Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
P.P 1-16

Vol. 12/ No. 4/ Winter 2024
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص ۱۶-۱

Vol. 12 / No. 4/ Winter 2024
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

تخریب اجزای پنل‌های خورشیدی فتوولتاییک: مروری بر علت‌ها و آثار

نوع مطالعه: پژوهشی

درسا رازقی جهرمی، دانشجوی کارشناسی[۱]؛ محمد مهدی گردعلی، دانشجوی کارشناسی[۲]؛ اصلان 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 این‌وجود، 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 این‌رو، 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

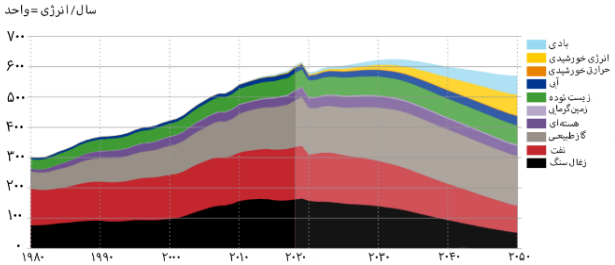
نام نویسنده‌ی مسئول : مجید زندی

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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]

۱. مقدمه

در دهه‌های گذشـــته، نیاز جهان به انرژی به میزان قابل توجهی افزایش یافته اســت و پیش‌بینی می‌شــود این روند ادامه داشــته باشــد (Aryanfar et al., 2022; Aryanfar, Gholami, Pourgholi, Zandi, et al., 2021a). این چشــم‌انداز بیش‌تر به دلیل رشــد ســریع صـنعت و رشـد جمعیت به ویژه در کشـورهای در حال توسـعه می‌باشـد (A. Gholami et al., 2020)، که نیاز به انرژی و غذا را به‌صـــورت چشـم‌گیری افزایش داده است (Razeghi Jahromi et al., 2023)، و امنیت غذایی و انرژی را دچار چالش کرده اســـت (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 اصـلی حل چالش انرژی بوده اسـت (Y. Gholami et al., 2018)، در حال حاضـر، انرژی مورد اسـتفاده جهان بیش‌تر از طریق سـوخت‌های فسـیلی نظیر ذغال سـنگ، گاز و نفت تامین می‌شـود که ذخایر آن‌ها پیوسـته رو به کاهش اسـت (شـکل (۱)). علاوه‌بر این، چالش‌های شـدید زیسـت محیطی مربوط به مصـــرف ســـوخت‌های توجه جامع جهانی را به ســـوی اعمال تغییراتی اســـاســـی در منابع اولیه تولید انرژی و اســـتفاده هر چه بیش‌تر از منابع انرژی تجـدیـدپـذیر جلـب کرده اســـت (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 اســـت (A. Gholami, Tajik, et al., 2019; Noorollahi, Khatibi, et al., 2021; Noorollahi, Vahidrad, et al., 2021; Oliveira et al., 2018).



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, Al-Waeli, & Gholami, 2022)، که در دو کاربرد کلی زمینی و شناور در حال توسعه و نصب می‌باشند (Eslami et al., 2019, 2022). کاربردهای مختلفی نیز در خصوص استفاده از سامانه‌های هیبریدی بر پایه خورشیدی نیز در سال‌های اخیر توسعه یافته است (Akrami, Gholami, et al., 2018; Akrami, Khazaee, et al., 2018)، با این‌حال استفاده از این سامانه‌های پایه خورشیدی چالش‌های خاص خود را دارد (A. Gholami, Eslami, Aryan, et al., 2019). برای این‌که از نظر اقتصادی با دوام و قابل انتقال باشند، انتظار می‌رود پنل‌های فتوولتاییک خورشیدی به مدت ۲۵ تا ۳۰ سال با شرایطی که در آن نصب می‌شوند، با اطمینان کار کنند (Ottersböck et al., 2017). با این‌وجود، قرار گرفتن در معرض عواملی مثل رطوبت، درجه حرارت بالا و اشعه ماورا بنفش نور خورشید، علاوه‌بر اثر بر خروجی پنل‌های خورشیدی فتوولتاییک (Chaichan et al., 2021; A. Gholami, Ameri, Zandi, Gavagsaz Ghoachani, et al., 2022; A. Gholami, Ameri, Zandi, Gavagsaz Ghoachani, Jafarzadegan Gerashi, et al., 2023; Kazem, Chaichan, Al-Waeli, Al-Badi, et al., 2022)، باعث کاهش مواد محافظ روی پنل‌ها می‌شود و باعث بروز حالت‌های مختلفی از خرابی می‌شود که منجر به کاهش عملکرد این سامانه‌ها و یا کاهش عمر آن‌ها به کم‌تر از ۲۵ سال می‌شود (Makrides et al., 2010; Sharma & Chandel, 2013). چنین مواردی از خرابی، علاوه‌بر اثری که بر توان، بازده و عمر پنل‌های خورشیدی فتوولتاییک می‌گذارد، می‌تواند باعث بروز مسائل ایمنی نیز شود. از این‌رو، در سال‌های اخیر، توجه ویژه‌ای به خرابی‌های مربوط به این سامانه‌ها شده است و پژوهش‌های متعددی برای تشخیص خرابی‌ها و آثار عملکردی آن‌ها و کاهش نرخ خرابی‌ها در سال‌های اخیر انجام شده است (Mahmood & TamizhMani, 2023; Yaichi et al., 2023).

