

تاریخ ۱۴۰۴/۰۵/۰۴

شماره ۰۵/م/۱۴۰۴۱۳۵

پیوست طرح نامه آشنایی با چالشهای زیست محیطی
نیروگاه های خورشیدی در چرخه عمر

انجمن مدیریت سبز ایران
Iranian Green Management Society



انجمن مدیریت سبز ایران

جناب آقای سید جواد زمانی

معاون محترم امور استان ها و تشکلهای اتاق بازرگانی ایران

موضوع: درخواست اطلاع رسانی طرح آشنایی با «چالشهای زیست محیطی فناوری انرژی خورشیدی»

با سلام و احترام،

همان گونه که مستحضرد، کشور ایران طی سالهای اخیر با چالشهای فزایندهای در حوزه تأمین انرژی، بهویژه کمبود برق در بخشهای صنعتی و خدماتی مواجه بوده است. در پاسخ به این بحران ساختاری، دولت محترم و نهادهای سیاست گذار، توسعه انرژیهای تجدیدپذیر بهویژه نیروگاههای خورشیدی را در اولویت قرار داده و از بنگاههای اقتصادی دعوت به سرمایه گذاری در این مسیر کرده اند.

در عین حال، توسعه شتابزده فناوریهای نو بدون ارزیابی کامل آثار زیست محیطی، اقلیمی و مدیریتی آنها میتواند موجب بروز پیامدهای پنهان، جبران ناپذیر و هزینه بر در آینده نزدیک گردد.

از این رو، انجمن مدیریت سبز ایران با همکاری جمعی از متخصصان حوزه انرژی و محیط زیست، اقدام به تدوین طرحنامه ای تحلیلی با عنوان: "چالشهای زیست محیطی در توسعه انرژی خورشیدی در ایران" نموده است. این سند، ضمن بررسی فرصتها و مزایای انرژی خورشیدی، به چالشهای مهمی نظیر موارد زیر می پردازد:

- آسیب به زیست بومهای بکر و اراضی کشاورزی
- میزان مصرف آب و زمین در مقیاس صنعتی
- مشکلات بازیافت پنها و زباله های الکترونیکی
- چالشهای نگهداشت، نگهداری و مدیریت پسماند ماژولها
- مسائل اقلیمی در مناطق خشک و کویری ایران

با توجه به اهمیت موضوع، خواهشمند است دستور فرمایید این طرحنامه تحلیلی به منظور افزایش آگاهی، تصمیم گیری آگاهانه و پیشگیری از آسیبهای آتی، در اختیار تشکلهای اقتصادی، صنعتی و سرمایه گذاران علاقه مند به حوزه انرژیهای تجدیدپذیر قرار گیرد. این اقدام میتواند نقشی تعیین کننده در جهت دهی صحیح به سرمایه گذاریها، سیاست گذاریهای محلی و برنامه ریزی بلندمدت در حوزه انرژی پاک ایفا نماید.

پیشاپیش از حمایت و همکاری ارزشمند آن اتاق محترم سپاسگزاری می گردد.

با سپاس

رییس انجمن

محمد حسن امامی

تهران، سهروردی شمالی، بالاتر از میدان پالیزی، کوچه موزه، پلاک ۱۵، واحد ۴

www.iran-gma.com | www.isgm.ir | info@iran-gma.com

تلفن: ۸۸۵۱۵۴۲۱ | ۸۸۵۱۵۳۲۸ | ۸۸۵۱۵۵۲۶

فکس: ۸۸۷۶۳۶۵۷ | واتسآپ: ۰۹۳۷۰۸۹۳۶۰۳

بسته آموزشی و توجیهی،

"فن آوری انرژی خورشیدی:

چالش‌های زیست محیطی و رویکرد سبز در مدیریت چرخه عمر آن"



محتوای بسته آموزشی و توجیهی:

صفحه	پیوست‌ها	صفحه	عنوان
۲۱	اول: تحلیل اثرات زیست محیطی نیروگاه‌های خورشیدی بر منابع طبیعی/چالش‌ها و راهکارها	۲	مقدمه و ضرورت موضوع
۲۴	دوم: مراجع علمی معتبر درباره نرخ کاهش راندمان پنل‌های خورشیدی	۳	فرآیند تولید و نصب انرژی خورشیدی از زبان محیط زیست
۲۵	سوم: پنل‌های خورشیدی در پایان عمر مفید	۵	معرفی فناوری خورشیدی و مفاهیم ناترازی
۲۷	چهارم: بازیافت پنل‌های خورشیدی و چالش‌های آن	۸	تحلیل محیط زیستی نصب پنل فتوولتائیک
۲۹	مراجع علمی برای چالش‌های بازیافت پنل‌های خورشیدی	۱۰	نقد علمی و زیست محیطی
۳۰	پنجم: مراحل مختلف تولید، نصب، و نگهداری نیروگاه خورشیدی/مراجع علمی	۱۱	منابع علمی و گزارش‌های معتبر
۳۴	ششم: زمین زراعی و تعداد پنل‌های خورشیدی	۱۳	کاهش راندمان پنل‌های خورشیدی در گذر زمان
۳۶	هفتم: استانداردهای واردات پنل خورشیدی	۱۷	مراجع علمی اثبات کاهش راندمان پنل‌های خورشیدی
۳۸	نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای واردات پنل خورشیدی به ایران و مراجع علمی	۱۸	مثال‌های بین‌المللی و وضعیت ایران
۳۹	هشتم: راندمان پنل‌های خورشیدی فتوولتائیک	۲۰	چگونه کشورهای پیشرفته چالش‌های زیست محیطی را مدیریت می‌کنند؟
۴۱	نهم: روش‌های تست راندمان پنل‌های فتوولتائیک		

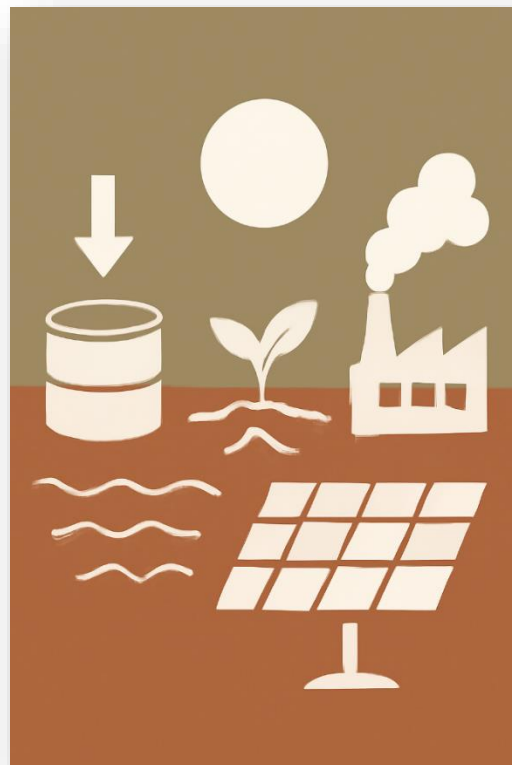
۱

مقدمه و ضرورت موضوع

در دهه‌های اخیر، جهان با چالش‌های فزاینده‌ای در مدیریت منابع حیاتی چون آب، خاک و انرژی مواجه شده است؛ چالش‌هایی که در ادبیات محیط‌زیستی تحت عنوان «ناترازی منابع» شناخته می‌شوند. ناترازی به معنای عدم تعادل میان مصرف و ظرفیت بازسازی منابع طبیعی است و پیامدهای آن، از کمبود آب‌های زیرزمینی تا آلودگی گسترده خاک و هوا، امروزه گریبان‌گیر بسیاری از جوامع به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک شده است.

در چنین شرایطی، توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌ویژه انرژی خورشیدی، به عنوان راهکاری برای کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و مقابله با تغییرات اقلیمی مطرح شده است. اما در کنار این مزایا، گسترش سریع و گسترده فناوری خورشیدی بدون ارزیابی دقیق پیامدهای جانبی آن، می‌تواند خود به‌عنوان عاملی برای تعمیق **ناترازی‌های جدید** مطرح شود. مصرف آب برای شست‌وشوی پنل‌ها، اشغال اراضی کشاورزی، اختلال در ریزاقلیم خاک، کاهش تنوع زیستی، و تولید پسماندهای صنعتی در پایان عمر پنل‌ها، تنها بخشی از این چالش‌هاست.

