

Solar Photovoltaic Panels' Components Failure and Degradation: Review on Causes and Effects

Dorsa Razeghi Jahromi^a, Mohammad Mahdi Gordali^b, Aslan Gholami^c, Majid Zandi^d

^a Mechanical Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran; dorsa.razeghi@gmail.com

^b Mechanical and Energy Engineering Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran; mgordali12@gmail.com

^c Mechanical and Energy Engineering Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran; a_gholami@sbu.ac.ir

^d Mechanical and Energy Engineering Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran; m_zandi@sbu.ac.ir

Abstract:

The development of photovoltaic solar systems as one of the solutions for electricity supply in the form of sustainable and modern development has attracted much attention in recent years. Nevertheless, since these systems are located in open environments, they are exposed to a set of external harsh conditions and stresses during their working period. Ultraviolet radiation, fluctuating temperature, and humidity cycles, rain, snow and hail, wind, dust and sand storms, or salt deposition can severely affect the efficiency of photovoltaic power plants and the lifespan of these systems. A review of previous literature implies that solar panels have an average degradation rate of at least 0.5% per year, although this rate will be higher in warmer climates. This means that under the best conditions, on average, after 20 years, the panel can produce less than 90% of the electricity produced in the first year. Accurate prediction knowledge of the types of possible failures for these systems can lead to better management of the systems and their higher productivity. Therefore, in the present study, a content analysis method was used to review previous research in this field to categorize and explain the types of failures reported for these systems as well as the reasons for such failures and the affected components. The current study reviewed and investigated the degradation mechanisms related to weather and environment, the degradation mechanisms of ethylene vinyl acetate copolymer, and the stability relationships of the materials in silicon-based solar panels. By reviewing the related studies, the photovoltaic solar panel components failure was classified thoroughly. The effects caused by the degradation of this polymer such as color change, layering, bubble formation, and corrosion, and their relationship with polymer structure, and chemical, mechanical, optical, and electrical properties have also been studied. It has been demonstrated that various factors, including elevated temperatures, humidity, thermal cycling throughout different daily, seasonal, and annual periods, exposure to ultraviolet rays, and disruptions in the electrical behavior of solar panels—such as high voltage or high current—are primary contributors to failures in photovoltaic solar panels. These factors not only contribute to failures but also exacerbate the progression and acceleration of such failures. The findings from this comprehensive review have been disseminated to researchers and key decision-makers within the realm of photovoltaic solar systems and the electricity industry's efficiency. This serves to inform and guide advancements in solar technology and strategic decisions for enhanced electricity sector performance.

Keywords:

Solar cell, Polymer, Delamination, Chalking, Corrosion, Hot spots, Spiral effect

Date of sending the article: 2023/04/04

Acceptance date of the article: 2023/07/01

Name of responsible author: Majid Zandi

Corresponding author's address: m_zandi@sbu.ac.ir

تخریب اجزای پنل‌های خورشیدی فتوولتاییک: مروری بر علت‌ها و آثار

نوع مطالعه: پژوهشی

درسارازقی جهرمی، دانشجوی کارشناسی^۱؛ محمد مهدی گردعلی، دانشجوی کارشناسی^۲؛ اصلا ن غلامی، دکتری^۳؛ مجید زندی، دکتری^۴

۱- دانشکده مهندسی مکانیک- دانشگاه صنعتی شریف- تهران- ایران؛ dorsa.razeghi@gmail.com

۲- دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی- دانشگاه شهید بهشتی - تهران- ایران؛ mgordali12@gmail.com

۳- دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی- دانشگاه شهید بهشتی - تهران- ایران؛ a_gholami@sbu.ac.ir

۴- دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی- دانشگاه شهید بهشتی - تهران- ایران؛ m_zandi@sbu.ac.ir

چکیده: توسعه سامانه‌های خورشیدی فتوولتاییک به‌عنوان یکی از راه‌کارهای تامین برق در قالب توسعه پایدار و نوین در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. با این وجود، این سامانه‌ها در دوره کاری خود با توجه به قرارگیری در فضای باز، در معرض مجموعه‌ای از تنش‌های خارجی قرار می‌گیرند. تابش فرابنفش، چرخه‌های نوسانی دما و رطوبت، بارش باران، برف و تگرگ، وزش باد، طوفان‌های گرد و غبار و شن و یا رسوب نمک می‌توانند به‌شدت بر بهره‌وری نیروگاه‌های فتوولتاییک و طول عمر این سامانه‌ها اثر بگذارند. مرور پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که پنل‌های خورشیدی به‌طور میانگین حداقل دارای نرخ تخریبی در حدود ۰/۵ درصد در سال هستند، اگر چه این نرخ در شرایط آب و هوایی گرم‌تر بالاتر خواهد بود. این بدان معناست که در بهترین شرایط به‌صورت متوسط پس از ۲۰ سال، پنل می‌تواند کم‌تر از ۹۰ درصد برق تولید شده در سال اول را تولید کند. شناخت دقیق از انواع خرابی‌های ممکن برای این سامانه‌ها می‌تواند مدیریت بهتر سامانه‌ها و بهره‌وری بالاتر آن‌ها را به‌دنبال داشته باشد. از این رو، در مطالعه حاضر، با روش تحلیل مفهومی به مرور پژوهش‌های پیشین در این زمینه پرداخته شده است تا انواع خرابی‌های گزارش شده و دلایل این خرابی‌ها و اجزای تحت تاثیر دسته‌بندی و تشریح شود. در این مقاله مکانیسم‌های تخریب مربوط به آب و هوا و محیط، مکانیسم‌های تخریب کوپلیمر اتیلن وینیل استات، و روابط پایداری این ماده در پنل‌های خورشیدی مبتنی بر سیلیسیوم، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. آثار ناشی از تخریب این پلیمر نیز مانند تغییر رنگ، لایه‌لایه شدن، تشکیل حباب، خوردگی و رابطه آن‌ها با ساختار پلیمری، خواص شیمیایی، مکانیکی، نوری و الکتریکی آن‌ها نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل از این پژوهش برای محققان و تصمیم‌گیران حوزه سامانه‌های خورشیدی فتوولتاییک و بهره‌وری صنعت برق ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: سلول خورشیدی، پلیمر، لایه‌لایه شدن، گچ‌زدگی، خوردگی، نقاط داغ، اثر حلزونی

تاریخ ارسال مقاله : ۱۴۰۲/۰۱/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۲/۰۴/۱۰

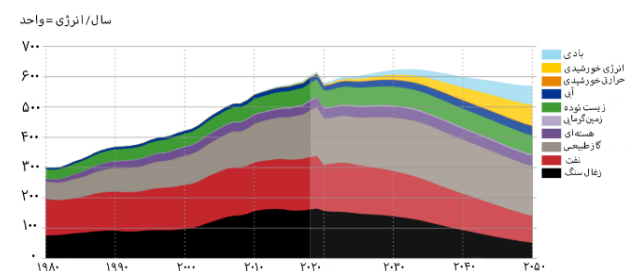
نام نویسنده‌ی مسئول : مجید زندی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران؛ m_zandi@sbu.ac.ir

۱. مقدمه

در دهه‌های گذشته، نیاز جهان به انرژی به میزان قابل توجهی افزایش یافته است و پیش‌بینی می‌شود این روند ادامه داشته باشد (Aryanfar et al., 2022; Aryanfar, Gholami, Pourgholi, & Zandi, et al., 2021a). این چشم‌انداز بیش‌تر به دلیل رشد سریع صنعت و رشد جمعیت به ویژه در کشورهای در حال توسعه می‌باشد (A. Gholami et al., 2020). که نیاز به انرژی و غذا را به‌صورت چشم‌گیری افزایش داده است (Razeghi Jahromi et al., 2023)، و امنیت غذایی و انرژی را دچار چالش کرده است (Ameri et al., 2023; Kazem, Al-Waeli, Chaichan, Sopian, Al Busaidi, et al., 2023; Minoofar et al., 2023). اگر چه در سالیان قدیم استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و بر پایه طبیعت راهکار اصلی حل چالش انرژی بوده است (Y. Gholami et al., 2018)، در حال حاضر، انرژی مورد استفاده جهان بیش‌تر از طریق سوخت‌های فسیلی نظیر ذغال سنگ، گاز و نفت تامین می‌شود که ذخایر آن‌ها پیوسته رو به کاهش است (شکل (۱)). علاوه بر این، چالش‌های شدید زیست محیطی مربوط به مصرف سوخت‌های توجه جامع جهانی را به سوی اعمال تغییراتی اساسی در منابع اولیه تولید انرژی و استفاده هر چه بیش‌تر از منابع انرژی تجدیدپذیر جلب کرده است (Aryanfar, Gholami, & Pourgholi, Zandi, et al., 2021b; Pasandideh et al., 2022). که این عامل، سرعت رشد توسعه و استفاده از آن‌ها را به شدت افزایش داده است (A. Gholami, Tajik, et al., 2019; Noorollahi, Khatibi, et al., 2021; Noorollahi, Vahidrad, et al., 2021; Oliveira et al., 2018).

در حال حاضر، تغییراتی که بر عملکرد یا ایمنی پنل‌های خورشیدی تاثیر نگذارند، به عنوان خرابی تلقی نمی‌شوند، اما در بسیاری از موارد باید مورد بررسی دقیق قرار گیرند که از آسیب‌های آتی جلوگیری شود (Makrides et al., 2010). به عنوان مثال، وجود حالت رد حلقون که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است، اگر چه چندان منجر به کاهش چشمگیر بازده پنل نمی‌گردد، نشان از ترک سلول پنل و نیازمند توجه است (Walwil et al., 2017). علاوه بر این، ترک‌هایی که در شیشه محافظ پنل خورشیدی فتوولتاییک هنگام حمل و نقل و نصب (که از اولین مراحل حساس و موثر در طول عمر پنل‌ها هستند) ایجاد می‌شوند، یکی از مهم‌ترین نقایصی است که در تست‌های اولیه و به‌طور مستقیم بر عملکرد سلول تاثیر نمی‌گذارد، اما در بلند مدت باعث افزایش یا حتی ایجاد سایر حالت‌های خرابی مانند خوردگی، لایه‌لایه شدگی



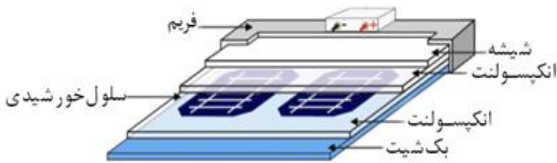
شکل (۱): سهم سبد انرژی تأمین شده جهان (Energy Transition Outlook 2021 | DNV, n.d).

