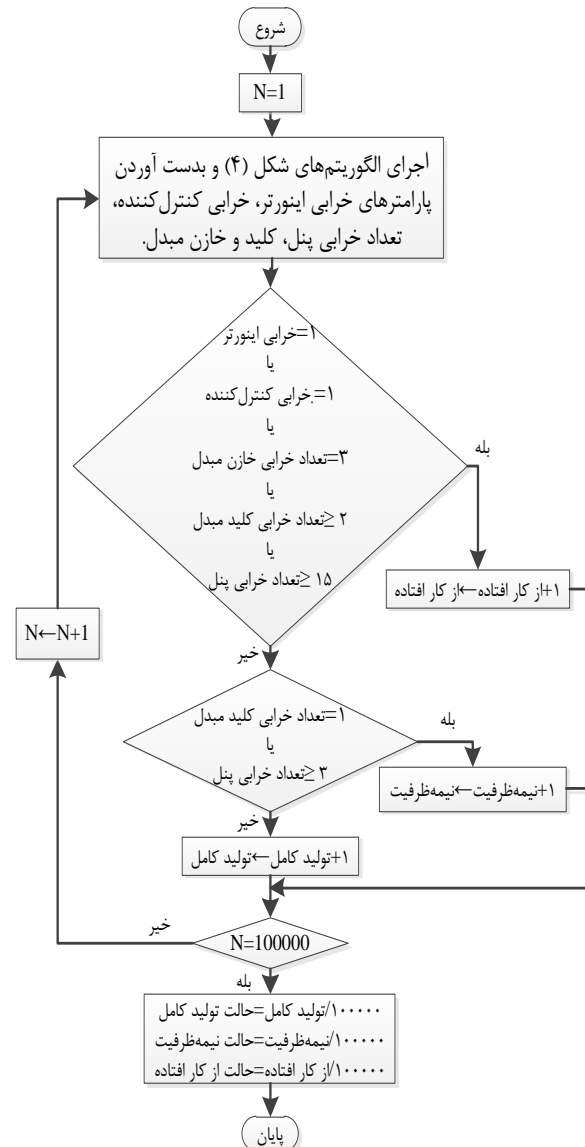
### ۷- آنالیز اقتصادی

جهت آنالیز اقتصادی لازم است ابتدا انرژی از دست رفته سیستم ناشی از خرابی سیستم و تغییرات تابش خورشید محاسبه شود. انرژی تولیدی سیستم در حالت سالم بودن سیستم و با در نظر گرفتن تغییرات تابش خورشید ۴۲/۱۲ مگاوات ساعت می‌باشد. در صورتی که سیستم را در حالت واقعی در نظر گرفته و تغییرات تابش را نیز لحاظ کرد، انرژی تولیدی سیستم به ۳۹/۳۷ مگاوات ساعت کاهش یافته است.

$$\begin{aligned} & \text{(میانگین بازه توانی سالم} \times \text{احتمال سالم بودن)} = \text{انرژی تولیدی} \\ & \text{(میانگین بازه توانی نیمه ظرفیت} \times \text{احتمال نیمه ظرفیت)} + \\ & \text{(میانگین بازه توانی از کار افتادگی} \times \text{احتمال از کار افتادگی)} + \\ & = \text{انرژی تولیدی با در نظر گرفتن تغییرات تابش} \times \\ & ۳۹/۳۷ \text{ MWh} \times (۰/۲۰۵ \times ۰/۲۵) + (۰/۰۱۷ \times ۰/۷) + (۰/۰۹۵ \times ۰/۹۷۷) \end{aligned}$$

بنابراین سیستم فتوولتائیک مورد مطالعه، سالانه ۲/۷۵ مگاوات ساعت انرژی از دست رفته دارد که با در نظر گرفتن قیمت انرژی خورشیدی در ایران بر اساس نرخ خرید تضمینی برق، سالانه یازده میلیون ریال هزینه خرابی به سیستم اعمال می‌شود.

محاسبه شده دارای انحراف معیار کمتر از ۰/۰۱٪ بود، در نتیجه از همین تعداد تکرار می‌توان استفاده نمود.