از این‌رو، پرداختن به انرژی خورشیدی نباید صرفاً از دریچه تولید انرژی پاک نگرسته شود، بلکه نیازمند یک نگاه چندبعدی و بین‌رشته‌ای است؛ نگاهی که در آن «**پایداری**» نه تنها به معنای کاهش گازهای گلخانه‌ای، بلکه به معنای حفظ تعادل اکولوژیکی، اجتماعی و اقتصادی در سطح محلی و ملی تعریف شود.



ضرورت این بسته آموزشی و توجیهی از همین نیاز نشأت می‌گیرد: توانمندسازی مدیران، کارشناسان و تصمیم‌گیران برای درک عمیق‌تر و جامع‌تر از چالش‌ها، فرصت‌ها و مسئولیت‌های ناشی از توسعه فناوری‌های خورشیدی در ایران. **این بسته برای مدیران پروژه‌های انرژی‌های تجدیدپذیر-کارشناسان محیط‌زیست، آب و خاک-مشاوران توسعه پایدار-فعالان بخش خصوصی حوزه انرژی خورشیدی-سازمان‌های دولتی و NGOها و غیره کاربردی است.**

فرآیند تولید و نصب انرژی خورشیدی از زبان محیط زیست

تولید و نصب سیستم‌های خورشیدی شامل مراحل است که در هر کدام می‌توان با انواع مختلف پسماندها، پساب‌ها و گازهای گلخانه‌ای مواجه شد. برای درک بهتر این موضوع، فرآیند تولید و نصب پنل‌های خورشیدی و چالش‌های مرتبط با آن به‌ویژه برای یک نیروگاه خورشیدی یک مگاواتی توضیح داده می‌شود.

۱- فرآیند تولید پنل‌های خورشیدی

اولین گام در تولید انرژی خورشیدی، تولید پنل‌های خورشیدی است که از سیلیکون به‌عنوان ماده اصلی استفاده می‌کنند. در این فرآیند، به‌ویژه در تولید پنل‌های فتوولتائیک سیلیکونی، مواد مختلفی مصرف می‌شود که باعث تولید پسماند، پساب و گازهای گلخانه‌ای می‌شود.

پسماندها و پساب‌ها در فرآیند تولید:

- **پسماندهای سیلیکونی:** تولید سیلیکون از مواد اولیه مانند سیلیکات‌های فلزی نیازمند فرآیندهای انرژی‌بر و تولید مواد زائد است. در این فرآیند، مواد شیمیایی سمی و فلزات سنگین مانند **کادمیوم** ممکن است به محیط زیست وارد شوند.

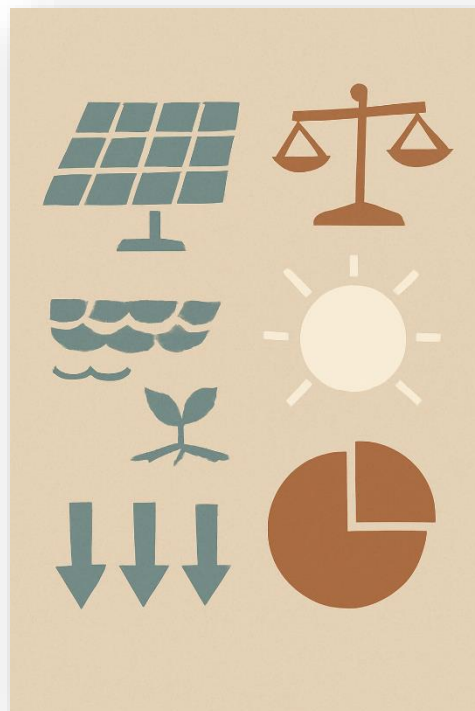
- **پساب‌های شیمیایی:** در تولید سلول‌های خورشیدی، استفاده از مواد شیمیایی خاص برای تمیزکاری و آماده‌سازی پنل‌ها ضروری است که این مواد در صورت مدیریت نشدن صحیح می‌توانند به آب‌های زیرزمینی نشت کرده و به آلودگی منابع آبی منجر شوند.
- **گازهای گلخانه‌ای:** تولید پنل‌های خورشیدی به انرژی زیادی نیاز دارد، و در صورتی که از منابع انرژی فسیلی برای تأمین این انرژی استفاده شود، می‌تواند به تولید گازهای گلخانه‌ای مانند **دی‌اکسید کربن (CO₂)** و **مونوکسید کربن** منجر شود.

مقدار گازهای گلخانه‌ای تولیدی در فرآیند تولید:

- براساس برخی مطالعات، تولید هر کیلووات ساعت برق از انرژی خورشیدی در مراحل تولید پنل‌ها به‌طور متوسط ۲۰۰ تا ۳۰۰ گرم CO₂ تولید می‌کند. بنابراین برای تولید ۱ مگاوات ظرفیت خورشیدی (که معادل ۱۰۰۰ کیلووات است)، در مجموع ممکن است حدود ۲۰۰,۰۰۰ تا ۳۰۰,۰۰۰ کیلوگرم CO₂ در فرآیند تولید پنل‌ها تولید شود.

۲- نصب نیروگاه خورشیدی

مرحله بعدی نصب پنل‌های خورشیدی است. این مرحله خود شامل نصب پنل‌ها، سیم‌کشی، ساختارهای نگهدارنده و تجهیزات جانبی است.



پسماندها و پساب‌ها در نصب:

- **پسماند ساخت و ساز:** در نصب پنل‌ها و ساخت زیرساخت‌های مربوطه، پسماندهایی مانند قطعات فلزی و پلاستیکی، جعبه‌های بسته‌بندی و باقی‌مانده‌های مواد مصرفی تولید می‌شود.
- **آلودگی‌های ناشی از حمل و نقل:** حمل و نقل پنل‌ها از کارخانه به محل نصب نیز باعث انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود، به‌ویژه اگر از وسایل نقلیه آلاینده استفاده شود.

۳- بهره‌برداری و تولید انرژی خورشیدی

پس از نصب سیستم‌های خورشیدی، این سیستم‌ها برق تولید می‌کنند و به شبکه توزیع انرژی وارد می‌شود. این مرحله به‌طور کلی تقریباً هیچ پسماند و گاز گلخانه‌ای تولید نمی‌کند و به همین دلیل، یکی از مزایای بزرگ انرژی خورشیدی نسبت به سایر منابع انرژی است.

پسماندها و پساب‌ها در بهره‌برداری:

- **پسماندهای نگهداری:** با گذر زمان، پنل‌ها ممکن است نیاز به تعمیرات یا نگهداری داشته باشند که می‌تواند منجر به تولید پسماندهای شیمیایی خاص مانند روغن‌ها، روان‌سازها و دیگر مواد مصرفی شود.
- **پساب‌های شست‌وشو:** در برخی مناطق، شست‌وشوی پنل‌ها برای حفظ عملکرد آن‌ها ضروری است. این فرآیند ممکن است به مصرف آب و تولید پساب‌های آلوده منتهی شود، به‌ویژه اگر مواد شیمیایی برای شست‌وشو استفاده شوند.

۴- پایان عمر پنل‌های خورشیدی

پنل‌های خورشیدی معمولاً عمر مفیدی بین ۲۰ تا ۳۰ سال دارند. پس از پایان عمر، پنل‌ها باید بازیافت یا دفع شوند.

پسماندها و پساب‌ها در پایان عمر:

- **پسماندهای شیمیایی:** در صورت عدم بازیافت صحیح پنل‌های خورشیدی، مواد شیمیایی سمی مانند **کادمیوم**، سرب و سایر فلزات سنگین می‌توانند وارد محیط زیست شوند.
- **فرآیند بازیافت:** بازیافت پنل‌های خورشیدی به‌ویژه پنل‌های سیلیکونی نیازمند فناوری‌های خاص است که خود ممکن است باعث تولید گازهای گلخانه‌ای و پسماند شود. اگر بازیافت به درستی انجام نشود، این پسماندها می‌توانند به آلودگی محیط‌زیست منجر شوند.