انرژی خورشیدی فراوان‌ترین منبع انرژی تجدیدپذیر زمین است (Aryanfar et al., 2020; Aryanfar, Gholami, Pourgholi, & Zandi, 2021). در بین رویکردهای بهره‌وری از انرژی خورشیدی، سامانه‌های خورشیدی فتوولتاییک، با توجه به حرکت جامع جهانی به سمت برقی‌سازی، در حال حاضر یکی از سریع‌ترین فناوری‌های در حال رشد با کم‌ترین قیمت مصرف کننده هستند (Kazem, Chaichan, & Zandi, et al., 2021).

گرفت. در پایان نیز، با بررسی چالش‌های اصلی این حوزه، پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی ارائه شده است.

۲. اجزای اصلی سازنده پنل‌های فتوولتاییک

به‌طور کلی پنل‌های فتوولتاییک، سامانه‌های چند لایه با مولفه‌های مختلف هستند که با استفاده از چسب مخصوص به یکدیگر متصل شده‌اند. شکل (۲) مولفه‌های اصلی یک پنل خورشیدی فتوولتاییک رایج را نشان می‌دهد (López-Escalante et al., 2016; Schneller et al., 2016).



شکل (۲): اجزای تشکیل دهنده پنل خورشیدی.

این اجزا عبارتند از پوشش جلویی که از شیشه یا پلاستیک تشکیل شده است، سلول‌های خورشیدی که از جنس نیمه‌هادی سیلیسیوم هستند، انکپسولنت که رایج‌ترین آن کوپلیمر اتیلن‌وینیل استات^۱ است و سلول را در بر دارد، بستر پنل که از پلیمرهای فلوئوره از جمله فلوراید^۲، پلی‌وینیل فلوراید^۳ یا پلی‌تترا فلوئور اتیلن^۴ تولید می‌شود. برای مهر و موم نیز از نوار مخصوص دو طرفه که از لاستیک بوتیل^۵ و سیلیکون تولید شده است، استفاده می‌شود. قسمت پشتی پنل نیز شامل جعبه اتصال‌های الکتریکی است که به‌صورت معمول از پلی‌اتیلن ترفتالات^۶ تولید می‌شود. قاب پنل نیز از آلومینیوم یا پلاستیک تشکیل شده است.

نتایج پژوهش‌های پیشین حاکی از آن است که برای دستیابی به بهترین بهره‌وری از پنل‌های خورشیدی فتوولتاییک، مولفه‌های حساس پنل‌ها، یعنی سلول‌های خورشیدی شکننده، باید تا حد امکان از عوامل مستقیم محیطی مانند فشارهای مکانیکی، رطوبت و تابش اشعه ماوراء بنفش محافظت شوند. از این‌رو، مواد پلیمری به خاطر وزن کم، قیمت پایین و ویژگی‌های خاص و قابلیت بسیار بالا و متنوع، از ابتدا به عنوان بهترین گزینه برای تشکیل بخش قابل توجهی از ساختار پنل‌های خورشیدی در نظر گرفته شده بودند (Griffini & Turri, 2016).

با این حال، پژوهش‌های انجام شده بر روی پنل‌های خورشیدی فتوولتاییک نصب شده در اقلیم‌های مختلف نشان می‌دهد که در اکثر موارد تخریب سلولی و فلزی وابستگی کم‌تری به تغییرات شرایط آب و

می‌شود (Ndiaye et al., 2013). یکی دیگر از عواملی که منجر به تاثیر شدید بر عمل کرد پنل‌های خورشیدی می‌گردد، اثر نشست گرد و غبار بر پنل‌های خورشیدی می‌باشد که در صورت عدم توجه به این موضوع، می‌تواند منجر به خرابی‌های اساسی هم‌چون نقطه داغ و تخریب پنل نیز گردد (A. Gholami, Ameri, Zandi, & Gavagsaz-Ghoachani, 2021; Rezvani et al., 2023). از این‌رو مطالعه در این زمینه بسیار حائز اهمیت است و نظر پژوهشگران متعددی را به خود جلب کرده است (Kazem, Al-Waeli, Chaichan, Sopian, Gholami, et al., 2023).

تخریب پنل‌های نصب شده قدیمی از اواسط دهه ۱۹۸۰ در پژوهش‌هایی طولانی مدت مورد بررسی قرار گرفته شده است، که مرور گزارش‌ها و پژوهش‌های انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد که بیش‌ترین مکانیسم تخریب گزارش شده به‌ترتیب تغییر رنگ شدید، لایه‌لایه شدن و خوردگی بوده است (Badiee et al., 2016). مطابق با این پژوهش‌ها تغییراتی در مواد تشکیل دهنده و فرایندهای ساخت پنل‌های خورشیدی ایجاد شده است که چالش‌های مربوطه را کاهش دهد. از این‌رو، نتایج پژوهش‌های جدید به دست آمده در بازرسی‌های میدانی اولیه برای پنل‌های امروزی حاکی از آن است که نرخ خرابی‌های لایه‌لایه شدن و تغییر رنگ کاهش یافته است. البته برخی از مکانیسم‌های مشاهده شده اخیر مانند ترک سلول یا نقاط داغ، به‌دلیل عدم وجود فناوری لازم، در گذشته قابل شناسایی نبودند اما در پژوهش‌های امروز، با نرخ بالاتری دنبال می‌شود (Jordan & Kurtz, 2013).

با توجه به اهمیت موضوع و آثار کوتاه مدت و بلند مدتی که انواع خرابی‌های مرتبط با پنل‌های خورشیدی فتوولتاییک بر کیفیت و بهره‌وری نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتاییک و صنعت برق دارند، پژوهش حاضر، به مرور پژوهش‌های مرتبط با عوامل تخریب پنل‌های خورشیدی و آثار خرابی روی این سامانه‌ها متمرکز شده است. از سوی دیگر، با توجه به توسعه روز افزون سامانه‌های خورشیدی فتوولتاییک شناور، نوع خرابی‌ها و عوامل تاثیرگذار تشدید آن‌ها (که به دلیل شرایط محیطی متفاوت سامانه‌های فتوولتاییک شناور نسبت به سامانه‌های زمینی، متفاوت هستند) نیز بررسی می‌شود. برای این منظور در مطالعه حاضر، با مرور اهم پژوهش‌های پیشین، اجزای اصلی سازنده پنل‌های خورشیدی تشریح و سپس، انواع تخریب‌های مرتبط مورد مطالعه قرار

^۴ Polytetrafluoroethylene

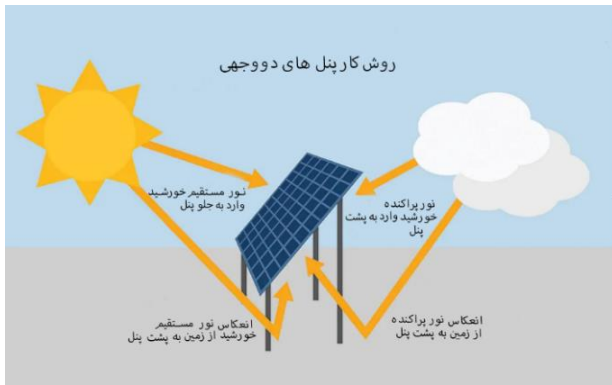
^۵ Butyl Rubber

^۶ Polyethylene terephthalate

^۱ Ethylene-vinyl acetate

^۲ Fluoride

^۳ Polyvinyl fluoride



شکل (۳): استفاده از پنل‌های خورشیدی دو وجهی برای دریافت تابش بیش‌تر در مساحت ثابت.

پنل‌های خورشیدی دو شیشه‌ای نیز ساختاری است که در آن قاب‌های آلومینیومی معمولی و بستر ورق پستی با پنل شیشه‌ای دیگری جایگزین می‌شوند. در نتیجه سلول‌های خورشیدی به طور کامل توسط شیشه احاطه شده‌اند. با این حال، چنین طراحی پنل خورشیدی به ویژه در صورت قرار گرفتن در معرض رطوبت، تغییرات دما و استرس مکانیکی در مدت زمان طولانی آسیب‌پذیر است و باعث می‌شود توان خروجی آن‌ها با نرخ بالاتری کاهش یابد (Tang et al., 2017).

با وجود ایجاد انواع مختلف فناوری‌های قابل استفاده، در حال حاضر، در حدود ۹۰ درصد بازار این حوزه مربوط به فناوری لایه‌های سیلیکونی بوده است. البته فیلم نازک تلورید کادمیوم و مسایندیوم گالیوم سلیکون نیز به ترتیب حدود ۶ درصد و ۳ درصد فناوری‌های بازار را در سال ۲۰۲۲ به خود اختصاص دادند (Oliveira et al., 2018). از این‌رو تمرکز این مطالعه بر فناوری‌های سلیکونی است. در بین عناصری که سلول‌های خورشیدی فتوولتائیک مبتنی بر نیمه‌هادی سیلیسیوم را تشکیل می‌دهند، پلیمر تیلن‌وینیل‌استات، از مزایایی مانند انتقال حرارت زیاد، مقاومت در برابر اشعه ماوراء بنفش، شفافیت بالا، جذب کم آب، چسبندگی خوب به شیشه و مقاومت نسبی در برابر آب و هوا برخوردار است (Jiang et al., 2015). اتیلن‌وینیل‌استات ترمو پلاستیکی است که بیش‌تر در معرض پدیده‌های تخریب قرار می‌گیرد (Jiang et al., 2016; Schneller et al., 2015). تخریب اتیلن‌وینیل‌استات شامل یک مکانیسم فیزیکی شیمیایی است که به دما، رطوبت و تابش ماوراء بنفش وابسته است.

۲-۲- مواد انکپسوله

انکپسولنت پنل سیلیسیوم یک ماده پلیمری است که برای چسبندگی بین سلول‌های خورشیدی و شیشه، سلول‌های خورشیدی و بستر و هر فضایی بین شیشه و بستر مورد استفاده قرار می‌گیرد. اهداف

هوایی (به‌ویژه دما و تابش) دارند، در حالی که تخریب مولفه‌های پلیمری که بخش قابل توجهی از ساختار پنل را به خود اختصاص می‌دهند، وابستگی معنادار بیش‌تری به انواع تغییرات آب‌وهوایی و اقلیمی از خود نشان می‌دهند. مطابق بررسی‌های انجام شده، وابستگی تخریب مواد پلیمری به شرایط آب و هوایی به این ترتیب است که هوای گرم و خشک بیش‌تر از گرمسیری و آب و هوای گرمسیری بیش‌تر از معتدل منجر به انواع تخریب‌های مواد پلیمری می‌شود و بر ساختار آن‌ها تأثیر می‌گذارد (Omazic et al., 2019).