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 حلزون 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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]

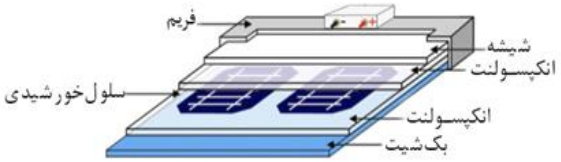
می‌شود (Ndiaye et al., 2013). یکی‌دیگر از عواملی که منجر به تاثیر شدید بر عمل‌کرد پینل‌های خورشیدی می‌گردد، اثر نشست گرد و غبار بر پنل‌های خورشیدی می‌باشد که در صورت عدم توجه به این موضوع، می‌تواند منجر به خرابی‌های اساسی هم‌چون نقطه داغ و تخریب پنل نیز گردد (A. Gholami, Ameri, Zandi, & Gavagsaz-Ghoachani, 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 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): اجزا 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 اتیلن‌وینیل‌استات[1] است و سلول را در بر دارد، بستر پنل که از پلیمرهای فلوئوره از جمله فلوراید[2]، پلی‌وینیل‌فلوراید[3] یا پلی‌تترا فلوئوراتیلن[4] تولید می‌شود. برای مهر و موم نیز از نوار مخصوص دو طرفه که از لاستیک بوتیل[5]و سیلیکون تولید شده است، استفاده می‌شود. قسمت پشتی پنل نیز شامل جعبه اتصال‌های الکتریکی است که به‌صورت معمول از پلی‌اتیلن‌ترفتالات[6] 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

[1] Ethylene-vinyl acetate
[2] Fluoride
[3] Polyvinyl fluoride
[4] Polytetrafluoroethylene
[5] Butyl Rubber
[6] Polyethylene terephthalate

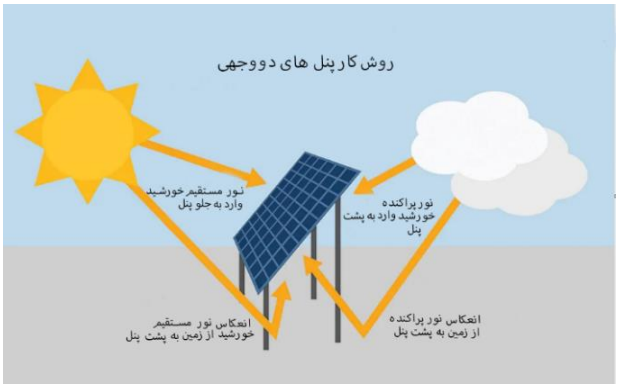
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]

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 تاثیر 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 تاثیر می‌گذارد و می‌تواند باعث تخریب سریع این موادها 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 فتوولتاییک، ترکیب آن‌ها و تأثیر تخریب بر عملکرد کلی پنل‌ها ارائه خواهد شد.

۲-۱- سلول خورشیدی

اولین و اصلی‌ترین بخش یک پنل خورشیدی، سلول خورشیدی است. کارایی و عملکرد پنل‌های خورشیدی فتوولتاییک 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.



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 پشتی با پنل شیشه‌ای دیگری جایگزین می‌شوند. در نتیجه سلول های 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 می شود 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 گالیم سلنید 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 فتوولتاییک 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., 2015; Schneller et al., 2016). 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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]

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[7]، 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 معمولا از پلی‌اتیلن‌ترفتالات ساخته می‌شود، در حالی‌که در ساخت تعداد کمی از بسترها از پلی‌آمید یا پلی‌الیفین 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., 2015; Sharma & Chandel, 2013). 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., 2018; A. Gholami, Saboonchi, et al., 2017). 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, & Gholami, 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

[7] backsheets

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]

توان اسمی اولیه است، در حالی‌که برای پنل‌های ۲۰ تا ۲۵ ساله، نرخ تخریب به حدود۲۰ درصد است (Walwil et al., 2017).