نتیجه‌گیری: در مجموع، تولید و نصب یک نیروگاه خورشیدی با ظرفیت ۱ مگاوات ممکن است به تولید پسماند، پساب، و گازهای گلخانه‌ای منجر شود. البته، پس از نصب، پنل‌های خورشیدی در طول بهره‌برداری خود تقریباً بدون آلودگی و گاز گلخانه‌ای هستند. به همین دلیل، نیاز به توسعه فناوری‌های بهتر برای کاهش اثرات منفی مراحل تولید، نصب و بازیافت پنل‌ها داریم. این تکنولوژی در مجموع به کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و کاهش آلودگی در بلندمدت کمک می‌کند، اما باید به مدیریت مناسب چرخه عمر آن‌ها توجه کنیم.

معرفی فناوری خورشیدی و مفاهیم ناترازی

۱- انواع پنل‌ها و فناوری‌های فتوولتائیک

(Solar Photovoltaic Technologies)

پنل‌های خورشیدی فتوولتائیک (PV) یکی از مهم‌ترین فناوری‌های تولید برق از انرژی خورشیدی هستند. این پنل‌ها از سلول‌های فتوولتائیک ساخته شده‌اند که با دریافت تابش نور خورشید، انرژی خورشیدی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. انواع مختلفی از پنل‌های خورشیدی وجود دارند که به لحاظ فناوری، عملکرد و کاربری تفاوت‌هایی دارند:

- **پنل‌های سیلیکونی مونوکریستالی (Monocrystalline Silicon Panels):** این پنل‌ها از سیلیکون خالص ساخته می‌شوند و به دلیل ساختار یکنواخت و کارایی بالا، بیشترین بازده را دارند. این پنل‌ها معمولاً در پروژه‌های بزرگ و سیستم‌های خانگی استفاده می‌شوند.

- **پنل‌های سیلیکونی پلی کریستالی (Polycrystalline Silicon Panels):** این پنل‌ها از سیلیکون ذوب‌شده ساخته می‌شوند و به نسبت پنل‌های مونوکریستالی هزینه کمتری دارند، اما بازده انرژی آن‌ها کمی پایین‌تر است. این پنل‌ها بیشتر برای کاربردهای وسیع و پروژه‌های بزرگ مناسب هستند.

- **پنل‌های فیلم نازک (Thin-Film Panels):**

این پنل‌ها به دلیل وزن سبک و انعطاف‌پذیری بالا، در شرایط خاص مانند سقف‌های منحنی یا فضاهای با محدودیت‌های ساختاری مفید هستند. اما معمولاً بازده کمتری دارند.

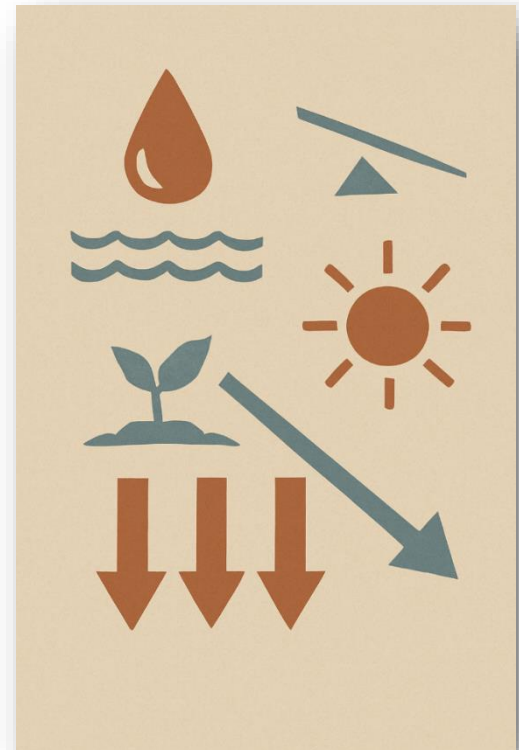
- **پنل‌های هتروژنی (Heterojunction Cells, HJT):**

فناوری نوینی که در آن از لایه‌های مختلف مواد استفاده می‌شود تا عملکرد بهتری را در جذب نور و تبدیل آن به انرژی الکتریکی فراهم کند.

- **پنل‌های با کارایی بالا (Bifacial Panels):**

این پنل‌ها قادر به جذب نور از هر دو طرف هستند و می‌توانند نور منعطف از زمین یا سطوح اطراف را نیز جذب کنند. این ویژگی باعث افزایش بازده در فضاهای خاص می‌شود.

در کنار این‌ها، **پنل‌های خورشیدی متمرکز (CSP)** برای استفاده در مناطق با تابش خورشید زیاد، طراحی شده‌اند که از آینه‌ها یا لنزهای مخصوص برای متمرکز کردن نور خورشید و تولید برق استفاده می‌کنند.



۲- ناترازی منابع انرژی، آب، خاک و تبعات آن

ناترازی منابع به معنای ناتوانی یا عدم تعادل میان مصرف منابع طبیعی و ظرفیت محیط زیست برای بازسازی یا جذب آن‌هاست. این بحران‌ها نه تنها منجر به فشار بر منابع طبیعی می‌شود، بلکه می‌تواند به مشکلات عمده زیست محیطی و اجتماعی منجر گردد. در زمینه انرژی خورشیدی، ناترازی‌ها در چهار بخش اصلی زیر مشاهده می‌شود:

• ناترازی منابع انرژی:

با افزایش مصرف جهانی انرژی، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، فشار بر منابع انرژی فسیلی افزایش یافته است. برای مقابله با این فشار، انرژی‌های تجدیدپذیر نظیر انرژی خورشیدی به‌عنوان یک راه‌حل پایدار پیشنهاد می‌شود. با این حال، توسعه بی‌رویه نیروگاه‌های خورشیدی بدون ارزیابی دقیق، می‌تواند مشکلات جدیدی در تأمین منابع آب و خاک ایجاد کند.

در راستای اثبات مفهوم «ناترازی منابع انرژی»، مراجع علمی و گزارش‌های معتبر بین‌المللی به وضوح نشان می‌دهند که افزایش تقاضای جهانی انرژی، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، در کنار کاهش منابع فسیلی و چالش‌های زیرساختی، منجر به بحران‌های انرژی و ناترازی در تأمین آن شده است. در ادامه، برخی از این منابع معتبر ارائه می‌شود:

• ناترازی منابع آب:

تولید و نصب پنل‌های خورشیدی در بسیاری از مناطق نیازمند مصرف زیاد آب برای شست‌وشو و تمیزکاری پنل‌ها است. در مناطقی با منابع آب محدود، این مسئله می‌تواند فشار بیشتری بر منابع آبی وارد کند. همچنین، در فرآیند تولید پنل‌ها، به‌ویژه در بخش‌های شیشه و مواد اولیه، مصرف آب زیاد است.

• ناترازی منابع خاک:

نصب پنل‌های خورشیدی به‌ویژه در زمین‌های کشاورزی یا مناطق طبیعی می‌تواند به تغییرات قابل توجهی در ریزاقلیم خاک (microclimate) و کاهش تنوع زیستی منجر شود. این تغییرات به‌ویژه در مناطقی با کمبود منابع آب یا زمین‌های حساس می‌تواند اثرات منفی جدی داشته باشد. در مناطق خشک، تغییرات در رطوبت خاک، دما و حتی کیفیت خاک می‌تواند به فرسایش و کاهش تولیدات کشاورزی منتهی شود.



توضیح تکمیلی: یکی از پیامدهای نصب پنل‌های فتوولتائیک (خورشیدی) در زمین‌های کشاورزی یا مناطق طبیعی، ایجاد تغییرات در ریزاقلیم (microclimate) زیر پنل‌ها است. این تغییرات ممکن است باعث رشد گیاهانی مثل گلسنگ، خزه یا حتی علف‌های مقاوم به سایه و رطوبت شود — اما بستگی به شرایط محلی و نوع نصب دارد.

جزئیات فنی و دلایل:

پنل‌های خورشیدی هنگام نصب بر روی زمین، بسته به زاویه و ارتفاع‌شان، شرایط متفاوتی را در زیر خود ایجاد می‌کنند:

۱- تغییر الگوی نور:

- زیر پنل‌ها نور کمتری دریافت می‌شود، اما این نور صفر نیست. نور پخش شده یا منعکس شده از خاک و سطح پنل همچنان وجود دارد.
- این نور می‌تواند برای گیاهان سایه‌پسند مناسب باشد.

۲- افزایش رطوبت نسبی زیر پنل‌ها:

- کاهش تابش مستقیم و تبخیر باعث نگه‌داشت بیشتر رطوبت خاک در زیر پنل‌ها می‌شود.
- این شرایط باعث رشد خزه‌ها، قارچ‌ها یا حتی جلبک‌ها در برخی مناطق می‌شود.