خصوصیات مواد پلیمری می‌توانند بسته به ساختار مولکولی و شرایط استفاده، به طرز چشم‌گیری تغییر کنند. به‌عنوان مثال، افزایش دما، پلیمرهای نیمه بلورین را تحت تأثیر می‌گذارد و می‌تواند باعث تخریب سریع این موادماده‌ها شود (Varga & Ehrenstein, 1997). ترکیب عوامل محیطی خارجی خاص مانند شرایط آب و هوایی، تابش خورشیدی، دما و چرخه رطوبت، باد یا برف و عوامل داخلی موجود در پنل مانند مواد افزودنی، مورفولوژی و فشارهای داخلی، می‌توانند منجر به محدودیت‌هایی در استفاده از مواد یا ترکیبات آن شوند و باعث خرابی بخش‌های مختلف پنل‌های خورشیدی تا قبل از عمر مفید آن‌ها شوند (Omazic et al., 2019). لذا در بخش بعد، مرور مختصری بر مواد متعارف مورد استفاده در پنل‌های فتوولتائیک، ترکیب آن‌ها و تأثیر تخریب بر عملکرد کلی پنل‌ها ارائه خواهد شد.

۱-۲- سلول خورشیدی

اولین و اصلی‌ترین بخش یک پنل خورشیدی، سلول خورشیدی است. کارایی و عملکرد پنل‌های خورشیدی فتوولتائیک بسته به فناوری سلول و مواد سازنده سلول به‌صورت حدودی از ۱۵ درصد تا ۲۱ درصد متغیر است. در طول سالیان گذشته، فناوری‌های متعددی از سلول‌های خورشیدی در آزمایشگاه‌ها و پس از آن در بازار معرفی شده است تا بتوانند عملکرد بهتر و یا هزینه‌های پایین‌تری را داشته باشند. به‌عنوان مثال، پنل‌های دو وجهی بر خلاف پنل‌های تک‌وجهی، می‌توانند نور خورشید را از دو جهت جلو و عقب به‌طور هم‌زمان دریافت کنند. بدین‌ترتیب، در مقایسه با پنل‌های تک‌وجهی، پنل‌های دو وجهی در جهت شمال و جنوب، می‌توانند تا ۵۵ درصد و پنل‌های دو وجهی در جهت شرقی و غربی، می‌توانند تا ۳۳ درصد تابش خورشیدی بیش‌تری را دریافت کنند، که این دریافت بیش‌تر می‌تواند منجر به بازدهی بالاتر در مساحت اشغال ثابت گردد (شکل (۳)). البته با توجه به فرآیند تولید، هزینه‌های ساخت این پنل‌های خورشیدی دو وجهی می‌توانند حداقل تا ۱۰ درصد بیش‌تر از پنل‌های خورشیدی تک وجهی باشند.

در ساخت تعداد کمی از بسترها از پلی آمید یا پلی الیفین برای لایه‌های مرکزی استفاده شده است. لایه خارجی باید بسیار مطمئن و پایدار باشد، زیرا از لایه‌های دیگر محافظت فیزیکی و محیطی می‌کند و به‌طور مستقیم در معرض عوامل محیطی از جمله اشعه ماوراء بنفش قرار دارد (Omazic et al., 2019).

۲-۴ - پوشش محافظ

این پوشش محافظ که در بیش‌تر مواقع از جنس شیشه است، برای افزایش استحکام مکانیکی، از شیشه حرارت دیده بافت‌دار و یا با روکش ضد انعکاس با ضخامتی در حدود ۳/۲ میلی‌متر ساخته شده است. این شیشه پوششی دارای ضریب انتقال حرارت بالایی است (حدود ۹۰ درصد برای بیش‌تر طیف خورشیدی) و ویژگی‌های مختلفی از جمله مقاومت در برابر ضربه، مقاومت مکانیکی و عایق الکتریکی را دارد (Jiang et al., 2013; Sharma & Chandel, 2015). هم‌چنین این پوشش، نقش قابل توجهی در نشست گرد و غبار بر سطح خود و عدم نفوذ آن به سطح سلول و اختلال در مدارهای الکتریکی دارد (A. Gholami et al., 2017; A. Gholami, Saboonchi, et al., 2018). اعمال انواع نانوپوشش‌ها برای ایجاد خواص خودتمیزشوندگی و یا ضد انعکاس نیز بر سطح این پوشش محافظ صورت می‌گیرد (A. Gholami, Alemrajabi, et al., 2017; A. Gholami, Eslami, Tajik, et al., 2019).

۳ - تخریب در سامانه‌های خورشیدی فتوولتاییک

از آن‌جایی که پنل‌های خورشیدی فتوولتاییک در معرض شرایط محیطی می‌باشند، تغییر در شرایط محیطی می‌تواند به شدت در خروجی عملکردی این سامانه‌ها اثر گذارد (A. Gholami, Ameri, Zandi, & Gavagsaz Ghoachani, 2021; A. Gholami, Ameri, Zandi, & Gavagsaz Ghoachani, 2023). علاوه‌بر اثر بر خروجی پنل‌های خورشیدی فتوولتاییک، تنش‌های محیطی می‌توانند باعث تغییرات دائمی ترمومکانیکی، ساختاری و شیمیایی در پنل‌ها شوند و در نهایت منجر به تخریب و به دنبال آن کاهش بازدهی و عمر آن‌ها شوند. عوامل محیطی اصلی که منجر به بروز خرابی پنل‌های خورشیدی فتوولتاییک می‌گردد، شامل دمای بالا، رطوبت هوا، تابش اشعه فرابنفش و چرخه‌های حرارتی در طول عمر نیروگاه است (Brito-Santos et al., 2023). بررسی‌های بلند مدت انجام شده حاکی از آن است که به‌صورت عمومی، پنل‌های ۱۰ تا ۱۲ ساله، نرخ تخریب‌شان کم‌تر از ۱۰ درصد

اصلی مواد انکپسوله، ارائه پشتیبانی ساختاری، کاپلینگ نوری، جداسازی الکتریکی، جداسازی فیزیکی و محافظت و هدایت حرارتی سلول سیلیکونی و محافظت از سلول‌های خورشیدی در برابر آب و هوا از جمله رطوبت، باران، اشعه ماوراء بنفش، فشارهای مکانیکی کم مانند پیچ خوردن یا خم شدن و اثرات کم انرژی مانند تگرگ است (Czanderna & Pern, 1996). بنابراین، پنل‌های خورشیدی توسط مواد انکپسولنت (ترموپلاستیک یا سیلیکون با شفافیت نوری عالی)، پوشش‌های جلویی (شیشه با مقداری آهن، رزین‌های ترموپلاستیک یا پلاستیک با شفافیت نوری عالی و مقاومت مکانیکی) محکم چسبانده شده و محافظت می‌شوند (Jiang et al., 2015). مهم‌ترین خواص یک انکپسولنت، خواص شیمیایی، مکانیکی، نوری و الکتریکی است که در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول (۱): مهم‌ترین خواص انکپسولنت.

شیمیایی	مکانیکی	نوری	الکتریکی
جاذب رطوبت و گاز	استحکام کششی بالا	شفافیت	عایق
قابل اکسایش	قابلیت کشیدگی	قابلیت عبور نور	دارای خواص
قابل تخریب	قابلیت چسبندگی	بالا	دی‌الکتریک

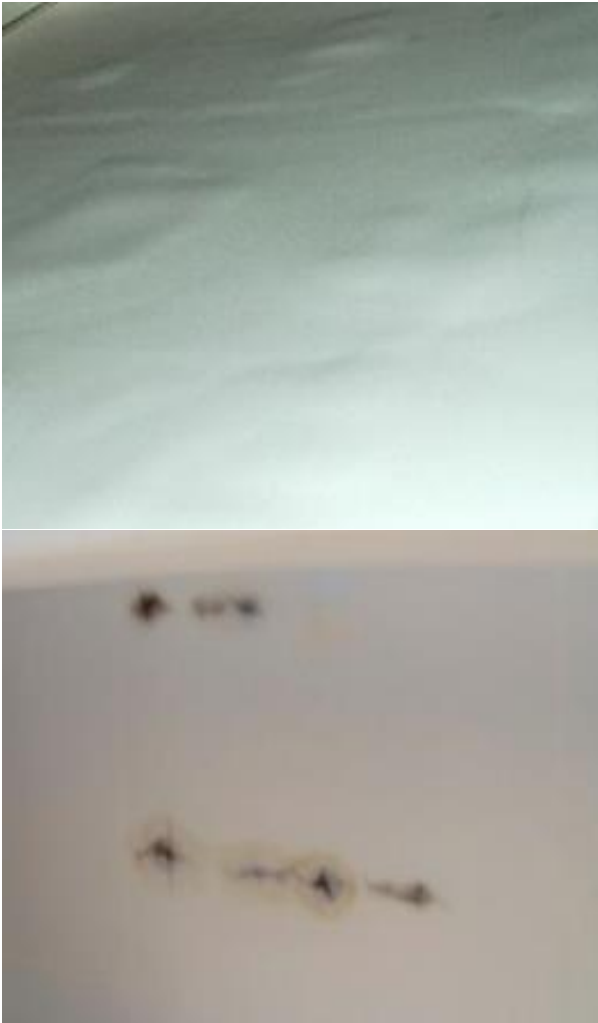
۲-۳ - بستر

بسترها^۷، فیلم‌های پلیمری یا ورق فلزی و شیشه‌ای هستند. به‌طور کلی ساختار چند لایه (به‌طور عمده سه لایه) دارند، که هر لایه عملکرد خاصی را انجام می‌دهد. این مواد به خصوصیات فیزیکی و شیمیایی پایدار و بادوامی نیاز دارند تا با تابش ماوراء بنفش یا دما تخریب نشوند. لایه‌ای که در تماس با انکپسولنت است باید چسبندگی ماندگار و سازگاری شیمیایی با انکپسولنت داشته باشد و وقتی در معرض مستقیم نور خورشید (که از طریق شیشه و لایه‌های انکپسولنت فیلتر می‌شود) قرار می‌گیرد، پایدار باشد (Oreski et al., 2021). هم‌چنین پایداری ابعادی خوبی داشته باشند، نفوذپذیری آب (یا گاز) کمی داشته باشند، کم هزینه و مقاومت خوبی داشته باشند (Hülsmann & Wallner, 2017).