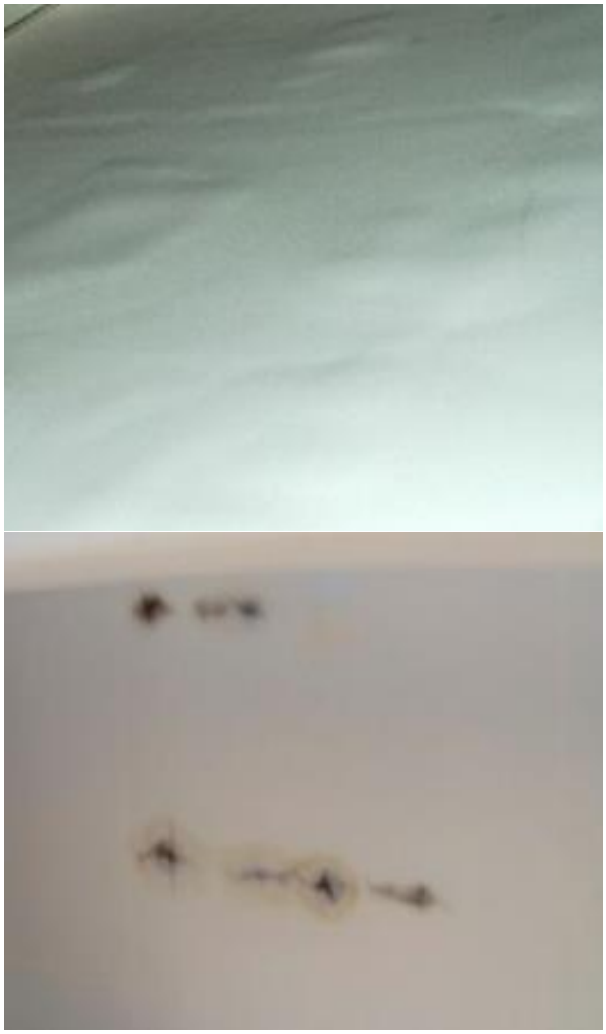
در سامانه‌های فتوولتاییک شناور، از آن‌جا که پنل‌ها همیشه تحت تاثیر رطوبت بالای محیطی هستند، نرخ تخریب بالاتری در تخریب‌های خوردگی و مرتبط به رطوبت مشاهده می‌شود. البته وجود تنش حرارتی کم‌تر در این سامانه‌ها خود منجر به کاهش نرخ تخریب‌های مرتبط با تنش‌های حرارتی می‌گردد (Goswami & Sadhu, 2021). سایر پدیده‌های آب و هوایی نیز علاوه‌بر 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 هنگامی‌که 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 ترک‌خوردگی 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 ترک‌خوردگی در آن‌ها شایع است. پژوهش‌های انجام شده در این 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 فوتوولتائیک، 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.

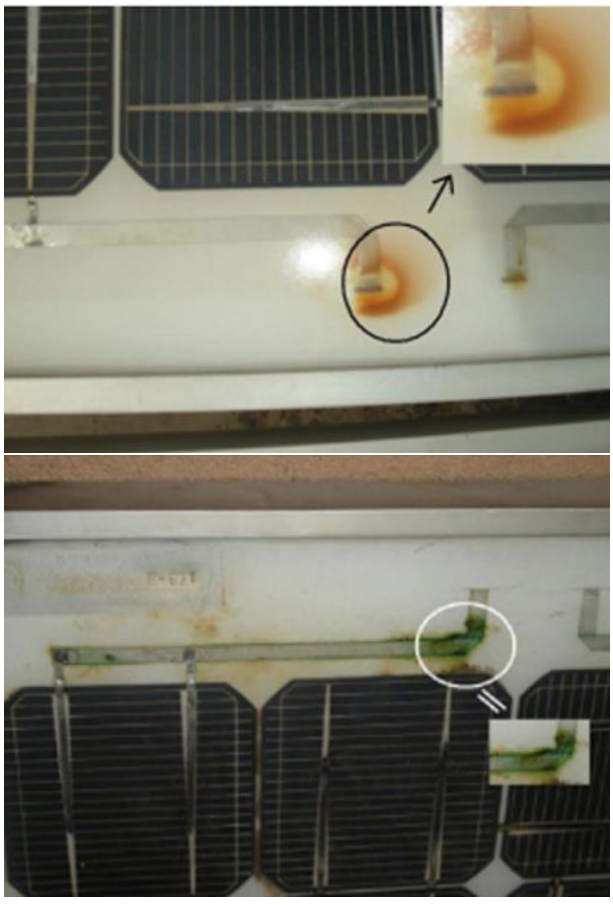
علاوه‌بر این، عوامل فیزیکی مانند شکستگی و ایجاد میکرو ترک‌ها می‌توانند در طول ساخت، حمل و نقل یا هنگام نصب پنل‌ها ایجاد شوند.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]