۳- تغییر دمای سطحی:

- سطح پنل‌ها گرم می‌شود، اما زیر آن‌ها دمای خاک ممکن است خنک‌تر بماند، مگر اینکه جریان هوای مناسبی نباشد.
 - بسته به شرایط نصب، ممکن است دمای نقطه‌ای در زیر پنل‌ها بالاتر برود، اما معمولاً به دلیل سایه، میانگین دما کمتر از مناطق آفتابی است.
- نتیجه‌گیری: افزایش رشد گیاهان خاص یا "گل‌سنگ"‌ها زیر پنل‌های خورشیدی ممکن است رخ دهد، اما علت اصلی آن معمولاً افزایش رطوبت و کاهش نور مستقیم است، نه گرمای تابشی پنل‌ها.

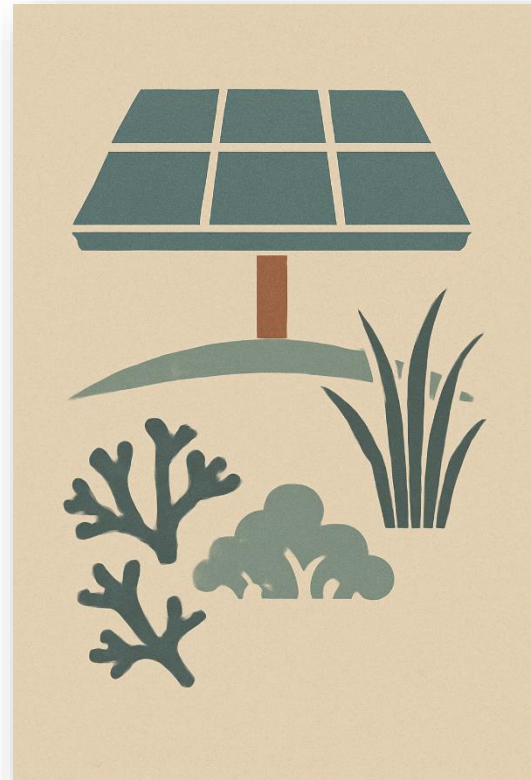
اگر بررسی اثرات محیط‌زیستی نصب پنل‌های فتوولتائیک است، می‌توان به موارد زیر هم اشاره کرد:

- بهبود نگهداری رطوبت خاک
- امکان ترکیب با کشت خورشیدی (agrivoltaics)
- کاهش فرسایش خاک
- اما در مقابل، احتمال تغییر ترکیب اکولوژیک منطقه نیز وجود دارد



تحلیل محیط‌زیستی نصب پنل فتوولتائیک

۱. موقعیت جغرافیایی (استان، شهرستان یا مختصات حدودی):
 - برای تعیین اقلیم، شدت تابش خورشید، میزان بارندگی و دمای میانگین.
۲. نوع زمین (کشاورزی، بیابانی، مرتعی، صنعتی و ...):
 - آیا قبلاً زیر کشت بوده یا کاربری طبیعی داشته است؟
۳. نوع نصب پنل‌ها:
 - ثابت (fixed) یا گردان (tracking)
 - زاویه و ارتفاع پنل‌ها از سطح زمین چقدر است؟
۴. اندازه سطح تحت پوشش پنل‌ها:
 - در هکتار یا مترمربع.
۵. نوع خاک و پوشش گیاهی موجود قبل از نصب:
 - مثلاً خاک رسی، شنی، قهوه‌ای و ... + آیا گیاهی وجود داشته؟



۶. آب‌وهوای عمومی منطقه:

- خشک، نیمه‌خشک، مرطوب یا کوهستانی؟

۷. هدف شما از نصب:

- فقط تولید برق؟
- یا ترکیب با کشاورزی (agrivoltaics)؟

∞

یک مثال و نمونه:

در منطقه فولادشهر (استان اصفهان، محدوده فولاد مبارکه) که اقلیمی نیمه‌خشک تا خشک دارد، نصب پنل‌های فتوولتائیک احتمالاً باعث افزایش نگره‌داشت رطوبت در خاک زیر پنل‌ها، کاهش دمای سطحی خاک، و تغییر ترکیب پوشش گیاهی موضعی می‌شود. همچنین ممکن است زمینه‌ای برای رشد گیاهان سایه‌پسند و مقاوم به خشکی فراهم شود.

تحلیل دقیق بر اساس مشخصات منطقه فولادشهر:

۱- اقلیم:

- نیمه خشک، بارش کم، تبخیر بالا، تابش خورشید زیاد.
- خاک‌ها اغلب آهکی یا رسی با زهکشی متوسط تا ضعیف.

۲- تأثیر نصب پنل‌ها بر خاک:

مورد	اثر
رطوبت خاک	سایه پنل‌ها تبخیر را کاهش می‌دهد → خاک زیر پنل‌ها رطوبت بیشتری نگه می‌دارد. در مناطق کم‌باران مثل فولادشهر، این رطوبت نسبی می‌تواند محسوس باشد.
دما	دمای خاک زیر پنل‌ها در روز کمتر می‌شود (به دلیل سایه)، اما در شب ممکن است اختلاف دمای شدیدی با اطراف ایجاد شود.
فرسایش بادی	پنل‌ها می‌توانند تا حدودی جلوی فرسایش بادی سطح خاک را بگیرند، مخصوصاً اگر زمین برهنه باشد.
پوشش گیاهی جدید	گیاهانی که نیاز به نور زیاد ندارند یا به رطوبت حساس نیستند (مثل برخی علف‌های مقاوم یا خزه‌ها) ممکن است زیر پنل‌ها ظاهر شوند. در مناطق صنعتی، گل‌سنگ‌ها و جلبک‌های خاکی هم ممکن است رشد کنند.
آلودگی حرارتی یا شیمیایی؟	اگر پنل‌ها در نزدیکی فعالیت‌های صنعتی فولاد باشند، گرد و غبار صنعتی یا آلودگی‌های هوا ممکن است به مرور زمان بر خاک بنشینند، اما این اثر مستقیم نصب پنل نیست، بلکه اثر مجاورت با صنعت است.

⚠ نکات مهم:

- در منطقه‌ای مثل فولادشهر، استفاده از پنل‌ها به عنوان سایه‌ساز برای پوشش گیاهی خاص یا کشت خورشیدی (agrivoltaics) می‌تواند کاربردی باشد.
- برای جلوگیری از رشد گیاهان ناخواسته زیر پنل‌ها (که ممکن است در سیستم‌های صنعتی مشکل ساز شوند)، معمولاً از آستر ژئوتکستایل یا شن‌ریزی کف استفاده می‌شود.
- نصب پنل‌های بلندتر از ۱ متر از سطح زمین، باعث جریان بهتر هوا و کاهش تجمع گرما و رطوبت می‌شود.

9

نقد علمی و زیست محیطی

۱- رشد گیاه زیر پنل ≠ احیای اکوسیستم

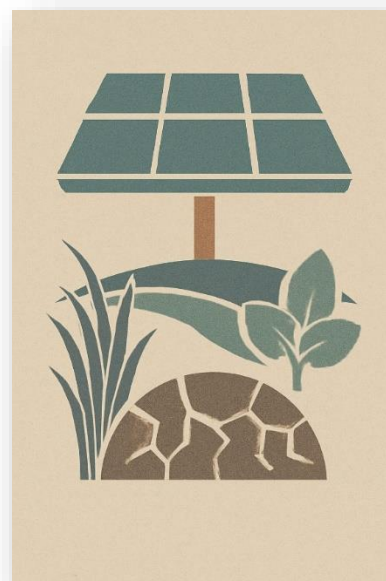
- پنل خورشیدی با ایجاد سایه، فقط شرایط رطوبتی و نوری جدیدی فراهم می‌کند. بله، گیاهانی مثل خزه، گل‌سنگ، یا علف‌های سایه‌پسند ممکن است رشد کنند، اما این‌ها:

- تنوع زیستی پایین‌تری دارند نسبت به پوشش طبیعی بومی منطقه.
- معمولاً گیاهان فرصت‌طلب هستند که جایگزین اکوسیستم اصلی نمی‌شوند.
- ممکن است تهاجمی یا بی‌مصرف از نظر اکولوژیک باشند.