از آنجا که هر یک از لایه‌های بستر در معرض مجموعه‌ای مختلف از استرس‌های موجود در فضای باز قرار دارند، عملکرد هر یک از آن‌ها بر عملکرد کل بستر و در نهایت بر کل پنل خورشیدی تأثیر می‌گذارد (Oreski et al., 2021). لایه مرکزی یا هسته به‌طور معمول ضخیم‌تر است و خواص مکانیکی و الکتریکی مورد نیاز کل کامپوزیت را فراهم می‌کند. این لایه معمولاً از پلی اتیلن ترفتالات ساخته می‌شود، در حالی که

⁷ backsheets

زمینه نشان می‌دهد که در یک محیط باز و غیر آزمایشگاهی عوامل متعدد به‌طور همزمان روی پنل‌ها تاثیر می‌گذارند (A. Gholami, Ameri, Zandi, & Gavagsaz Ghoachani, 2022; A. Gholami, Ameri, Zandi, Ghoachani, et al., 2022). از این‌رو تشخیص تنها یک عامل اصلی تخریب اغلب سخت است.



شکل (۴): (بالا) لایه‌لایه شدن و تشکیل حباب؛ (پایین) علائم سوختگی.

تجربه‌های ثبت شده میدانی نشان می‌دهند که اتلاف عملکرد پنل‌ها به خاطر مشکل‌های مربوط به انکپسولانت مانند تغییر رنگ و یا لایه‌لایه شدن محفظه و بستر اتفاق می‌افتد یا حداقل تشدید می‌شود. انواع تخریب‌های مشاهده شده در پنل‌های فوتوولتاییک، می‌توانند به دلیل اکسیداسیون، تخریب انکپسولنت و واکنش پلیمرها رخ دهد. بسیاری از این مشکل‌ها به دلیل استفاده نادرست از مواد در طی فرآیند تولید پنل اتفاق می‌افتند.

علاوه بر این، عوامل فیزیکی مانند شکستگی و ایجاد میکرو ترک‌ها می‌توانند در طول ساخت، حمل و نقل یا هنگام نصب پنل‌ها ایجاد شوند.

توان اسمی اولیه است، در حالی که برای پنل‌های ۲۰ تا ۲۵ ساله، نرخ تخریب به حدود ۲۰ درصد است (Walwil et al., 2017).

در سامانه‌های فتوولتاییک شناور، از آن‌جا که پنل‌ها همیشه تحت تاثیر رطوبت بالای محیطی هستند، نرخ تخریب بالاتری در تخریب‌های خوردگی و مرتبط به رطوبت مشاهده می‌شود. البته وجود تنش حرارتی کم‌تر در این سامانه‌ها خود منجر به کاهش نرخ تخریب‌های مرتبط با تنش‌های حرارتی می‌گردد (Goswami & Sadhu, 2021). سایر پدیده‌های آب و هوایی نیز علاوه بر اثر مستقیم بر خروجی پنل‌های فتوولتاییک می‌تواند منجر به تغییر در نرخ تخریب پنل‌های فتوولتاییک شود.

به‌طور مثال، بارش برف و یا وزش باد، بارهای مکانیکی متفاوتی را در پنل‌های فتوولتاییک ایجاد می‌کنند و یا هنگامی که تگرگ به سطح یک پنل فتوولتاییک برخورد می‌کند، می‌تواند بسته به اندازه و سرعت دانه‌های تگرگ، به مواد پوشاننده یا قسمت‌های فعال پنل آسیب برساند. وزش بادهای شدید، می‌تواند منجر به حمل شن، ماسه و سایر گونه‌های خاکی به همراه باد شود و در برخورد با سطح پنل‌های خورشیدی باعث سایش پنل‌های فتوولتاییک و آسیب به آن‌ها شود (Czanderna & Pern, 1996; Wang et al., 2013).

بررسی پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که شرایط آب و هوایی، از جمله اصلی‌ترین پارامترهای مربوط به انواع تخریب‌ها می‌باشند. از آنجایی که اکثر منابع منتشر شده در مورد عملکرد و تخریب پنل‌ها، جزئیاتی در مورد مناطق آب و هوایی که در آن نیروگاه‌های خورشیدی نصب شده‌اند ارائه نمی‌دهند، در ارزیابی‌های انجام شده در مقاله حاضر ضمن مرور پژوهش‌های مرتبط برای حالت‌های خرابی و اثرات تخریب، تمرکز بر ۵ اقلیم اصلی خواهد بود.

مناطق آب و هوایی گرم و خشک، که در مقالات به خشک یا بیابانی شناخته می‌شوند، سخت‌ترین محیط برای پنل‌های خورشیدی می‌باشند (Omazic et al., 2019). در آب و هوای بیابانی، پنل‌ها در معرض فاکتورهای تنش‌زا و سخت مانند تابش زیاد نور خورشید و اشعه ماوراء بنفش، چرخه دما و شن و ماسه می‌باشند که موجب خرابی می‌شود. نتیجه پژوهشی در چین (Hu et al., 2016) روی بسترها نشان داد که در آب و هوای خشک، اصلی‌ترین تخریب بسترها مربوط به ترک خوردگی و لایه‌لایه شدن از سمت بیرون است که علت آن را می‌توان کاهش ضخامت دانست.

برخی بسترها از سمت بیرون تغییر رنگ می‌دهند و نقاط داغ، حباب و ترک خوردگی در آن‌ها شایع است. پژوهش‌های انجام شده در این

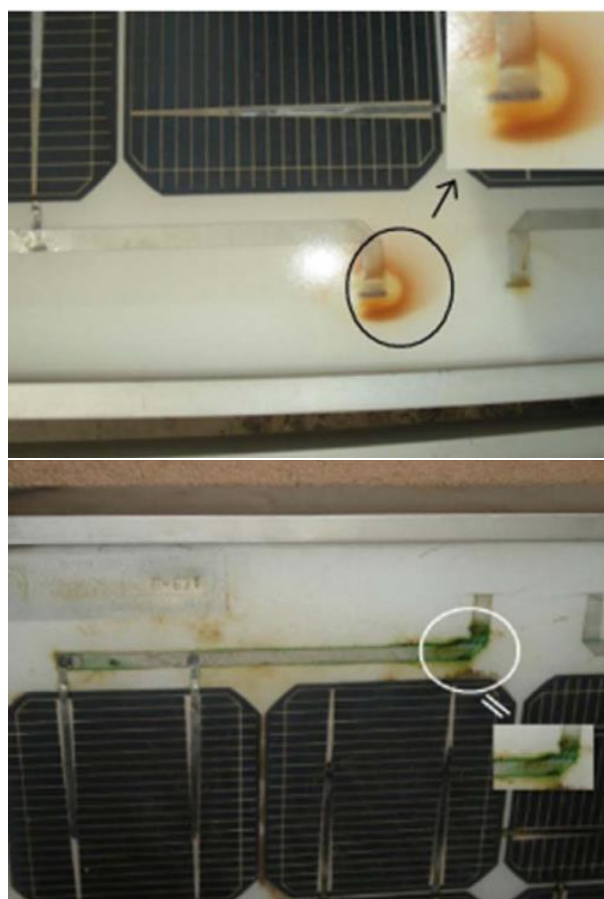


شکل (۶): اثر حلزونی روی سطح پنل های خورشیدی.

از حالت های اصلی تخریب می توان به لایه لایه شدن^۸، ترک^۹، گچ زدگی^{۱۰}، سوختگی^{۱۱}، تشکیل حباب^{۱۲} و تغییر رنگ^{۱۳} اشاره کرد (شکل (۴)) (Omazic et al., 2019). از طرف دیگر، خرابی های مربوط به انکپسولنت را می توان در سه مورد خوردگی^{۱۴}، تغییر رنگ و لایه لایه شدن خلاصه کرد (Walwil et al., 2017).

۱-۳- تغییر رنگ

تغییر رنگ یکی از قابل توجه ترین تخریب ها در پنل های فتوولتاییک زمینی و شناور است که می توان آن را از طریق چشم تشخیص داد. زرد شدن پلیمرهای موجود در پنل های فتوولتاییک خورشیدی ابتدا در دهه ۱۹۸۰ شناخته شد. در حقیقت در دهه های اول تا سال ۲۰۰۰، اصلی ترین حالت تخریب گزارش شده در پنل های خورشیدی فرسوده، تغییر رنگ پلیمرها به زردی یا قهوه ای است (شکل (۵)).



شکل (۵): تغییر شکل در پنل های خورشیدی فتوولتاییک.

¹² Formation of bubbles

¹³ Discoloration

¹⁴ Corrosion

⁸ Delamination

⁹ Cracking

¹⁰ Chalking

¹¹ Burn

در سامانه‌های فتوولتاییک شناور به دلیل محیط نصب به مراتب بیش‌تر از سامانه‌های فتوولتاییک زمینی است. شکل (۹) نمایی از خوردگی پنل در جعبه اتصالات را نشان می‌دهد. شکل (۱۰) خوردگی پنل در لبه‌ها را نشان می‌دهد و شکل (۱۱) خوردگی را در مکان اتصال سلول‌های خورشیدی به هم روی پنل را نشان می‌دهد.

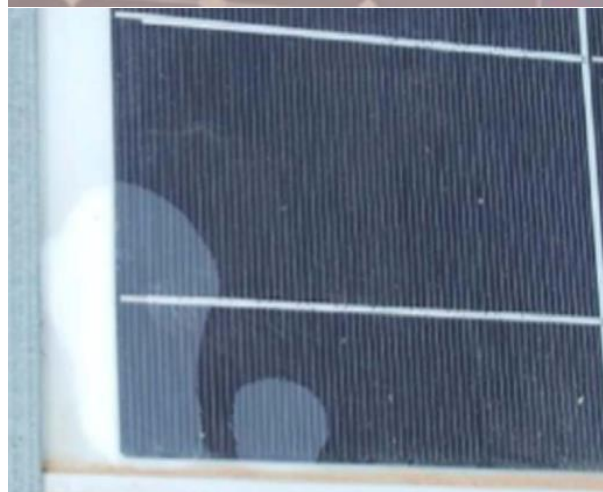
همان‌طور که پیش‌تر نیز عنوان شد، تولید اسید استیک ناشی از هیدرولیز می‌تواند منجر به لایه‌لایه شدن شود. ایجاد اسیداستیک نه تنها باعث ایجاد مشکل در چسبندگی با شیشه می‌شود بلکه باعث تسریع خوردگی سلول‌ها و اتصال‌دهنده‌ها نیز می‌شود. در نتیجه منجر به افزایش خوردگی سلول، تجزیه پیوندهای چسبندگی، کاهش انتقال نور به سلول و تولید توان کم‌تر می‌شود. در خصوص سامانه‌های خورشیدی فتوولتاییک شناور نیز، از آن‌جا که این سامانه‌ها بیش‌تر از مدل زمینی در معرض بخار آب هستند، در نتیجه می‌توان گفت بیش‌ترین نوع خرابی آن‌ها از این نوع است.