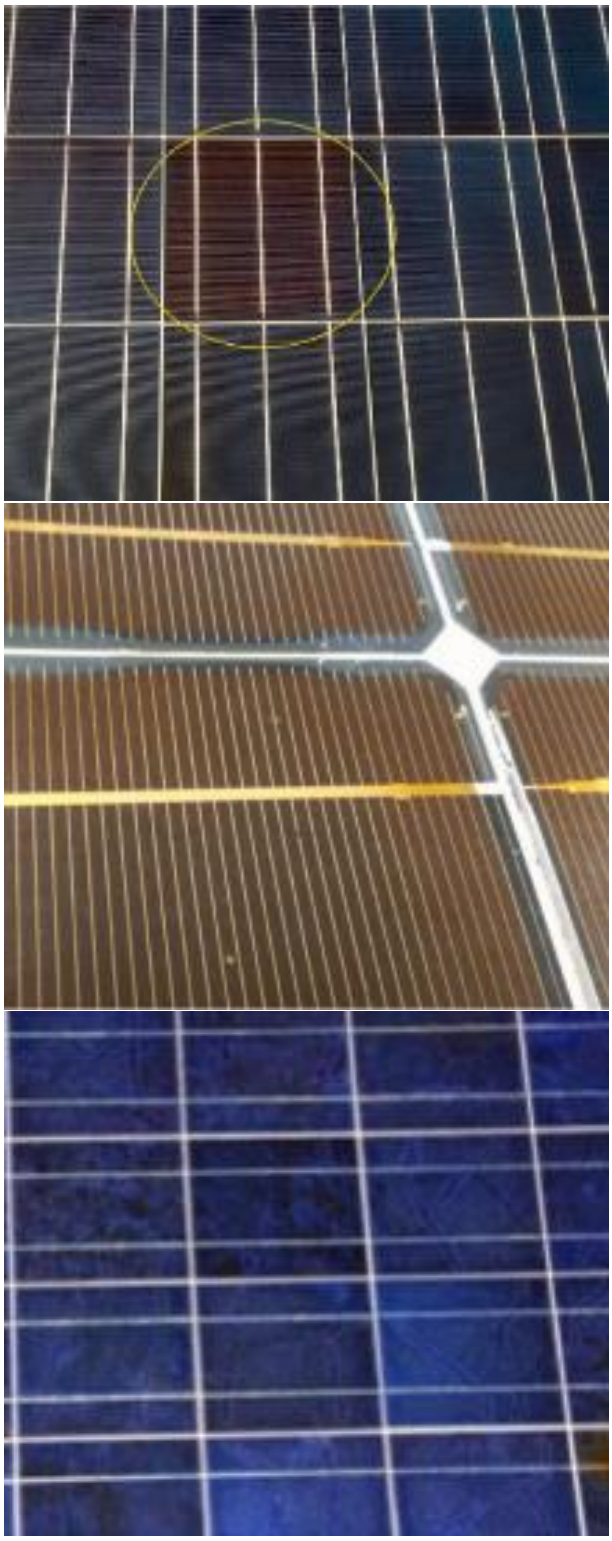
از حالت‌های اصلی تخریب می‌توان به لایه‌لایه شدن[8]، ترک[9]، گچ‌زدگی[10]، سوختگی[11]، تشکیل حباب[12] و تغییر رنگ[13] اشاره کرد (شکل (۴)) (Omazic et al., 2019). از طرف دیگر، خرابی‌های مربوط به انکپسولنت را می‌توان در سه مورد خوردگی۱۴، تغییر رنگ و لایه‌لایه شدن خلاصه کرد (Walwil et al., 2017).

۳-۱- تغییر رنگ

تغییر رنگ یکی از قابل توجه‌ترین تخریب‌ها در پنل‌های فتوولتاییک زمینی و شناور است که می‌توان آن را از طریق چشم تشخیص داد. زرد شدن پلیمرهای موجود در پنل‌های فتوولتاییک خورشیدی ابتدا در دهه ۱۹۸۰ شناخته شد. در حقیقت در دهه‌های اول تا سال ۲۰۰۰، اصلی‌ترین حالت تخریب گزارش شده در پنل‌های خورشیدی فرسوده، تغییر رنگ پلیمرها به زردی یا قهوه‌ای است (شکل (۵)).



شکل (۵): تغییر شکل در پنل‌های خورشیدی فتوولتاییک.



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

[8] Delamination
[9] Cracking
[10] Chalking
[11] Burn
[12] Formation of bubbles
[13] Discoloration
[14] Corrosion

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]

علت زرد شدگی این است که وقتی پلیمرهای نیمه بلورین[15] در فضای باز قرار می‌گیرند، مستعد تخریب می‌شوند. ترکیبی از دمای بالا، رطوبت و اشعه ماورا بنفش باعث زرد شدگی یا قهوه‌ای شدن پنل‌ها می‌شود. تابش اشعه فرابنفش منبع اصلی تخریب پلیمرها است، زیرا طیف ۲۰۰ تا ۴۰۰ نانومتر از انرژی کافی برای شکستن پیوندهای شیمیایی در زنجیره اصلی پلیمر و آزاد کردن رادیکال‌های فعال و آغاز واکنش‌های زنجیره‌ای برخوردار است، که به‌دنبال آن، واکنش‌های تخریبی آغاز می‌شوند. مقدار انرژی فوتون در این منطقه فرابنفش برای تفکیک پیوند کووالانسی پلیمرها کافی است (Cristofoli, 2012).

درجه حرارت بالا نیز می‌تواند به‌طور چشم‌گیری خاصیت مکانیکی، الکتریکی و نوری مواد پلیمری را تغییر دهد. تغییر سریع دما در مدت زمان کوتاه باعث ایجاد تنش‌های مکانیکی و حرارتی شده و باعث ایجاد نواقصی می‌شود که می‌توانند خصوصیات مهم پلیمرها را تغییر دهند. این نوع تخریب‌ها بر تابش ورودی به سلول‌های خورشیدی تاثیر منفی می‌گذارند و می‌توانند با جذب تابش منجر به افزایش دمای سطح و راندمان پایین‌تر شوند.