۲- قطع ارتباط خاک با اکوسیستم طبیعی

- نصب پنل‌ها در سطح وسیع باعث:

- قطع چرخه‌های طبیعی نوری و آبی خاک
- کاهش فعالیت میکروبی خاک
- اختلال در زیستگاه جانوران کوچک (حشرات، خزندگان، پرندگان زمینی) می‌شود.



۳- اثر جزیره گرمایی معکوس (Reverse heat island)

- در روز، سایه باعث کاهش دمای سطح خاک می‌شود.
- اما در شب، ساختار فلزی پنل‌ها گرما را آزاد می‌کند → تغییر در ریتم دمایی طبیعی خاک و هوا که می‌تواند برای گونه‌های بومی مضر باشد.

۴- استفاده از مصالح مهندسی‌شده برای کنترل رشد گیاه

- در بسیاری از سایت‌های صنعتی، برای کنترل رشد گیاه از مواردی مثل:
 - ژئوتکستایل‌ها
 - مواد شیمیایی ضد علف
 - شن‌ریزی و آسفالت جزئی
- استفاده می‌شود → این باعث مرگ کامل پوشش گیاهی طبیعی و تبدیل خاک به زیست‌ناپذیر می‌شود.

۵- آثار غیرمستقیم بر تنوع زیستی منطقه

- وقتی زمین به انرژی خورشیدی اختصاص می‌یابد:
 - مسیر عبور حیات وحش قطع می‌شود.
 - محیط ناهمخوان با نیاز پرندگان یا حشرات گرده‌افشان ایجاد می‌شود.
 - تشکیل اکوسیستم مصنوعی کم‌تنوع و ناپایدار رخ می‌دهد.
- ✅ نتیجه‌گیری انتقادی: رشد گیاه زیر پنل لزوماً نشانه بازگشت طبیعت نیست، بلکه گاهی نشانه یک اکوسیستم مصنوعی و ناقص است که توان پشتیبانی از چرخه‌های زیستی طبیعی را ندارد.

منابع علمی و گزارش‌های معتبر

برای اثبات مفهوم «ناترازی منابع آب»، مراجع علمی و گزارش‌های معتبر بین‌المللی به وضوح نشان می‌دهند که افزایش تقاضای جهانی آب، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، در کنار کاهش منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی، منجر به بحران‌های آب و ناترازی در تأمین آن شده است. در ادامه، برخی از این منابع معتبر ارائه می‌شود:

1. IEA (International Energy Agency) – Solar PV and the Environment

این گزارش از آژانس بین‌المللی انرژی به بررسی تأثیرات زیست‌محیطی انرژی خورشیدی می‌پردازد و اشاره دارد که توسعه بی‌رویه نیروگاه‌های خورشیدی بدون ارزیابی مناسب می‌تواند به مشکلات جدیدی در زمینه مصرف آب و استفاده از اراضی کشاورزی منتهی شود.

- لینک به گزارش: [IEA - Solar PV and the Environment](#)

2. UCS (Union of Concerned Scientists) – Environmental Impacts of Solar Power

گزارش UCS نشان می‌دهد که اگرچه انرژی خورشیدی از لحاظ تولید انرژی پاک است، اما نصب نیروگاه‌های خورشیدی در مناطق خاص مانند زمین‌های کشاورزی می‌تواند منجر به تغییرات اکولوژیکی، کاهش تنوع زیستی، و آسیب به خاک و منابع آبی شود.

- لینک به گزارش: [UCS - Environmental Impacts of Solar Power](#)

3. Paper by M. S. Islam et al. (2020) – Environmental impacts of large-scale solar photovoltaic power plants in arid regions: A review

این مقاله علمی اثرات زیست‌محیطی نصب نیروگاه‌های خورشیدی در مناطق خشک و نیمه‌خشک را بررسی کرده و به چالش‌هایی مانند تغییرات در ریزاقلیم و فشار بر منابع آبی اشاره می‌کند.

- لینک به مقاله: [Environmental impacts of large-scale solar photovoltaic power plants](#)

4. Journal of Environmental Management (2019) – The impact of solar energy development on the environment and land use

این مقاله اثرات توسعه انرژی خورشیدی بر محیط‌زیست و استفاده از زمین را بررسی کرده و به خطرات بالقوه در مورد تغییرات اکولوژیکی و رقابت با زمین‌های کشاورزی اشاره می‌کند.

- لینک به مقاله: [The impact of solar energy development on the environment and land use](#)

5. ResearchGate – Environmental implications of solar PV installations on agricultural land

این مطالعه بررسی می‌کند که چگونه نصب پنل‌های خورشیدی بر اراضی کشاورزی می‌تواند اثرات متفاوتی بر خاک و آب داشته باشد، از جمله کاهش توان تولیدی خاک و افزایش نیاز به منابع آبی برای نگهداری نیروگاه‌ها.

- لینک به مقاله: [Environmental implications of solar PV installations](#)

6. National Renewable Energy Laboratory (NREL) – Land Use in the Development of Solar Energy

این گزارش از NREL بر چالش‌های مرتبط با استفاده از زمین برای نصب پنل‌های خورشیدی تأکید دارد و اینکه چگونه باید از اراضی کشاورزی یا زیست‌محیطی برای چنین پروژه‌هایی به‌طور بهینه استفاده کرد.

- لینک به گزارش: [NREL - Land Use in the Development of Solar Energy](#)

نتیجه‌گیری، مراجع علمی و مقالات بین‌المللی به‌طور واضح نشان می‌دهند که توسعه بی‌رویه و بدون ارزیابی دقیق نیروگاه‌های خورشیدی می‌تواند به مشکلات جدیدی در تأمین منابع آب و خاک منجر شود. لذا ضروری است که پیش از اقدام به توسعه نیروگاه‌های خورشیدی، ارزیابی‌های دقیق زیست‌محیطی و مدیریت منابع به‌صورت جامع و پایدار انجام شود.

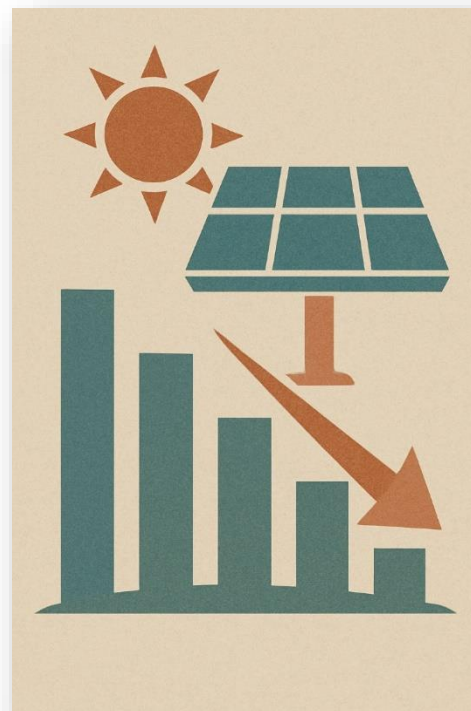
کاهش راندمان پنل‌های خورشیدی در گذر زمان

پنل‌های خورشیدی فتوولتائیک (PV) به‌طور کلی به مدت طولانی قادر به تولید انرژی هستند، اما میزان راندمان آن‌ها با گذر زمان کاهش می‌یابد. این کاهش راندمان به‌طور معمول به‌صورت تدریجی است و تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار می‌گیرد. کاهش راندمان پنل‌های خورشیدی به عوامل مختلفی از جمله پیرشدگی، آسیب‌های فیزیکی، تغییرات دمایی، و تأثیرات محیطی بستگی دارد.

دلایل کاهش راندمان پنل‌های خورشیدی:

مقدار کاهش راندمان:

مطالعات مختلف نشان می‌دهند که میانگین کاهش راندمان در پنل‌های خورشیدی بین ۰.۵٪ تا ۱٪ (در برخی از مراجع ۰.۳ تا ۰.۸ درصد و در برخی مراجع ۱/۵ تا ۲ درصد قید شده است. دلیل این اختلافها در کیفیت پنل‌های خورشیدی است) تا در سال است. برای مثال، در یک دوره ۲۰ ساله، ممکن است راندمان یک پنل خورشیدی حدود ۱۰٪ تا ۲۰٪ و حتی برخی از پنل‌ها تا ۴۰ درصد کاهش یابد، بسته به کیفیت پنل و شرایط محیطی.