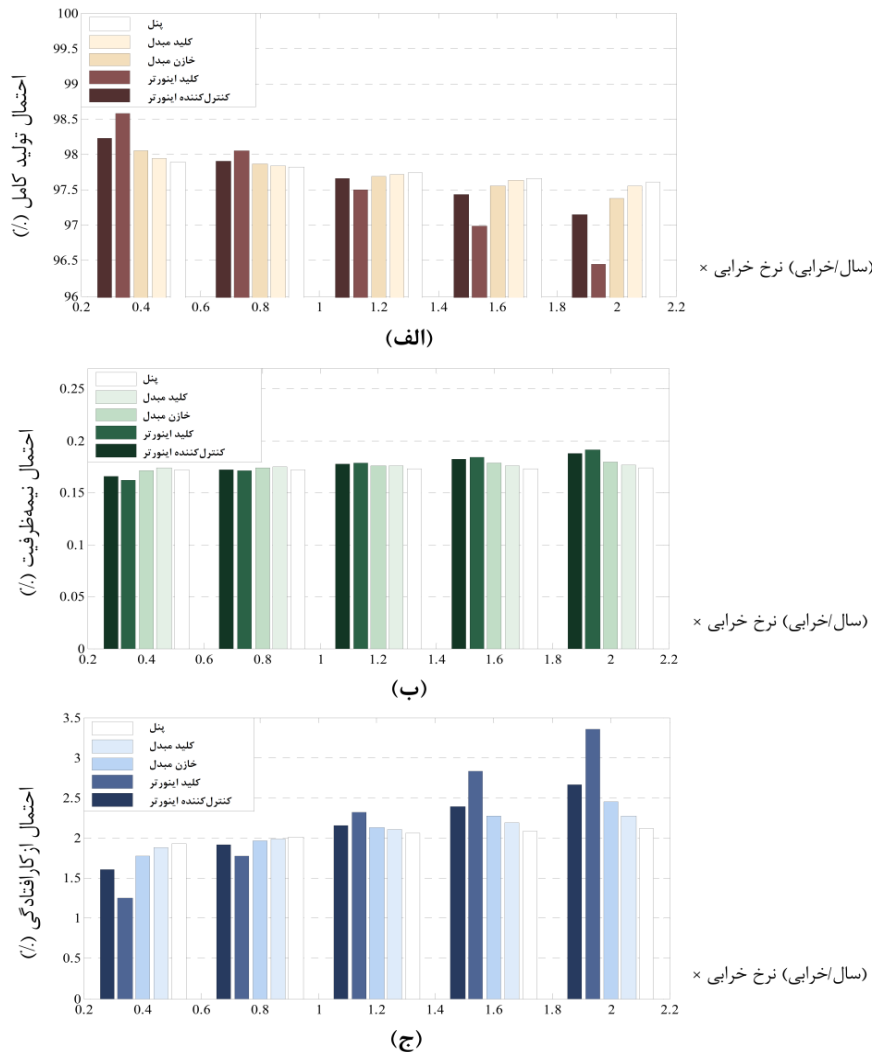
شکل ۵ الگوریتم پیشنهادی در تعیین احتمال عملکرد سیستم فتوولتائیک بر اساس شبیه سازی مونت کارلو

جدول ۸ احتمال کارکرد سیستم در سه حالت تولید کامل،

#### نیمه ظرفیت و از کار افتاده

وضعیت کارکرد سیستم	تولید کامل	نیمه ظرفیت	از کار افتاده
	(%۹۰- %۱۰۰)	(%۵۰- %۹۰)	(%۰- %۵۰)
احتمال کارکرد	۹۷//۰۷۷۰۲	۰//۰۱۷۲۷	۲//۰۰۵۷۱

با توجه به استفاده از تجهیزات با نرخ خرابی پایین در سیستم فتوولتائیک و استفاده شاخه‌های موازی در مبدل (مبدل درهم‌تنیده) و پنل، احتمال کارکرد تولید کامل سیستم زیاد و نزدیک به ۹۸٪ است. احتمال از کار افتادگی، بیشتر ناشی از خرابی اینورتر و بخش کنترلی است و حدود ۲٪ می‌باشد. بر خلاف اینورتر و بخش کنترلی، احتمال خرابی