این تخریب‌ها هم‌چنین خطاهای الکتریکی و حرارتی درون پنل را تسریع می‌کنند و منجر به اتلاف بیش‌تر توان می‌شوند. به‌طور کلی باید در نظر داشت که تغییر رنگ به‌طور معمول با تغییر در خصوصیات مکانیکی همراه است که می‌تواند علاوه‌بر کاهش توان حالت‌های تخریب بیش‌تری را در کامپوزیت چند ماده‌ای یک پنل خورشیدی ایجاد کند. یکی از تخریب‌های مدل تغییر رنگ که رایج است، اثر حلزونی نام دارد. بعد از چند ماه کارکرد پنل‌ها، برخی از پنل‌های خورشیدی فوتوولتائیک یک نوع تغییر رنگ به نام اثر حلزونی در خود نشان می‌دهند که به صورت نوارهای تیره نامنظم در سراسر پنل ظاهر می‌شوند. یافته‌ها نشان می‌دهند که اثر حلزونی بعد از ۳ تا ۵ ماه کارکرد ایجاد می‌شود (شکل (۶)) (Mahdi et al., 2023).

۳-۲- لایه‌لایه شدن

مشاهده شده است که تغییر رنگ در اکثر موارد با درجه خاصی از لایه‌لایه شدن همراه می‌شود که می‌تواند در واسط شیشه یا حتی در لایه‌های بستر اتفاق بیفتد (شکل (۷)). لایه‌لایه شدن بین هر یک از لایه‌های بستر نیز شایع است و دلیل آن می‌تواند تخریب و از بین رفتن چسبندگی چسب‌هایی که لایه‌های بستر را به هم متصل می‌کنند، باشد. لایه‌لایه شدن به دلیل تمایل زیاد چسب به آب، تخریب هیدرولیز و تخریب حرارتی در دمای بالا در لایه چسب ایجاد می‌شود، که باعث کاهش لایه چسب می‌شود (Ferrara & Philipp, 2012; Novoa et al., 2014; Sánchez-Friera et al., 2011).



شکل (۷): لایه‌لایه شدن و تغییر رنگ.

لایه لایه شدن هم‌چنین می‌تواند به دلیل تغییر خوصیات حرارتی پلیمرهای نیمه بلورین رخ دهد (Dhere, 2005). وانگ و همکارانش (Wang et al., 2013)، گزارش کرده‌اند که اشعه ماوراء بنفش باعث تبلور پلیمرهای نیمه بلورین می‌شود. پس از شروع لایه‌لایه شدن، بخار آب می‌تواند از لبه‌های پنل به شکاف بین انکپسولنت و شیشه یا سلول نفوذ کرده و تخریب را تشدید کند. پلیمر نیمه بلورین با جذب آب هیدرولیز می‌شود و می‌تواند موجب تولید اسیداستیک شود. اسیداستیک به تنهایی نیز قابلیت این را دارد که باعث هیدرولیز پیوندهای چسبنده در بین شیشه و انکپسولنت شود (Wu et al., 2014).

۳-۳- حباب

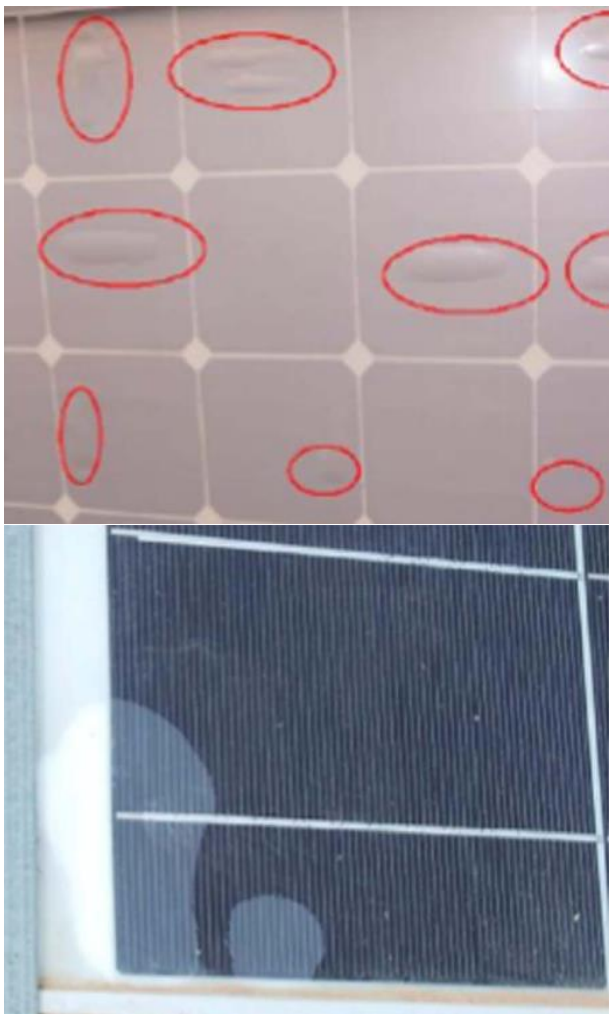
تشکیل حباب فرآیندی شبیه به لایه‌لایه شدن است و باعث عدم چسبندگی انکپسوله در مناطق کوچک می‌شود. حباب‌ها معمولا به دلیل واکنش‌های شیمیایی‌ای که گازها آزاد می‌کنند، به وجود می‌آیند. به‌طور معمول در قسمت پشت پنل ظاهر و در انکپسولنت انباشته می‌شوند، اما گاهی ممکن است در قسمت جلویی بین شیشه و سلول ظاهر شوند (Mahdi et al., 2023).