۱. پیرشدگی طبیعی:

پنل‌های خورشیدی به‌طور طبیعی تحت تأثیر تابش UV، گرما، و تنش‌های حرارتی قرار می‌گیرند. این عوامل موجب تغییرات شیمیایی در مواد تشکیل‌دهنده پنل‌ها می‌شود که به کاهش عملکرد آن‌ها منجر می‌شود. به‌طور معمول، راندمان پنل‌ها به‌طور متوسط سالانه بین ۰.۵٪ تا ۱٪ کاهش می‌یابد.

۲. تغییرات دمایی و شوک‌های حرارتی:

تغییرات دمایی ناگهانی می‌تواند به‌ویژه در مناطق گرمسیری یا با نوسانات دمایی شدید موجب ترک‌خوردگی مواد پنل و آسیب به سلول‌ها شود. همچنین، این نوسانات می‌توانند باعث شکستن اتصالات درون پنل یا ایجاد شکاف‌هایی در شیشه پنل‌ها شوند.

۳. آسیب فیزیکی:

عوامل محیطی مانند گرد و غبار، باران‌های اسیدی، یا حتی تگرگ می‌توانند به سطح پنل آسیب برسانند و به کاهش عملکرد آن‌ها کمک کنند.

۴. آسیب ناشی از رطوبت:

نفوذ رطوبت به پنل‌ها، به‌ویژه در مناطق مرطوب، می‌تواند باعث خوردگی اجزای داخلی پنل و کاهش طول عمر آن‌ها شود. این امر به‌ویژه در شرایطی که کیفیت مواد اولیه پایین باشد، خطرناک‌تر است.

۵. پدیده (PID (Potential Induced Degradation :

این پدیده که معمولاً در پنل‌های خورشیدی با ولتاژ بالاتر اتفاق می‌افتد، می‌تواند موجب کاهش کارایی پنل‌ها شود. در این پدیده، اختلاف پتانسیل میان قاب و سلول‌ها باعث افت کارایی در طول زمان می‌شود.

⚠️ دلایل آسیب دیدگی یا کاهش عملکرد پنل‌ها

علت	توضیح
پیرشدگی طبیعی	افت تدریجی عملکرد به دلیل تابش UV، گرما و تنش‌های حرارتی؛ معمولاً سالیانه ۰.۵٪ تا ۱٪ کاهش.
رطوبت و نفوذ آب	نفوذ آب در مناطق مرطوب باعث خوردگی داخلی و کاهش ایمنی می‌شود.
گرمای بیش از حد و شوک حرارتی	تغییرات دمایی ناگهانی موجب ترک خوردگی یا از بین رفتن اتصالات می‌شود.
آسیب فیزیکی	تگرگ، باد یا سقوط اشیاء می‌تواند شیشه پنل را بشکند.
نقص در اتصالات یا اینورتر	اتصالات اکسید یا شل می‌شوند؛ خرابی اینورترها نیز عملکرد کلی را مختل می‌کند.
پدیده PID	افت ناگهانی کارایی ناشی از ولتاژ بالا و اختلاف پتانسیل بین سلول و قاب پنل.

پیامدهای زیست محیطی انرژی خورشیدی در مناطق خشک

ردیف	محور	توضیحات	چالش و اثرات منفی
۱	پساب و مدیریت آب	شست و شوی دوره‌ای پنل‌ها نیازمند آب فراوان است، مخصوصاً در مناطق خشک.	فشار بر منابع آب زیرزمینی، افزایش برداشت غیرمجاز آب، تخلیه پساب با ذرات ریز روی خاک
۲	انتشار گازهای گلخانه‌ای غیرمستقیم	تولید، حمل و نقل و نصب پنل‌ها با مصرف انرژی بالا همراه است.	انتشار CO ₂ در زنجیره تأمین، وابستگی به معادن کمیاب با آلاینده‌ی بالا
۳	اثر بر خاک و ریزاقليم Microclimate	سایه‌سازی موضعی باعث افزایش رطوبت نسبی، کاهش دمای روز و اختلال در ریتم دمایی طبیعی خاک می‌شود.	رشد پوشش گیاهی ناسازگار، توقف چرخه تنفس خاک، کاهش تنوع میکروارگانیسم‌های خاک
۴	تنوع زیستی و حیات وحش	نصب پنل‌ها باعث قطع مسیرهای زیستی می‌شود.	کاهش گونه‌های گرده‌افشان، اختلال در مسیر کوچ پرندگان، ایجاد اکوسیستم مصنوعی کم‌تنوع
۵	مواد و پسماندهای صنعتی	پنل‌ها عمر محدودی دارند و بازیافت‌شان دشوار و گران است.	تولید زباله الکترونیکی، فلزات سنگین، تهدید خاک در پایان عمر پنل‌ها

پیامدهای زیست محیطی انرژی خورشیدی در مناطق مرطوب

ردیف	محور	توضیحات	چالش و اثرات منفی
۱	پساب و آب مازاد	بارش‌های مکرر نیاز به شست‌وشو را کم می‌کند، اما زهکشی ناکافی در محل نصب پنل می‌تواند مشکل‌ساز شود	تجمع آب، فرسایش موضعی خاک، گندیدگی ریشه گیاهان بومی
۲	تأثیر بر پوشش گیاهی بومی	سایه‌سازی باعث حذف یا تضعیف گونه‌های بومی نورپسند می‌شود.	رقابت گونه‌های فرصت‌طلب، کاهش تنوع گیاهی، تخریب گیاهان جنگلی
۳	تغییر در زیستگاه‌ها	نصب پنل باعث تغییر ریزاقلیم و دمای سطحی خاک می‌شود.	فرار پرندگان و دوزیستان، قطع مسیر حرکت حیات وحش، کاهش گرده‌افشانی طبیعی
۴	اثر بر میکرو ارگانیسم‌های خاک	خاک مرطوب و سایه‌دار مستعد تغییر بافت زیستی است.	رشد قارچ‌ها و میکروبیوم غیرمفید، افت کیفیت خاک کشاورزی
۵	تضاد با کاربری جنگلی	زمین‌های کشاورزی یا جنگلی به کاربری انرژی تبدیل می‌شوند.	از دست رفتن قابلیت کشاورزی، تهدید گونه‌های وابسته به اکوسیستم طبیعی

 چه زمانی تعویض پنل ضروری است؟

نشانه	توضیح
افت شدید بازده	وقتی عملکرد به زیر ۷۰٪ برسد، دیگر از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست.
ترک یا شکست فیزیکی	باعث ورود رطوبت و خطر برق‌گرفتگی می‌شود.
دفرمه شدن قاب یا اتصالات	باعث اختلال در چینش یا نایمینی سازه‌ای می‌شود.
افزایش هزینه نگهداری	زمانی که تعمیرات بیش از تولید اقتصادی ارزش داشته باشد.

مراجع علمی اثبات کاهش راندمان پنل‌های خورشیدی:

1. National Renewable Energy Laboratory (NREL) – Long-term Performance of Photovoltaic Systems

- در این گزارش، NREL به بررسی کاهش راندمان پنل‌های خورشیدی در گذر زمان پرداخته است و نتیجه گرفته است که پنل‌ها به‌طور متوسط در هر سال ۰.۵٪ تا ۱٪ کاهش راندمان دارند. این کاهش به دلیل تأثیرات طولانی‌مدت تابش خورشیدی، گرما، و آسیب‌های محیطی است.

- لینک به گزارش: [NREL - Long-term Performance](#)

2. Journal of Renewable and Sustainable Energy – Degradation Rates of Photovoltaic Modules

- این مقاله به بررسی نرخ‌های تخریب پنل‌های خورشیدی و علل مختلف کاهش راندمان آن‌ها پرداخته است. یافته‌ها نشان می‌دهد که علل مختلفی از جمله شرایط محیطی و تغییرات دمایی می‌توانند به کاهش راندمان در گذر زمان منجر شوند.

- لینک به مقاله: [Degradation Rates of Photovoltaic Modules](#)

3. Solar Energy – Degradation of Solar Modules

- در این مقاله علمی که در مجله "Solar Energy" منتشر شده است، به ارزیابی کاهش راندمان پنل‌های خورشیدی و عوامل مختلف مؤثر در آن پرداخته شده است. نویسندگان این مقاله به تأثیرات طولانی‌مدت نور خورشید و دما بر مواد پنل‌ها اشاره کرده‌اند.