هم‌چنین در ارتباط با پنل‌های خورشیدی فتوولتاییک نصب شده در شهرهای ساحلی که در معرض غلظت بالای نمک قرار می‌گیرند، خوردگی اجزای فلزی آن‌ها و تخریب بیش‌تر پلیمرها نیز مشاهده شده است (Ferrara & Philipp, 2012). پنل‌های فتوولتاییک نصب شده در نزدیکی بزرگراه‌ها، مناطق پر ترافیک و برخی صنایع نیز همواره در معرض انواع خاصی از گازها نظیر نیتروژن‌دی‌اکسید، سولفوردی‌اکسید، اوزون و غیره قرار دارند. در چنین شرایطی نیز ممکن است متناسب با آلودگی‌های موجود در محل استقرار پنل‌ها، این آلودگی‌ها به تنهایی و یا همراه با رطوبت موجود در هوا، بارش باران، مه و یا شبنم صبحگاهی منجر به خوردگی بالاتری در پنل‌های خورشیدی فتوولتاییک شوند.



شکل (۹): خوردگی پنل‌های خورشیدی در جعبه اتصالات.

سلول‌ها، افزایش گرمای بیش از حد، کاهش عمر پنل، کاهش جذب و افزایش بازتاب نور خورشید در پنل فتوولتاییک می‌شوند (Mahdi et al., 2023).



شکل (۸): حباب در پنل فتوولتاییک.

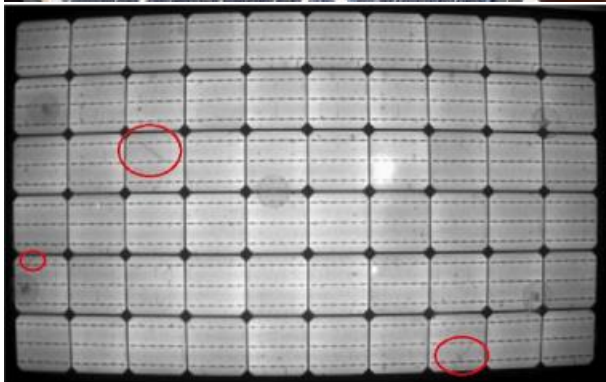
۳-۴- گچ‌زدگی

گچ‌زدگی صفحه پشتی نیز یکی از حالت‌های خرابی است که اغلب در نتیجه تخریب سطح اتصال دهنده پلیمری لایه بیرونی است که منجر به آشکار شدن رنگدانه‌ها در سطح و در نتیجه سایش آسان آن‌ها می‌شود (Omazic et al., 2019).

۳-۵- خوردگی

محیط مرطوب و دمای زیاد باعث نفوذ رطوبت به داخل پنل از طریق ورق پشتی و لبه آن می‌شود که باعث ایجاد خوردگی می‌شود. در دمای پایین محیط، به‌ویژه در طول شب، رطوبت روی پنل فتوولتاییک چگال می‌شود و سپس در طول روز، دمای بالای محیط، نفوذ رطوبت به داخل پنل از طریق ورق پشتی و لبه آن را تسریع می‌کند. این نوع از تخریب

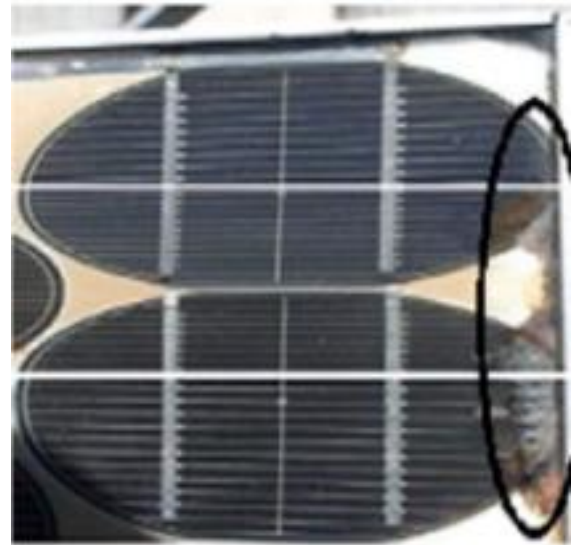
راحتی وارد آن‌ها می‌شوند روی عملکرد پنل تاثیر می‌گذارند و پنل‌ها را در معرض خطر خرابی بیش‌تر قرار می‌دهند شکل (۱۲) (Lin et al., 2016).



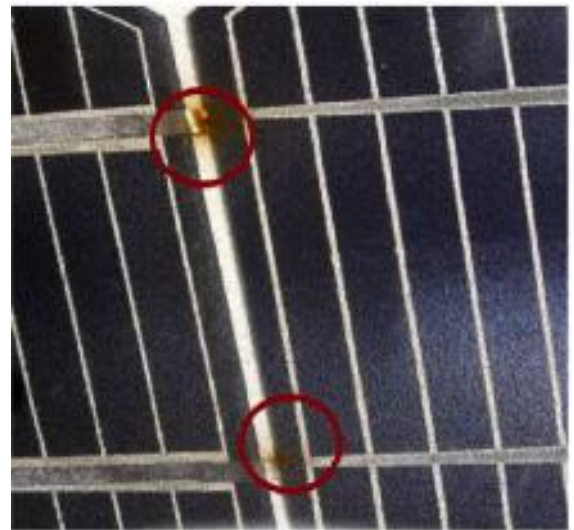
شکل (۱۲): شکستگی و ترک روی پنل‌های خورشیدی.

۳-۷- تجمع آلاینده‌ها بر سطح پنل و عدم تطابق

تجمع گرد و غبار، فضولات پرندگان و دیگر آلاینده‌ها بر سطح پنل‌های خورشیدی فتوولتائیک، به شدت بر عملکرد پنل تاثیر می‌گذارد (A. Gholami, Ameri, Zandi, Gavagsaz Ghoachani, et al., 2021; Rezvani et al., 2022). نشست چنین موادی، علاوه بر آن که مانع رسیدن تابش خورشید به سلول می‌شوند و بر جریان خروجی پنل تاثیر می‌گذارد. منجر به تغییر در دمای سلول نیز می‌شوند (A. Gholami, Ameri, Zandi, Gavagsaz Ghoachani, et al., 2022; A. Gholami, Ameri, Zandi, Gavagsaz Ghoachani, et al., 2023). در عین حال، وجود رطوبت در هوا و تغییر پارامترهای آب و هوایی می‌تواند اثر دائمی و بلند مدت این موارد را افزایش دهد. به عنوان مثال، رطوبت بالا باعث افزایش تجمع گرد و غبار در سطح پنل و نیز افزایش چسبندگی آن‌ها به سطح می‌شود. چنین مواردی علاوه بر افت‌های عنوان شده، منجر به تلفات عدم تطابق^{۱۶} و یا بروز نقاط داغ نیز می‌شود که طول عمر پنل‌ها را به شدت تحت تاثیر



شکل (۱۰): خوردگی پنل‌های خورشیدی در لبه‌های پنل.



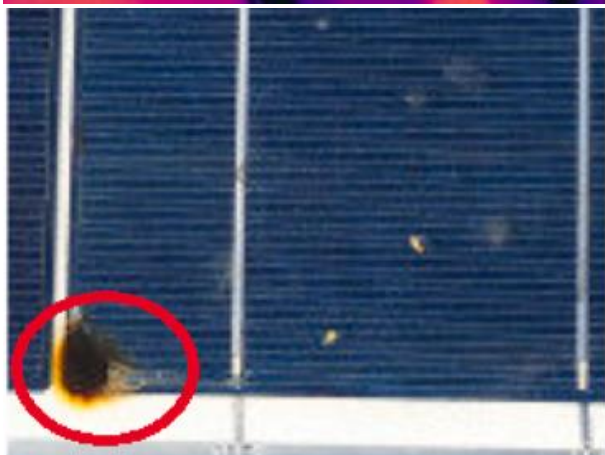
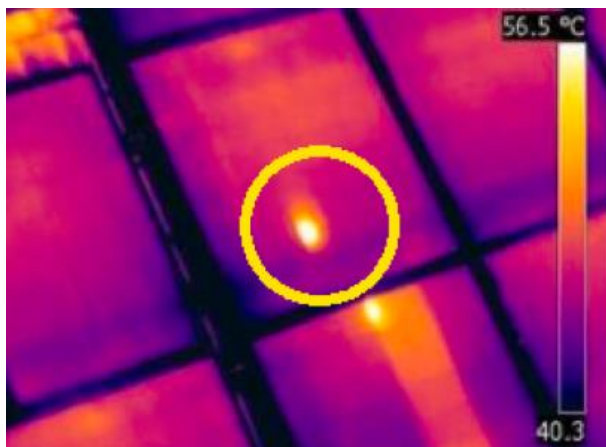
شکل (۱۱): خوردگی پنل‌های خورشیدی در نوار اتصال سلول

۳-۶- شکستگی و ترک‌های ریز

شکستگی شیشه و ترک‌های ریز موجب فشارهای حرارتی یا مکانیکی روی پنل‌های زمینی و شناور می‌شوند. این شکست‌ها در هنگام تعمیر یا تمیزکاری، انتقال، نصب و ساخت پنل‌ها ایجاد می‌شوند. هم‌چنین به علت تخریب هیدرولیز و تخریب حرارتی در لایه چسب بستر، فشارهای زیاد بر ابعاد بستر تاثیر می‌گذارند و بنابراین، ترک خوردن لایه بیرونی نیز می‌تواند رخ دهد. با توجه به نتایج پژوهش‌ها (Griffini & Turri, 2016; Oliveira et al., 2018)، این نوع ترک خوردگی به طور عمده در بسترهای غیرفلوئروپلیمری با لایه‌های بیرونی پلی‌اتیلن ترفتالات مشاهده می‌شود. این ترک‌ها از آنجایی که رطوبت به

¹⁶ Mismatch

پنل خورشیدی فتوولتاییک می‌پردازد. تعداد دیودهای بایس به دلیل جنبه های فنی و اقتصادی محدود است.



شکل (۱۳): نقاط داغ روی پنل های خورشیدی.