شکل (۸) شکل‌گیری حباب در پنل فتوولتاییک را نشان می‌دهد. حباب‌ها غالبا در مرکز سلول‌ها ظاهر می‌شوند که ناشی از تفاوت چسبندگی به دلیل دمای زیاد سلول است. حباب‌ها باعث اتلاف گرمای

[15] Semicrystalline Polymer

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]

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.

۳-٤- 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 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.

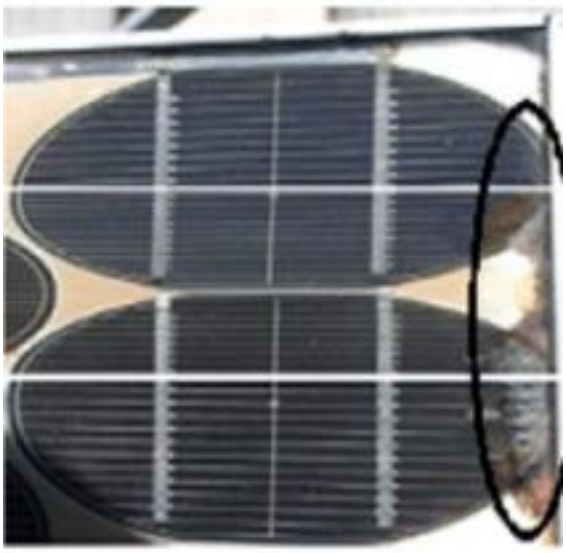
همان‌طور که پیش‌تر نیز عنوان شد، تولید اسید استیک ناشی از هیدرولیز می‌تواند منجر به لایه‌لایه شدن شود. ایجاد اسیداستیک نه تنها باعث ایجاد مشکل در چسبندگی با شیشه می‌شود بلکه باعث تسریع خوردگی سلول‌ها و اتصال‌دهنده‌ها نیز می‌شود. در نتیجه منجر به افزایش خوردگی سلول، تجزیه پیوندهای چسبندگی، کاهش انتقال 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.

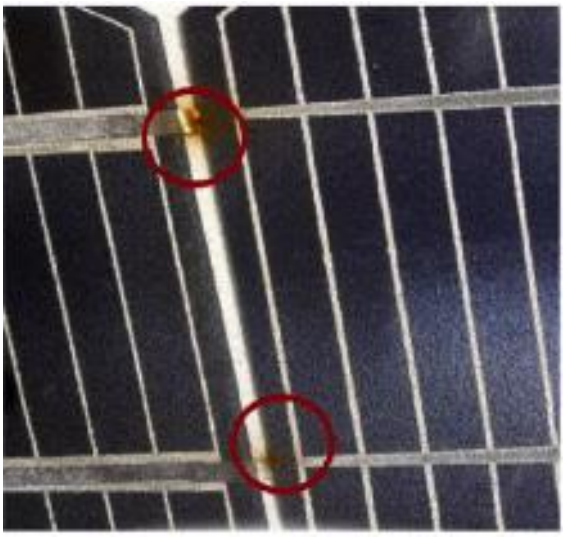


شکل (۹): خوردگی پنل‌های خورشیدی در جعبه اتصالات.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]



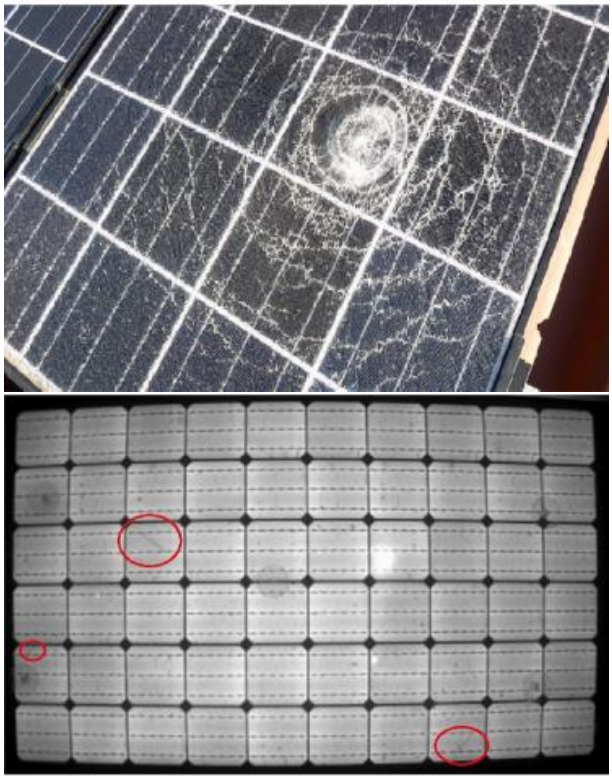
شکل (۱۰): خوردگی پنل‌های خورشیدی در لبه‌های پنل.