- لینک به مقاله: [Degradation of Solar Modules](#)

۴. Renewable Energy World – Photovoltaic Module Degradation

- در این مقاله، نویسندگان به جزئیات پیرامون پدیده PID و تأثیرات آن بر کاهش راندمان پنل‌ها پرداخته‌اند. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که در شرایط خاص، کاهش راندمان می‌تواند بیشتر از ۱٪ در سال باشد.

- لینک به مقاله: [Photovoltaic Module Degradation](#)

۵. SolarPower Europe – Annual Photovoltaic Report

- این گزارش به طور کلی به روند توسعه انرژی خورشیدی و تأثیرات آن بر محیط‌زیست و بهره‌وری اقتصادی پرداخته است. این گزارش نیز به کاهش راندمان پنل‌ها در گذر زمان به‌ویژه در پروژه‌های بزرگ اشاره می‌کند.

- لینک به گزارش: [SolarPower Europe - Annual Report](#)

نتیجه‌گیری: کاهش راندمان پنل‌های خورشیدی در گذر زمان یک پدیده طبیعی است که به عوامل مختلفی از جمله تابش UV، گرما، آسیب‌های فیزیکی و رطوبت بستگی دارد. بر اساس گزارش‌های علمی معتبر، این کاهش راندمان به‌طور متوسط سالانه بین ۰.۵٪ تا ۱٪ (اختلاف در نوع پنلهایی است که بررسی شده‌اند) است. برای جلوگیری از تأثیرات منفی آن، نگهداری مناسب و ارزیابی‌های منظم سیستم‌های خورشیدی ضروری است.

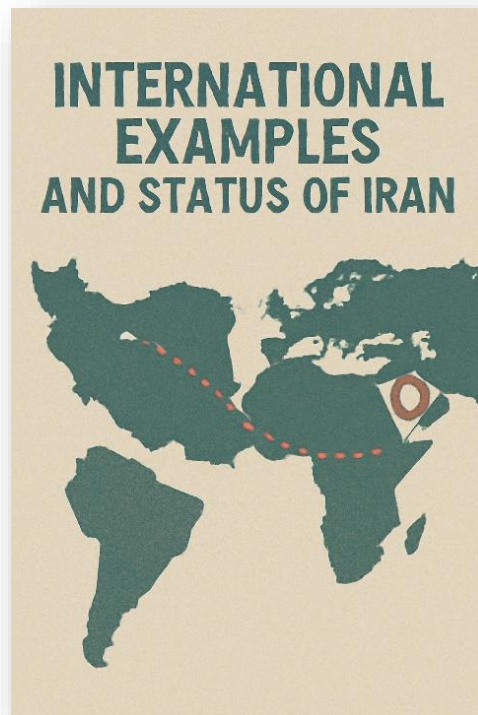
مثال‌های بین‌المللی و وضعیت ایران

مثال‌های بین‌المللی:

- در آلمان، یکی از پیشگامان در استفاده از انرژی خورشیدی، به دلیل ظرفیت بالای نصب پنل‌ها، نگرانی‌هایی در مورد اثرات آن‌ها بر تنوع زیستی و منابع آب ایجاد شده است. این کشور با به‌کارگیری فناوری‌های جدید و راه‌حل‌های ابتکاری مانند کشت خورشیدی (Agrivoltaics)، در تلاش است تا این چالش‌ها را کاهش دهد.
- در چین، با توجه به سرعت بالای رشد پروژه‌های خورشیدی، به ویژه در مناطق بیابانی، نگرانی‌هایی در مورد تأثیرات زیست‌محیطی از جمله تغییرات اکولوژیک و تهدید تنوع زیستی وجود دارد. پروژه‌های مختلفی برای کاهش این اثرات و استفاده از زمین‌های بی‌استفاده در حال انجام است.

وضعیت ایران:

ایران با دارا بودن تابش خورشیدی بسیار بالا در بسیاری از مناطق، پتانسیل زیادی برای توسعه انرژی خورشیدی دارد. اما استفاده گسترده از این انرژی می‌تواند به ناترازی‌های جدید در منابع آب، خاک و کشاورزی منتهی شود. در مناطقی مانند سیستان و بلوچستان یا خوزستان، که با کمبود منابع آبی مواجه هستند، توسعه بی‌ملاحظه نیروگاه‌های خورشیدی می‌تواند فشار بیشتری به منابع آبی وارد کند. همچنین، مشکلاتی مانند فرسایش خاک در مناطق خشک و بیابانی نیز ممکن است تشدید شود.



درک دقیقی از اهمیت فناوری خورشیدی، چالش‌های مرتبط با ناترازی منابع و ضرورت ارزیابی همه‌جانبه اثرات جانبی نصب نیروگاه‌های خورشیدی بدهد. به‌عنوان پایه‌ای برای آشنایی با راهکارهای عملیاتی و فن‌آوری‌های نوین در زمینه مدیریت منابع طبیعی و انرژی خورشیدی عمل کند. کشورهای پیشرفته با وجود سرمایه‌گذاری‌های کلان در حوزه انرژی خورشیدی، به خوبی از چالش‌ها و مشکلات این تکنولوژی آگاه هستند و در حال مدیریت و حل آن‌ها به روش‌های مختلف هستند. در اینجا به تفصیل توضیح می‌دهیم که چگونه این کشورها این چالش‌ها را مدیریت می‌کنند:

۱. کاهش راندمان پنل‌های خورشیدی در گذر زمان:

یکی از چالش‌های اصلی انرژی خورشیدی کاهش تدریجی راندمان پنل‌ها در گذر زمان است. معمولاً راندمان پنل‌های خورشیدی به طور متوسط سالانه بین ۰.۳٪ تا ۰.۸٪ کاهش (توضیحات در قبل آمده است که چرا اعداد همسان نیستند) می‌یابد. کشورهای پیشرفته و شرکت‌های بزرگ انرژی در حال اتخاذ رویکردهایی برای کاهش این نرخ کاهش راندمان و افزایش طول عمر پنل‌ها هستند:

- **پیشرفت‌های فناوری:** کشورهای پیشرفته به طور مداوم در حال سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه (R&D) برای بهبود فناوری‌های پنل‌های خورشیدی هستند. این شامل ارتقای مواد سلول‌های خورشیدی مانند سیلیکون، بهبود ساختار پنل‌ها، و استفاده از تکنولوژی‌های نوین برای کاهش اثرات محیطی و افزایش طول عمر پنل‌ها است.
- **ارزیابی و نگهداری منظم:** شرکت‌های فعال در این حوزه در کشورهای پیشرفته، سیستم‌های نظارت و ارزیابی دقیقی را برای شناسایی مشکلات و انجام تعمیرات و نگهداری‌های لازم روی پنل‌ها پیاده‌سازی کرده‌اند. این اقدامات می‌تواند به‌طور قابل توجهی کاهش راندمان را کند کند.

۲. مدیریت پسماند و پساب:

یکی از چالش‌های اصلی دیگر در صنعت انرژی خورشیدی، مدیریت پسماندها و پساب‌هایی است که در فرآیند تولید پنل‌های خورشیدی ایجاد می‌شود. تولید پنل‌های خورشیدی، به‌ویژه پنل‌های سیلیکونی، شامل استخراج مواد معدنی، انرژی بر، و تولید پسماند است. این پسماندها می‌توانند شامل گازهای گلخانه‌ای و مواد شیمیایی خطرناک باشند.

چگونه کشورهای پیشرفته این چالش‌ها را حل می‌کنند؟

- **بازیافت پنل‌های خورشیدی:** یکی از رویکردهای مهم برای کاهش اثرات منفی پسماندهای پنل‌های خورشیدی، ایجاد فرآیندهای بازیافت به‌ویژه برای پنل‌های قدیمی و فرسوده است. در بسیاری از کشورهای پیشرفته، قوانینی برای بازیافت پنل‌های خورشیدی وضع شده است که به‌طور ویژه بر بازیافت مواد شیمیایی، فلزات سنگین و شیشه پنل‌ها تأکید دارد.
 - به عنوان مثال، در اتحادیه اروپا، سیستم WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment) برای بازیافت پنل‌های خورشیدی طراحی شده است.
- **استفاده از تکنولوژی‌های سبز در فرآیند تولید:** کشورهای پیشرفته به سمت استفاده از تکنولوژی‌های تولید پاک و کم‌پسماند حرکت کرده‌اند. این شامل استفاده از مواد بازیافتی برای ساخت پنل‌ها و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در فرآیند تولید است تا کاهش اثرات زیست‌محیطی را به حداقل برساند.