۴. نتیجه گیری

استفاده از پنل های خورشیدی فتوولتاییک به عنوان یکی از اصلی ترین راه کارهای بشر برای حل چالش های مربوط به انرژی و محیط زیست است. با این وجود، استقرار این پنل ها در محیط های مختلف آب و هوایی، این سامانه ها را تحت شرایط سخت محیطی و تنش های داخلی مختلف قرار می دهد که ممکن است باعث بروز تخریب هایی مختلف و در نتیجه کاهش شدید بازدهی و یا طول عمر آن ها شود. از این رو شناخت چنین تخریب هایی بر اساس نتایج ارائه شده در مطالعه ها و پژوهش های تجربی امری لازم برای استفاده بهینه از این سامانه ها و دستیابی به بالاترین سطح کیفیت و بهره وری از انرژی خورشیدی در صنعت برق است. بدیهی است که میزان تخریب بستگی به مواد مورد استفاده در پنل ها و ارتباط آن با محل نصب، شرایط محیطی و اقلیمی دارد.

قرار می دهد. فضولات پرندگان نیز یک مسئله جدی در سامانه های فتوولتاییک به ویژه در سامانه های شناور است؛ زیرا پرندگان اغلب برای آب نوشیدن به سمت منابع آبی می روند و از سامانه های موجود به عنوان محل ایستادن و استراحت نیز استفاده می کنند (Figgis et al., 2018; Liu et al., 2018).

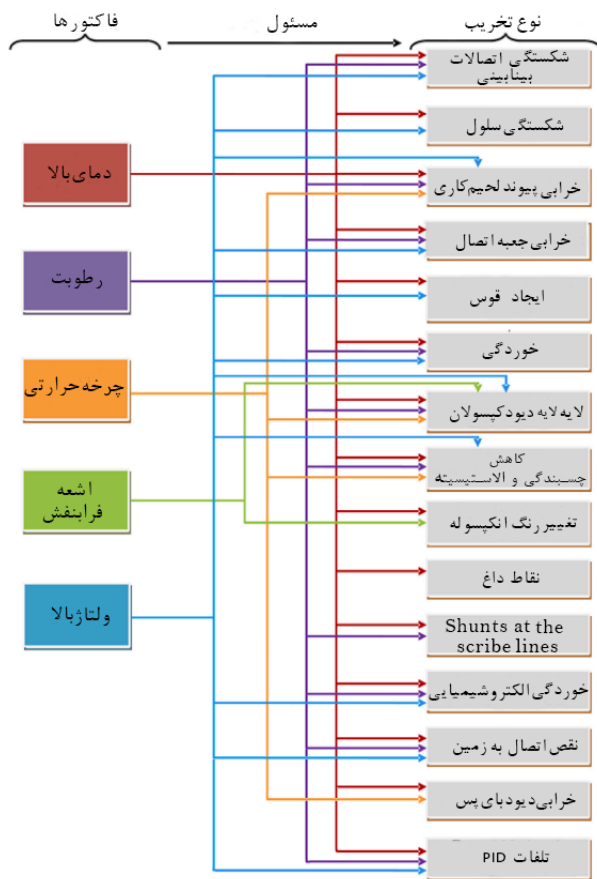
۳-۸- نقاط داغ

نقاط داغ یکی از رایج ترین عیوب مشاهده شده در پنل های زمینی و شناور هستند. بررسی پژوهش های انجام شده در این زمینه نشان می دهد که اگر یک سلول خورشیدی جریان کمتری نسبت به جریان رشته ای پنل تولید کند، ممکن است نقطه داغ شکل گیرد. این شرایط در دو حالت امکان رخ دادن دارد (Kim & Krein, 2013). حالت اول ممکن است در اثر اتصال درونی نامناسب ایجاد شود که به طور معمول بسیار نادر است و پژوهش های مرتبط با آن به صورت عمده در محیط آزمایشگاهی انجام شده است. با فرض وجود چیدمان و اتصال دقیق درون پنل خورشیدی، حالت دوم نقطه داغ، پدیده ای بسیار رایج برای سلول های خورشیدی است (Bauer et al., 2009)، که به دلیل سایه جزئی بر روی پنل، فضولات پرندگان و یا نشست و تجمع گرد و غبار و آلودگی ها رخ می دهد (Li et al., 2020). در چنین شرایطی، سلول های کامل پوشیده شده یا بخشی از سلول ها، جریان عملکردی کل را کاهش خواهند داد و به دنبال آن، سلول های سالم مجبور به عمل در شرایط ولتاژ بالاتر می شوند. این شرایط باعث می شود که سلول سایه دیده بایس معکوس شود که به دنبال آن، دمای این سلول های می تواند به دماهایی بالاتر از ۱۵۰ درجه سانتیگراد برسد که از دمای بیشینه بهره برداری پنل های تجاری فراتر است (Dhimish et al., 2017).

در خصوص این نقاط دما بالا، در صورتی که عامل به وجود آورنده فوری حذف نشود، می توانند موجب آسیب دائمی پنل ها و بروز سایر خرابی هایی که ناشی از افزایش دمای پنل است هم چون ایجاد ترک، تخریب و یا ذوب جوش ها و اتصال ها، تخریب در خواص پلیمرهای موجود و در کل کاهش خواص الکتریکی پنل فتوولتاییک (Dimitrijević, n.d.) شوند (شکل (۱۳)). برای جلوگیری از چنین خرابی هایی، مکانیسم های پیشگیری مختلفی اعمال می شود. ادغام دیودهای بایس^{۱۷} در مدارهای اتصال سلول های خورشیدی، مسیر جریان الکتریکی جایگزینی را ایجاد نموده و بار حرارتی روی سلول مورد سایه را کاهش می دهد. در شرایط نقطه داغ شدید، این مکانیزم به صورت کلی، با کنارگذاری نه تنها سلول سایه دیده بلکه بخش های دیگر از رشته سلول ها مرتبط، به محافظت از

¹⁷ Bypass Diodes

و هوایی ارائه دهند که در نتیجه به کاهش خرابی پنل‌ها کمک می‌کند. از این‌رو در پژوهش حاضر ضمن معرفی اجزای سازنده یک پنل خورشیدی، با مرور و تحلیل محتوایی پژوهش‌های پیشین، اهم خرابی‌های گزارش شده برای پنل‌های خورشیدی فتوولتائیک و دلایل بروز هر تخریب در محیط‌های مختلف از جمله برای پنل‌های خورشیدی زمینی و نیز پنل‌های خورشیدی شناور تشریح شد که خلاصه آن‌ها در جدول (۲) و شکل (۱۴) ارائه شده است. در جدول (۲) هم‌چنین به برخی از اصلی‌ترین پژوهش‌هایی که بر تخریب مورد نظر تمرکز داشته‌اند اشاره شده است.



شکل (۱۴): عوامل تخریب و اثرات آن.

بررسی پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که هر یک از تخریب‌های اشاره شده بر حسب نحوه اثرگذاری بر پنل خورشیدی فتوولتائیک، از اهمیت خاص خود برخوردار است، با این وجود رایج‌ترین تخریب گزارش شده در پژوهش‌های پیشین شکستگی و ترک پنل‌ها و تغییر رنگ مربوط به آن‌ها است (Aghaei et al., 2022). البته گرد و غبار و آثار ناشی از آن نیز به‌عنوان یکی از پرتکرارترین و با اهمیت‌ترین پارامترهای گزارش شده در مناطقی با پتانسیل بالای خورشیدی است که آثار کوتاه مدت و بلندمدت متعددی را با خود به‌همراه خواهد داشت و از این‌رو، مطالعه‌های بیش‌تر در این زمینه پیشنهاد می‌شود.

جدول (۲): خلاصه انواع تخریب.

نوع تخریب	علت	مرجع
تغییر رنگ	دمای بالا، رطوبت و اشعه ماورا بنفش	(Cristofoli, 2012; Sharma & Chandel, 2013)
لایه لایه شدن	تخریب هیدرولیز در لایه چسب و از بین رفتن چسبندگی چسب‌های لایه‌های بستر و تبلور پلیمرهای نیمه بلورین در اثر اشعه فرابنفش	(Wang et al., 2013) و (Dhere, 2005; Ferrara & Philipp, 2012; Novoa et al., 2014; Sánchez-Friera et al., 2011; Wu et al., 2014)
گج‌زدگی	تخریب سطح اتصال دهنده پلیمری لایه بیرونی نفوذ رطوبت به داخل پنل از طریق ورق پستی و لبه آن در مکان‌هایی با رطوبت زیاد؛ محل اصلی مشاهده تخریب در جعبه اتصالات، لبه پنل‌ها و نوار اتصال سلول‌ها به هم	(Omazic et al., 2019)
خوردگی	فشارهای حرارتی یا مکانیکی روی پنل‌ها در هنگام تعمیر یا تمیزکاری، انتقال، نصب و ساخت و یا در اثر تخریب هیدرولیز و تخریب حرارتی در لایه چسب بستر	(Ferrara & Philipp, 2012) و (Oliveira et al., 2018) و (Griffini & Turri, 2016) و (Lin et al., 2016)
اثر گرد و غبار و عدم تطابق	تجمع گرد و غبار، فضولات پرندگان و عدم حذف به موقع از سطح پنل‌های خورشیدی فتوولتائیک	(A. Gholami et al., 2020; A. Gholami, Ameri, Zandi, Gavagsaz Ghoachani, et al., 2022; A. Gholami, Eslami, Aryan, et al., 2019; Kazem, Al-Waeli, Chaichan, Sopian, Gholami, et al., 2023)
نقاط داغ	ایجاد بایاس معکوس در سلول‌ها به‌دلیل سایه جزئی یا آلودگی‌های غیریکنواخت بر سطح پنل	(A. Gholami et al., 2018; A. Gholami, Alemrajabi, et al., 2017; A. Gholami, Saboonchi, et al., 2017) (Bauer et al., 2009; Dhimish et al., 2017; Dimitrijević, n.d.; Kim & Krein, 2013; Li et al., 2020)

اگر قرار باشد از مواد جایگزین جدید برای ساخت پنل‌ها استفاده شود، رفتار آن‌ها در شرایط مختلف آب و هوایی باید به خوبی مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد و استفاده از آن‌ها باید از نظر کاهش توان و جنبه‌های اقتصادی مورد بررسی قرار گیرد. با این حال، قبل از چنین اقدام‌هایی لازم است مکانیسم‌های تخریب مولفه‌های پنل و فعل و انفعال‌های آن‌ها در شرایط مختلف آب و هوایی درک شود. نکات آموخته شده از پنل‌های فرسوده همراه با نتایج آزمایش‌های انجام شده در پژوهش‌های مختلف می‌توانند اطلاعاتی در مورد ترکیب مطلوب مواد برای شرایط مختلف آب