شکل ۶ احتمال الف) تولید کامل، ب) نیمه ظرفیت ج) خراب بودن سیستم بر حسب نرخ خرابی عناصر

فتولتائیک پرداخته شد. نتایج شبیه سازی نشان داد که مقدار به دست آمده برای احتمال سالم بودن سیستم فتولتائیک مورد مطالعه برابر ۹۷/۷۷٪ است. آنالیز حساسیت نیز انجام شده و مشخص شده است که اینورتر بیشترین تأثیر را بر قابلیت اطمینان سیستم دارد.

### مراجع

- [1] Report on: "Key renewable trends", International Energy Agency (IEA), 2016.
- [2] Q. Zhou, C. Xun, Q. Dan, and S. Liu, "Grid-Connected PV inverter reliability considerations: A review", 16th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), pp. 266-274, 2015.
- [3] A. Ristow, M. Begovi, A. Pregelj, and A. Rohatgi, "Development of a methodology for improving photovoltaic inverter reliability", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 55, no. 7, pp. 2581-2592, 2008.
- [4] MIL-HDBK-217F, Military handbook-reliability prediction of electronic equipment, Department of defense, Washington DC, USA, 1995.
- [5] J. W. Hans, "Revision of MIL-HDBK-217, Reliability prediction of electronic equipment", Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 2010 Proceedings - Annual. 2010.
- [6] IEC, Reliability data handbook-Universal model for reliability prediction of electronics components, PCBs and equipment. 2004.

### ۸- نتیجه گیری

ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌ها یک امر مهم در صنعت می‌باشد و اطلاعات مفیدی را در مورد سطح کیفی تجهیزات، تعمیر و نگهداری و سرمایه گذاری ارائه می‌دهد. اصلی ترین پارامترها جهت محاسبه قابلیت اطمینان، نرخ خرابی و تعمیر می‌باشد. در این مقاله مقادیر نرخ خرابی با در نظر گرفتن شرایط محیطی شهر اصفهان و با استفاده از استاندارد Fides Guide استخراج شد. نرخ تعمیر نیز بر اساس زمان تعمیر تجهیزات مشخص شد. کلید اینورتر با ۰/۵۰۱ / خرابی در سال و پنل با ۰/۰۱۸ / خرابی در سال بیشترین و کمترین نرخ خرابی را دارا هستند.

در این مقاله، روش جدیدی در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های فتولتائیک پیشنهاد شده است. الگوریتم پیشنهادی چگونگی محاسبه احتمال کارکرد در سه حالت تولید کامل، نیمه ظرفیت و ازکارافتاده به روش شبیه سازی مونت کارلو را بیان کرده است. در این روش، ابتدا خرابی زیر سیستم‌های اینورتر، کنترل کننده، مجموعه پنل فتولتائیک و مبدل DC به DC بررسی شده و پس از آن به ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم

- [17] F. HamzehAghdam, M. Abapour, "Reliability and cost analysis of multistage boost converters connected to PV panels", IEEE journal of photovoltaics, vol. 6, no. 4, pp. 981-989, 2016.
- [18] S. V. Dhople, A. Davoudi, A. D. Dominguez-Garcia, and P. L. Chapman, "A unified approach to reliability assessment of multiphase DC-DC converters in photovoltaic energy conversion systems", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 2, pp. 739-751, 2012.
- [19] M. Theristis and I. A. Papazoglou, "Markovian reliability analysis of standalone photovoltaic systems incorporating repairs" IEEE journal of photovoltaics, vol. 4, no. 1, pp. 414-422, 2013.
- [20] J. Dong, F. Gao, X. Guan, Q. Zhai, and J. Wu, "Storage-Reserve sizing with qualified reliability for connected high renewable penetration micro-Grid", Transactions on Sustainable Energy, vol. 7, no. 2, pp. 732-743, 2016.
- [21] M. Piri, M. Niroomand, and R. Hooshmand, "A comprehensive reliability assessment of residential photovoltaic systems", journal of renewable and sustainable energy, vol. 7, no. 5, pp. 1-19, 2015.
- [22] P. S. Shenoy, K. A. Kim, B. B. Johnson and P. T. Krein, "Differential power processing for increased energy production and reliability of photovoltaic systems", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 6, pp. 2968 - 2979, 2013.
- [23] H. Farzin, M. Fotuhi-Firuzabad and M. Moeini-Aghtaie, "Reliability studies of modern distribution systems integrated with renewable generation and parking lots", Transactions on Sustainable Energy, vol. 8, no. 1, pp. 431-440, 2017.
- [24] P. D. Reigosa, H. Wang, Y. Yang, and F. Blaabjerg, "Prediction of bond wire fatigue of IGBTs in a PV inverter under a long-term operation", IEEE Transactions on Power Electronics, vo. 31, no. 10, pp. 7171-7182, 2016.
- [25] ا. فرجی، م. تورانداز کناری، م. سپاسیان، م. ستایش نظر، "ارزیابی احتمالاتی ولتاژ شبکه‌های توزیع فعال با در نظر گرفتن همبستگی بین واحدهای فتوولتائیک"، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، آماده انتشار، ۱۳۹۶.
- [7] FIDES Guide 2009 Edition: A Reliability Methodology for Electronic Systems. (Sep. 2010) [Online]. Available: www.fides-reliability.org.
- [8] H. Valipour, M. FotuhiFirouzabad, G. Rezazadeh, and MR. Zolghadri, "Reliability comparison of two industrial AC/DC converters with resonant and non-resonant topologies", 6<sup>th</sup> International Power Electronics Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC2015), pp. 430-435, 2015.
- [9] M. Held and K. Fritz, "Comparison and evaluation of newest failure rate prediction models: FIDES and RIAC 217 Plus", Microelectronics Reliability, vol. 49, pp. 967-971, 2009.
- [10] S. E.DeLeon-Aldaco, H. Calleja, and J. A. Alquicira, "Reliability and mission profiles of photovoltaic systems: A FIDES approach", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 5, pp. 2578-2586, 2015.
- [11] K. Xie, Z. Jiang, and W. Li, "Effect of wind speed on wind turbine power converter reliability", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 27, no. 1, pp. 96-104, 2012.
- [12] Y. Wang, P. Zhang, W. Li, "Reliability evaluation of grid-connected photovoltaic power systems", IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 3, no. 3, pp. 379-389, 2012.
- [13] R. Hu, J. Mi, T. Hu, M. Fu, P. Yang, "Reliability research for PV system using BDD-based fault tree analysis", IEEE International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE), pp. 359-363, 2013.
- [14] G. Zini, C. Mangeant, J. Merten, "Reliability of large-scale grid-connected photovoltaic systems", Renewable Energy, vol. 36, no. 9, pp. 2334-2340, 2011.
- [15] م. نیری پور، س. حسونود، ج. فلاحزاده، "برنامه‌ریزی توسعه ظرفیت با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان سیستم به منظور تبدیل شبکه توزیع موجود به ریز شبکه"، جله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۷۴، شماره ۲، تابستان ۶۹۳۱، صفحه ۷۶۱-۷۷۴.
- [16] M. Marzband, F. Azarnejadian, M. Savaghebi, and J. M. Guerrero "An Optimal Energy Management System for Islanded Microgrids Based on Multiperiod Artificial Bee Colony Combined With Markov Chain", IEEE Systems Journal, vol. 100, no. 99, pp. 1-11, 2015.

## زیر نویس‌ها

6. Partial Failure
7. Down
8. Maximum Power Point Tracking
9. Interleaved
10. Phase
11. Dormant
12. Cycle
13. Thermal Resistance of Heat Sink-Ambient
14. Thermal Resistance of Junction- Heat Sink
15. Saline pollution
16. Environmental pollution
17. Application pollution
18. Product protection
19. Force Outage Rat

1. PV Array
2. Loss of Load Probability
3. Cascade
4. Insulated-gate Bipolar Transistor
5. Full Generation