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 به‌علت 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 ترک‌خوردگی به‌طور عمده در بسترهای غیرفلوئروپلیمری با لایه‌های بیرونی پلی‌اتیلن‌ترفتالات مشاهده می‌شود. این ترک‌ها از آنجایی که رطوبت به 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 فتوولتاییک، به‌شدت بر عملکرد پنل تاثیر می‌گذارد (A. Gholami, Ameri, Zandi, Gavagsaz Ghoachani, et al., 2021; Rezvani et al., 2022). نشست چنین موادی، علاوه‌بر آن‌که 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, Jafarzadegan Gerashi, et al., 2023). در عین‌حال، وجود رطوبت در هوا و تغییر پارامترهای آب و هوایی می‌تواند اثر دائمی و بلند مدت این موارد را افزایش دهد. به‌عنوان مثال، رطوبت بالا باعث افزایش تجمع گرد و غبار در سطح پنل و نیز افزایش چسبندگی آن‌ها به سطح می‌شود. چنین مواردی علاوه‌بر افت‌های عنوان شده، منجر به تلفات عدم تطابق[16] و یا بروز نقاط داغ نیز می‌شود که طول عمر پنل‌ها را به‌شدت تخت تاثیر

[16] Mismatch

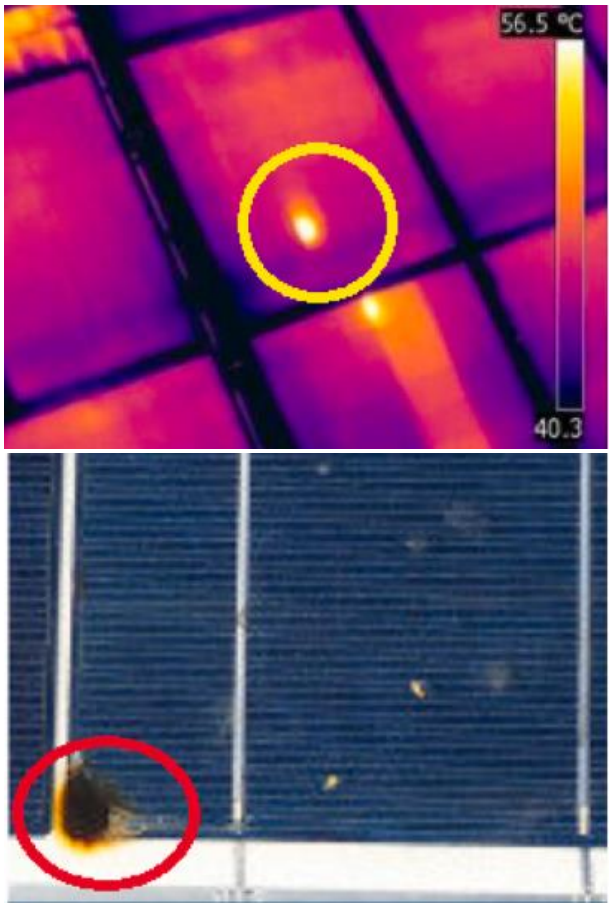
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]

قرار می‌دهد. فضولات پرندگان نیز یک مسئله جدی در سامانه‌های فوتوولتاییک به‌ویژه در سامانه‌های شناور است؛ زیرا پرندگان اغلب برای آب نوشیدن به سمت منابع آبی می‌روند و از سامانه‌های موجود به‌عنوان محل ایستادن و استراحت نیز استفاده می‌کنند (Figgis et al., 2018; Liu et al., 2018).

۳-۸- نقاط داغ

نقاط داغ یکی از رایج‌ترین عیوب مشاهده شده در پنل‌های زمینی و شناور هستند. بررسی پژوهش‌های انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد که اگر یک سلول خورشیدی جریان کم‌تری نسبت به جریان رشته‌ای 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 دورونی نامناسب ایجاد شود که به‌طور معمول بسیار نادر است و پژوهش‌های مرتبط با آن به‌صورت عمده در محیط آزمایشگاهی انجام شده است. با فرض وجود چیدمان و اتصال دقیق درون پنل خورشیدی، حالت دوم نقطه داغ، پدیده‌ای بسیار رایج برای سلول‌های 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 آلودگی‌ها رخ می‌دهد (Li et al., 2020). در چنین شرایطی، سلول‌های کامل پوشیده شده یا بخشی از سلول‌ها، جریان عملکردی کل را کاهش خواهند داد و به‌دنبال آن، سلول‌های سالم مجبور به عمل در شرایط ولتاژ بالاتر می‌شوند. این شرایط باعث می‌شود که سلول سایه‌دیده بایاس معکوس شود که به‌دنبال آن، دمای این سلول‌های می‌تواند به دماهایی بالاتر از ۱۵۰ درجه سانتیگراد برسد که از دمای بیشینه بهره‌برداری پنل‌های تجاری فراتر است (Dhimish et al., 2017).

در خصوص این نقاط دما بالا، در صورتی که عامل به‌وجود آورنده فوری حذف نشود، می‌توانند موجب آسیب دائمی پنل‌ها و بروز سایر خرابی‌هایی که ناشی از افزایش دمای پنل است هم‌چون ایجاد ترک، تخریب و یا ذوب جوش‌ها و اتصال‌ها، تخریب در خواص پلیمرهای موجود و در کل کاهش خواص الکتریکی پنل فتوولتاییک (Dimitrijev, n.d.)، شوند (شکل (۱۳)). برای جلوگیری از چنین خرابی‌هایی، مکانیسم‌های پیشگیری مختلفی اعمال می‌شود. ادغام دیودهای بایپس[17] در مدارهای اتصال سلول‌های خورشیدی، مسیر جریان الکتریکی جایگزینی را ایجاد نموده و بار حرارتی روی سلول مورد سایه را کاهش می‌دهد. در شرایط نقطه داغ شدید، این مکانیزم به‌صورت کلی، با کنارگذاری نه تنها سلول سایه‌دیده بلکه بخش‌های دیگر از رشته سلول‌ها مرتبط، به محافظت از پنل خورشیدی فتوولتاییک می‌پردازد. تعداد دیودهای بایپس به دلیل جنبه های فنی و اقتصادی محدود است.