- 212–218.
<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.03.008>
- Bauer, J., Wagner, J. M., Lotnyk, A., Blumtritt, H., Lim, B., Schmidt, J., & Breitenstein, O. (2009). Hot spots in multicrystalline silicon solar cells: avalanche breakdown due to etch pits. *Physica Status Solidi (RRL) – Rapid Research Letters*, 3(2–3), 40–42. <https://doi.org/10.1002/PSSR.200802250>
- Brito-Santos, G., Gil-Hernández, B., Hernández-Rodríguez, C., González-Díaz, B., Guerrero-Lemus, R., & Sanchiz, J. (2023). Degradation analysis of highly UV-resistant down-shifting layers for silicon-based PV module applications. *Materials Science and Engineering: B*, 288, 116207. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2022.116207>
- Chaichan, M. T., Kazem, H. A., Alnaser, N. W., Gholami, A., Al-Waeli, A. H. A. A., & Alnaser, W. E. (2021). Assessment Cooling of Photovoltaic Modules Using Underground Water. *Arab Gulf Journal of Scientific Research*, 39(2), 151–169. <https://doi.org/10.51758/agjsr-02-2021-0016>
- Cristofoli, K. (2012). *Preparação e caracterização de filmes de PEBD aditivados com fotoestabilizantes para a proteção de espumantes rose*.
- Czanderna, A. W., & Pern, F. J. (1996). Encapsulation of PV modules using ethylene vinyl acetate copolymer as a pottant: A critical review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 43(2), 101–181. [https://doi.org/10.1016/0927-0248\(95\)00150-6](https://doi.org/10.1016/0927-0248(95)00150-6)
- Dhere, N. G. (2005). Reliability of PV modules and balance-of-system components. *Conference Record of the Thirty-First IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2005., 1570–1576. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2005.1488445>
- Dhimish, M., Holmes, V., Mehrdadi, B., Dales, M., Chong, B., & Zhang, L. (2017). Seven indicators variations for multiple PV array configurations under partial shading and faulty PV conditions. *Renewable Energy*, 113, 438–460. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2017.06.014>
- Dimitrijević, S. (n.d.). Understanding semiconductor devices. (No Title). *Energy Transition Outlook 2021 | DNV*. (n.d.).
- Eslami, S., Gholami, A., Akhbari, H., Zandi, M., & Noorollahi, Y. (2022). Solar-based multi-generation hybrid energy system; simulation and experimental study. *International Journal of Ambient Energy*, 43(1), 2963–2975. <https://doi.org/10.1080/01430750.2020.1785937>
- Eslami, S., Gholami, A., Bakhtiari, A., Zandi, M., & Noorollahi, Y. (2019). Experimental investigation of a multi-generation energy system for a nearly zero-energy park: A solution toward sustainable future. *Energy Conversion and Management*, 200(May), 112107. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112107>
- Ferrara, C., & Philipp, D. (2012). Why Do PV Modules Fail? *Energy Procedia*, 15, 379–387. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.02.046>
- Figgis, B., Nouviaire, A., Wubuliksimu, Y., Javed, W., Aghaei, M., Fairbrother, A., Gok, A., Ahmad, S., Kazim, S., Lobato, K., Oreski, G., Reinders, A., Schmitz, J., Theelen, M., Yilmaz, P., & Kettle, J. (2022). Review of degradation and failure phenomena in photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159, 112160. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112160>
- Akrami, E., Gholami, A., Ameri, M., & Zandi, M. (2018). Integrated an innovative energy system assessment by assisting solar energy for day and night time power generation: Exergetic and Exergo-economic investigation. *Energy Conversion and Management*, 175, 21–32. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.075>
- Akrami, E., Khazaei, I., & Gholami, A. (2018). Comprehensive analysis of a multi-generation energy system by using an energy-exergy methodology for hot water, cooling, power and hydrogen production. *Applied Thermal Engineering*, 129, 995–1001. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.095>
- Ameri, M., Minoofar, A., Gholami, A., Gholami, A., Eslami, S., & Zandi, M. (2023). Energy Efficiency and Solar Energy Implementation Opportunities for Dairy Farms. *11th Global Conference on Global Warming (GCGW-2023)*, 1–4.
- Aryanfar, A., Gholami, A., Ghorbannezhad, P., Yeganeh, B., Pourgholi, M., Zandi, M., & Stevanovic, S. (2022). Multi-criteria prioritization of the renewable power plants in Australia using the fuzzy logic in decision-making method (FMCDM). *Clean Energy*, 6(1), 780–798. <https://doi.org/10.1093/ce/zkab048>
- Aryanfar, A., Gholami, A., Pourgholi, M., Shahroozi, S., Zandi, M., & Khosravi, A. (2020). Multi-criteria photovoltaic potential assessment using fuzzy logic in decision-making: A case study of Iran. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 42(April), 100877. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100877>
- Aryanfar, A., Gholami, A., Pourgholi, M., & Zandi, M. (2021). Multicriteria wind potential assessment using fuzzy logic in decision making: A case study of Iran. *Wind Energy*, February, we.2640. <https://doi.org/10.1002/we.2640>
- Aryanfar, A., Gholami, A., Pourgholi, M., Zandi, M., & Khosravi, A. (2021a). A Type-2 Fuzzy-based Multi-criteria Decision-making Method for Sustainable Development of Wind Power Plants in Iran. *Renewable Energy Research and Application*, 2(2), 147–155. <https://doi.org/10.22044/rera.2021.10909.1058>
- Aryanfar, A., Gholami, A., Pourgholi, M., Zandi, M., & Khosravi, A. (2021b). Using Type-2 Fuzzy In Decision-Making For Wind Potential Assessment In Iran. *7th Iran Wind Energy Conference (IWEC2021)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/IWEC52400.2021.9467020>
- Badiee, A., Ashcroft, I. A., & Wildman, R. D. (2016). The thermo-mechanical degradation of ethylene vinyl acetate used as a solar panel adhesive and encapsulant. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 68,

- Potential Assessment and Dust Impacts on Photovoltaic Systems in Iran: Review Paper. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 10(3), 824–837. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2020.2978851>
- Gholami, A., Ameri, M., Zandi, M., Ghoachani, R. G., Pierfederici, S., & Kazem, H. A. (2022). Step-By-Step Guide to Model Photovoltaic Panels: An Up-To-Date Comparative Review Study. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 12(4), 915–928. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2022.3169525>
- Gholami, A., Eslami, S., Aryan, T., Ameri, M., Gavagsaz-Ghoachani, R., & Zandi, M. (2019). A Review of the Effect of Dust on the Performance of Photovoltaic Panels. *Iranian Electric Industry Journal of Quality and Productivity*, 8(15), 93–102. <http://ieijqp.ir/article-1-587-fa.html>
- Gholami, A., Eslami, S. H., Tajik, A., Ameri, M., Gavagsaz Ghoachani, R., & Zandi, M. (2019). A review of dust removal methods from the surface of photovoltaic panels. *Mechanical Engineering, Sharif Journal*, 35(2), 117–127. <https://doi.org/10.24200/j40.2019.52496.1496>
- Gholami, A., Khazaei, I., Eslami, S., Zandi, M., & Akrami, E. (2018). Experimental investigation of dust deposition effects on photo-voltaic output performance. *Solar Energy*, 159, 346–352. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.11.010>
- Gholami, A., Saboonchi, A., & Alemrajabi, A. A. (2017). Experimental study of factors affecting dust accumulation and their effects on the transmission coefficient of glass for solar applications. *Renewable Energy*, 112, 466–473. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.050>
- Gholami, A., Tajik, A., Eslami, S., & Zandi, M. (2019). Feasibility Study of Renewable Energy Generation Opportunities for a Dairy Farm. *Journal of Renewable Energy and Environment*, 6(2), 8–14. <https://doi.org/10.30501/jree.2019.95943>
- Gholami, Y., Gholami, A., Ameri, M., & Zandi, M. (2018). Investigation of Applied Methods of Using Passive Energy In Iranian Traditional Urban Design, Case Study of Kashan. *4th International Conference on Advances In Mechanical Engineering: ICAME 2018*, 3–12.
- Goswami, A., & Sadhu, P. K. (2021). Degradation analysis and the impacts on feasibility study of floating solar photovoltaic systems. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 26, 100425. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2020.100425>
- Griffini, G., & Turri, S. (2016). Polymeric materials for long-term durability of photovoltaic systems. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(11), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1002/app.43080>
- Hu, H., Wang, W. M., Fu, O., Bradley, A., Felder, T., Gambogi, W., & Trout, T. J. (2016). Typical photovoltaic backsheet failure mode analysis under different climates in China. *Proc. Singapore Nat. Eye Centre*, 1–20.
- Hülsmann, P., & Wallner, G. M. (2017). Permeation of Guo, B., Ait-Mokhtar, A., Belarbi, R., Ahzi, S., Rémond, Y., & Ennaoui, A. (2018). Investigation of factors affecting condensation on soiled PV modules. *Solar Energy*, 159(January), 488–500. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.10.089>
- Gholami, A., Alemrajabi, A. A., & Saboonchi, A. (2017). Experimental study of self-cleaning property of titanium dioxide and nanospray coatings in solar applications. *Solar Energy*, 157, 559–565. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.08.075>
- Gholami, A., Ameri, M., Zandi, M., & Gavagsaz-Ghoachani, R. (2021). A Review on Dust Activities in Iran and Parameters Affecting Dust Accumulation on Photovoltaic Panels. *Journal of Renewable and New Energy*, 8(2), 146–158. <https://doi.org/20.1001.1.24234931.1400.8.2.16.2>
- Gholami, A., Ameri, M., Zandi, M., & Gavagsaz Ghoachani, R. (2021). A single-diode model for photovoltaic panels in variable environmental conditions: Investigating dust impacts with experimental evaluation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47(October), 101392. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101392>
- Gholami, A., Ameri, M., Zandi, M., & Gavagsaz Ghoachani, R. (2022). Electrical, thermal and optical modeling of photovoltaic systems: Step-by-step guide and comparative review study. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 49, 101711. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101711>
- Gholami, A., Ameri, M., Zandi, M., Gavagsaz Ghoachani, R., Gavagsaz-Ghoachani, R., Gavagsaz Ghoachani, R., Aslan, G., Majid, Z., Roghayeh, G. G., & Mohammad, A. (2021). Dust Accumulation On Photovoltaic Modules: A Review On The Effective Parameters. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 39(1), 45–57.
- Gholami, A., Ameri, M., Zandi, M., Gavagsaz Ghoachani, R., & Gholami, M. (2023). A fast and precise double-diode model for predicting photovoltaic panel electrical behavior in variable environmental conditions. *International Journal of Ambient Energy*, 44(1), 1298–1315. <https://doi.org/10.1080/01430750.2023.2173290>
- Gholami, A., Ameri, M., Zandi, M., Gavagsaz Ghoachani, R., Jafarzadegan Gerashi, S., Kazem, H. A., & Al-Waeli, A. H. A. (2023). Impact of harsh weather conditions on solar photovoltaic cell temperature: Experimental analysis and thermal-optical modeling. *Solar Energy*, 252, 176–194. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.01.039>
- Gholami, A., Ameri, M., Zandi, M., Gavagsaz Ghoachani, R., & Kazem, H. A. (2022). Predicting solar photovoltaic electrical output under variable environmental conditions: Modified semi-empirical correlations for dust. *Energy for Sustainable Development*, 71, 389–405. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.10.012>
- Gholami, A., Ameri, M., Zandi, M., Ghoachani, R. G., Eslami, S., & Pierfederici, S. (2020). Photovoltaic

- 957–967. <https://doi.org/10.1002/pip.3039>
- López-Escalante, M. C., Caballero, L. J., Martín, F., Gabás, M., Cuevas, A., & Ramos-Barrado, J. R. (2016). Polyolefin as PID-resistant encapsulant material in PV modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 144, 691–699. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.10.009>
- Mahdi, H. Al, Leahy, P. G., Alghoul, M., & Morrison, A. P. (2023). *A Review of Photovoltaic Failure and Degradation Mechanisms*. <https://doi.org/10.20944/PREPRINTS202311.0761.V1>
- Mahmood, F. ibne, & TamizhMani, G. (2023). Impact of different backsheets and encapsulant types on potential induced degradation (PID) of silicon PV modules. *Solar Energy*, 252, 20–28. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.01.047>
- Makrides, G., Zinsser, B., Norton, M., Georghiou, G. E., Schubert, M., & Werner, J. H. (2010). Potential of photovoltaic systems in countries with high solar irradiation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 754–762. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.021>
- Minoofar, A., Gholami, A., Eslami, S., Hajizadeh, A., Gholami, A., Zandi, M., Ameri, M., & Kazem, H. A. (2023). Renewable energy system opportunities: A sustainable solution toward cleaner production and reducing carbon footprint of large-scale dairy farms. *Energy Conversion and Management*, 293, 117554. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117554>
- Ndiaye, A., Charki, A., Kobi, A., Kébé, C. M. F., Ndiaye, P. A., & Sambou, V. (2013). Degradations of silicon photovoltaic modules: A literature review. *Solar Energy*, 96, 140–151. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.07.005>
- Noorollahi, Y., Khatibi, A., & Eslami, S. (2021). Replacing natural gas with solar and wind energy to supply the thermal demand of buildings in Iran: A simulation approach. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 44, 101047. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101047>
- Noorollahi, Y., Vahidrad, N., Eslami, S., & Naseer, M. N. (2021). Modeling of Transition from Natural Gas to Hybrid Renewable Energy Heating system. *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, 32, 61–78. <https://doi.org/https://doi.org/10.5278/ijsepm.6576>
- Novoa, F. D., Miller, D. C., & Dauskardt, R. H. (2014). Environmental mechanisms of debonding in photovoltaic backsheets. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 120(PART A), 87–93. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.08.020>
- Oliveira, M. C. C. de, Diniz Cardoso, A. S. A., Viana, M. M., & Lins, V. de F. C. (2018). The causes and effects of degradation of encapsulant ethylene vinyl acetate copolymer (EVA) in crystalline silicon photovoltaic modules: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2299–2317. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.039>
- Omazic, A., Oreski, G., Halwachs, M., Eder, G. C. C., water vapour through polyethylene terephthalate (PET) films for back-sheets of photovoltaic modules. *Polymer Testing*, 58, 153–158. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.11.028>
- Jiang, S., Wang, K., Zhang, H., Ding, Y., & Yu, Q. (2015). Encapsulation of PV Modules Using Ethylene Vinyl Acetate Copolymer as the Encapsulant. *Macromolecular Reaction Engineering*, 9(5), 522–529. <https://doi.org/10.1002/mren.201400065>
- Jordan, D. C., & Kurtz, S. R. (2013). Photovoltaic Degradation Rates-an Analytical Review. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 21(1), 12–29. <https://doi.org/10.1002/pip.1182>
- Kazem, H. A., Al-Waeli, A. H. A., Chaichan, M. T., Sopian, K., Al Busaidi, A. S., & Gholami, A. (2023). Photovoltaic-thermal systems applications as dryer for agriculture sector: A review. *Case Studies in Thermal Engineering*, 47, 103047. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103047>
- Kazem, H. A., Al-Waeli, A. H. A., Chaichan, M. T., Sopian, K., Gholami, A., & Alnaser, W. E. (2023). Dust and cleaning impact on the performance of photovoltaic: an outdoor experimental study. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 45(1), 3107–3124. <https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2191064>
- Kazem, H. A., Chaichan, M. T., Al-Waeli, A. H. A., Al-Badi, R., Fayad, M. A., & Gholami, A. (2022). Dust impact on photovoltaic/thermal system in harsh weather conditions. *Solar Energy*, 245(July), 308–321. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.09.012>
- Kazem, H. A., Chaichan, M. T., Al-Waeli, A. H. A., & Gholami, A. (2022). A systematic review of solar photovoltaic energy systems design modelling, algorithms, and software. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 44(3), 6709–6736. <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2100517>
- Kim, K. A., & Krein, P. T. (2013). Photovoltaic hot spot analysis for cells with various reverse-bias characteristics through electrical and thermal simulation. *2013 IEEE 14th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics, COMPEL 2013*. <https://doi.org/10.1109/COMPEL.2013.6626399>
- Li, Q., Zhu, L., Sun, Y., Lu, L., & Yang, Y. (2020). Performance prediction of Building Integrated Photovoltaics under no-shading, shading and masking conditions using a multi-physics model. *Energy*, 213, 118795. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2020.118795>
- Lin, C.-C., Krommenhoek, P. J., Watson, S. S., & Gu, X. (2016). Depth profiling of degradation of multilayer photovoltaic backsheets after accelerated laboratory weathering: Cross-sectional Raman imaging. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 144, 289–299. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.09.021>
- Liu, H., Krishna, V., Lun Leung, J., Reindl, T., & Zhao, L. (2018). Field experience and performance analysis of floating PV technologies in the tropics. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 26(12),

- Schneller, E. J., Brooker, R. P., Shiradkar, N. S., Rodgers, M. P., Dhere, N. G., Davis, K. O., Seigneur, H. P., Mohajeri, N., Wohlgenuth, J., Scardera, G., Rudack, A. C., & Schoenfeld, W. V. (2016). Manufacturing metrology for c-Si module reliability and durability Part III: Module manufacturing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 992–1016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.215>
- Sharma, V., & Chandel, S. S. (2013). Performance and degradation analysis for long term reliability of solar photovoltaic systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 753–767. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.046>
- Tang, J., Ju, C., Lv, R., Zeng, X., Chen, J., Fu, D., Jaubert, J. N., & Xu, T. (2017). The Performance of Double Glass Photovoltaic Modules under Composite Test Conditions. *Energy Procedia*, 130, 87–93. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.09.400>
- Varga, J., & Ehrenstein, G. W. (1997). High-temperature hedritic crystallization of the β -modification of isotactic polypropylene. *Colloid & Polymer Science*, 275(6), 511–519. <https://doi.org/10.1007/s003960050113>
- Walwil, H. M., Mukhaimer, A., Al-Sulaiman, F. A., & Said, S. A. M. (2017). Comparative studies of encapsulation and glass surface modification impacts on PV performance in a desert climate. *Solar Energy*, 142, 288–298. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.020>
- Wang, E., Yang, H. E., Yen, J., Chi, S., & Wang, C. (2013). Failure Modes Evaluation of PV Module via Materials Degradation Approach. *Energy Procedia*, 33, 256–264. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.066>
- Wu, D., Zhu, J., Betts, T. R., & Gottschalg, R. (2014). Degradation of interfacial adhesion strength within photovoltaic mini-modules during damp-heat exposure. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 22(7), 796–809. <https://doi.org/10.1002/pip.2460>
- Yaichi, M., Tayebi, A., Boutadara, A., Bekraoui, A., & Mammeri, A. (2023). Monitoring of PV systems installed in an extremely hostile climate in southern Algeria: Performance evaluation extended to degradation assessment of various PV panel of single-crystalline technologies. *Energy Conversion and Management*, 279, 116777. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116777>
- Hirschl, C., Neumaier, L., Pinter, G., & Erceg, M. (2019). Relation between degradation of polymeric components in crystalline silicon PV module and climatic conditions: A literature review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 192(December 2018), 123–133. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.12.027>
- Oreski, G., Eder, G. C., Voronko, Y., Omazic, A., Neumaier, L., Mühleisen, W., Ujvari, G., Ebner, R., & Edler, M. (2021). Performance of PV modules using co-extruded backsheets based on polypropylene. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 223, 110976. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.110976>
- Ottersböck, B., Oreski, G., & Pinter, G. (2017). Comparison of different microclimate effects on the aging behavior of encapsulation materials used in photovoltaic modules. *Polymer Degradation and Stability*, 138, 182–191. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.03.010>
- Pasandideh, A., Nezakati Rezapour, F., Gholami, M., & Gholami, A. (2022). Analysis of the Discourse of Renewable Electricity Generation in Iran. *Global Media Journal-Persian Edition*, 16(1), 101–122. <https://doi.org/10.22059/gmj.2022.344488.1262>
- Razeghi Jahromi, D., Minoofar, A., Ghorbani, G., Gholami, A., Ameri, M., & Zandi, M. (2023). Harnessing Sunlight on Water: A Comprehensive Analysis of Floating Photovoltaic Systems and their Implications Compared to Terrestrial. *Journal of Renewable Energy and Environment*. <https://doi.org/10.30501/jree.2023.400301.1601>
- Rezvani, M., Gholami, A., Gavagsaz-Ghoachani, R., Phattanasak, M., & Zandi, M. (2022). A review of the factors affecting the utilization of solar photovoltaic panels. *2022 Research, Invention, and Innovation Congress: Innovative Electricals and Electronics (RI2C)*, 62–69. <https://doi.org/10.1109/RI2C56397.2022.9910278>
- Rezvani, M., Gholami, A., Gavagsaz-Ghoachani, R., & Zandi, M. (2023). A Review on The Effect of Dust Properties on Photovoltaic Solar Panels' Performance. *Journal of Renewable and New Energy*, 10(1), 198–211. <https://doi.org/10.52547/jrenew.10.1.198>
- Sánchez-Friera, P., Piliouline, M., Peláez, J., Carretero, J., & Sidrach de Cardona, M. (2011). Analysis of degradation mechanisms of crystalline silicon PV modules after 12 years of operation in Southern Europe. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 19(6), 658–666. <https://doi.org/10.1002/pip.1083>