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

٤. نتیجه‌گیری

استفاده از پنل‌های خورشیدی فتوولتاییک به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین راه‌کارهای بشر برای حل چالش‌های مربوط به انرژی و محیط‌زیست است. با این‌وجود، استقرار این پنل‌ها در محیط‌های مختلف آب و هوایی، این سامانه‌ها را تحت شرایط سخت محیطی و تنش‌های داخلی مختلف قرار می‌دهد که ممکن است باعث بروز تخریب‌هایی مختلف و در نتیجه کاهش شدید بازدهی و یا طول عمر آن‌ها شود. از این‌رو شناخت چنین تخریب‌هایی بر اساس نتایج ارائه شده در مطالعه‌ها و پژوهش‌های تجربی امری لازم برای استفاده بهینه از این سامانه‌ها و دست‌یابی به بالاترین سطح کیفیت وبهره‌وری از انرژی خورشیدی در صنعت برق است. بدیهی است که میزان تخریب بستگی به مواد مورد استفاده در پنل‌ها و ارتباط آن با محل نصب، شرایط محیطی و اقلیمی دارد.

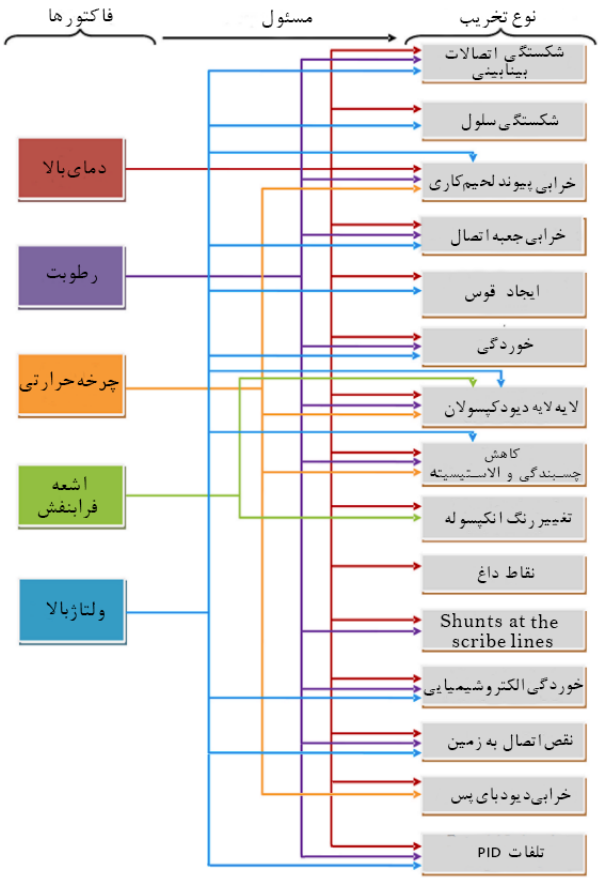
[17] Bypass Diodes

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]

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)
گچ‌زدگی	تخریب سطح اتصال دهنده پلیمری لایه بیرونی	(Omazic et al., 2019)
خوردگی	نفوذ رطوبت به داخل پنل از طریق ورق پشتی و لبه آن در مکان‌هایی با رطوبت زیاد؛ محل اصلی مشاهده تخریب در جعبه اتصالات، لبه پنل‌ها و نوار اتصال سلول‌ها به هم	(Ferrara & Philipp, 2012)
شکستگی و ترک	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	(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 فتوولتاییک	(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) و (A. Gholami et al., 2018; A. Gholami, Alemrajabi, et al., 2017; A. Gholami, Saboonchi, et al., 2017)
نقاط داغ	ایجاد بایاس معکوس در سلول‌ها به‌دلیل سایه جزئی یا آلودگی‌های غیریکنواخت بر سطح پنل	(Bauer et al., 2009; Dhimish et al., 2017; Dimitrijev, 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 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 فتوولتاییک 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 فتوولتاییک، از اهمیت خاص خود بر خوردار است، با این وجود رایج‌ترین تخریب گزارش شده در پژوهش‌های پیشین شکستگی و ترک پنل‌ها و تغییر رنگ مربوط به آن‌ها هست (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.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]

مراجع

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., Khazaee, 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*, 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

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

Dimitrijev, 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., Wubulikasimu, Y., Javed, W.,

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]

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., Khazaee, 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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]

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),

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]

Schneller, E. J., Brooker, R. P., Shiradkar, N. S., Rodgers, M. P., Dhere, N. G., Davis, K. O., Seigneur, H. P., Mohajeri, N., Wohlgemuth, 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., Piliougine, 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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]