۳. انتشار گازهای گلخانه‌ای در فرایند تولید:

همانطور که می‌دانیم، تولید پنل‌های خورشیدی نیز گازهای گلخانه‌ای مانند CO₂ تولید می‌کند. این چالش برای تولید و فرآیندهای مرتبط با انرژی خورشیدی وجود دارد، به‌ویژه در مراحل اولیه تولید پنل‌ها.

چگونه کشورهای پیشرفته این چالش را مدیریت می‌کنند؟

- کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در فرایند تولید: یکی از راه‌های حل این مشکل، بهینه‌سازی فرآیندهای تولید پنل‌های خورشیدی است. بسیاری از کشورها به سمت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در مراحل مختلف تولید پنل‌ها (از جمله کارخانه‌های تولید پنل‌های خورشیدی) حرکت کرده‌اند. این به کاهش میزان گازهای گلخانه‌ای در فرآیند تولید کمک می‌کند.
 - به عنوان مثال، چین، که بزرگ‌ترین تولیدکننده پنل‌های خورشیدی جهان است، به طور فزاینده‌ای به استفاده از انرژی خورشیدی و بادی برای تأمین انرژی کارخانه‌های خود روی آورده است.

- استانداردها و سیاست‌های زیست‌محیطی: کشورهای پیشرفته برای کاهش اثرات منفی تولید انرژی خورشیدی، استانداردهای زیست‌محیطی خاصی را در نظر گرفته‌اند. این استانداردها به طور خاص بر انتشار گازهای گلخانه‌ای، استفاده از مواد کم‌اثر و بهبود بهره‌وری انرژی در کارخانه‌ها تأکید دارند.
 - برای مثال، آلمان از تکنولوژی‌های نوینی مانند سلیکون‌های پایدار و روش‌های جدید تولید پنل خورشیدی به طور خاص استفاده می‌کند.

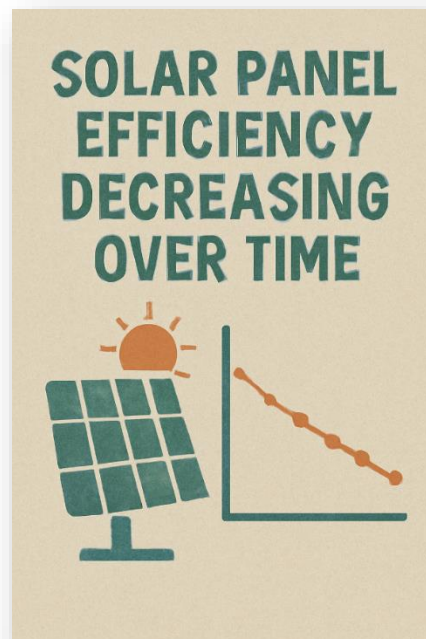
۴. مدیریت چرخه عمر پنل‌های خورشیدی:

چرخه عمر پنل‌های خورشیدی به طور کلی از مراحل مختلفی شامل تولید، نصب، بهره‌برداری و بازیافت تشکیل می‌شود. کشورهای پیشرفته برای مدیریت این چرخه عمر و کاهش اثرات زیست‌محیطی آن، اقدامات مختلفی انجام می‌دهند.

چگونه کشورهای پیشرفته این فرآیند را مدیریت می‌کنند؟

- مدیریت کامل چرخه عمر: کشورهای پیشرفته به دنبال مدیریت کامل چرخه عمر پنل‌های خورشیدی هستند. این شامل بازیافت پنل‌ها در انتهای عمر مفید آن‌ها، طراحی برای تعمیر و نگهداری آسان، و به کارگیری فن‌آوری‌های نوین برای افزایش طول عمر و کاهش اثرات زیست‌محیطی است.
- طراحی پنل‌های قابل بازیافت: برخی از کشورها، مانند آلمان و سوئیس، در حال طراحی پنل‌های خورشیدی هستند که تماماً قابل بازیافت باشند. این طراحی‌ها باعث می‌شود که در پایان عمر پنل‌ها، بتوان مواد خام را دوباره استخراج کرد و استفاده مجدد از آن‌ها در فرآیندهای تولید پنل‌های جدید ممکن شود.

نتیجه‌گیری: اگرچه انرژی خورشیدی با چالش‌هایی مانند کاهش راندمان، پسماندهای تولیدی و گازهای گلخانه‌ای همراه است، کشورهای پیشرفته با استفاده از فن‌آوری‌های نوین، استانداردهای زیست‌محیطی سختگیرانه و روش‌های بهینه تولید در حال مدیریت این مشکلات و کاهش اثرات منفی آن‌ها هستند. سرمایه‌گذاری‌های کلان در تحقیق و توسعه و تلاش برای ساخت یک چرخه عمر پایدار برای انرژی خورشیدی، کشورها را قادر می‌سازد تا به استفاده از این منبع انرژی تجدیدپذیر ادامه دهند و در عین حال اثرات منفی آن را به حداقل برسانند.



گزارشات تکمیلی:

۱. گزارش آژانس بین‌المللی انرژی – (IEA) بحران جهانی انرژی
این گزارش بیان می‌کند که بحران جهانی انرژی به دلیل افزایش تقاضای انرژی پس از پاندمی COVID-19 و جنگ‌ها، به‌ویژه جنگ اوکراین، به یک بحران جهانی تبدیل شده است. افزایش قیمت گاز طبیعی و نفت، کاهش تولید برق در برخی کشورها، و افزایش فقر انرژی از جمله پیامدهای این بحران هستند.
۲. گزارش – Sweco Group محدودیت‌های انرژی‌های تجدیدپذیر
این گزارش به چالش‌های موجود در توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر می‌پردازد و بر لزوم توسعه زیرساخت‌های انتقال برق و شبکه‌های هوشمند برای مقابله با ناترازی منابع انرژی تأکید می‌کند.
۳. مقاله Zeinalzadeh و همکاران – هزینه‌های عدم تعادل در بازار برق
این مقاله به بررسی هزینه‌های عدم تعادل در بازار برق می‌پردازد و نشان می‌دهد که افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند به افزایش قیمت‌های بازار برق و ایجاد عدم تعادل در تأمین انرژی منجر شود.
۴. گزارش – IEA محدودیت‌های مواد معدنی حیاتی در انتقال انرژی
این گزارش به محدودیت‌های موجود در تأمین مواد معدنی حیاتی برای فناوری‌های انرژی پاک اشاره می‌کند و بر لزوم تنوع منابع تأمین این مواد برای جلوگیری از بحران‌های تأمین انرژی تأکید دارد.

منابع علمی و گزارش‌های معتبر

۱. گزارش سازمان ملل متحد – بحران جهانی آب (2023)
این گزارش بیان می‌کند که بین دو تا سه میلیارد نفر در جهان حداقل یک ماه در سال با کمبود آب مواجه هستند که این کمبودها در دهه‌های آینده، به‌ویژه در شهرها، تشدید خواهد شد. همچنین، پیش‌بینی می‌شود که جمعیت شهری در معرض کمبود آب از ۹۳۰ میلیون نفر در سال ۲۰۱۶ به ۱.۷ تا ۲.۴ میلیارد نفر در سال ۲۰۵۰ افزایش یابد.
۲. گزارش سازمان جهانی هواشناسی – وضعیت منابع آب جهانی (2023)
این گزارش نشان می‌دهد که سال ۲۰۲۳ خشک‌ترین سال برای رودخانه‌های جهانی در ۳۳ سال گذشته بوده است. همچنین، یخچال‌ها بزرگ‌ترین کاهش جرم را در ۵۰ سال اخیر تجربه کرده‌اند و تغییرات اقلیمی باعث بی‌ثباتی چرخه هیدرولوژیکی شده است. در حال حاضر، ۳.۶ میلیارد نفر با کمبود آب مواجه هستند که پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰ به بیش از ۵ میلیارد نفر برسد.
۳. گزارش آژانس بین‌المللی انرژی – انرژی و بحران آب (2023)
این گزارش بیان می‌کند که در سال ۲۰۲۱، بخش انرژی حدود ۳۷۰ میلیارد مترمکعب از منابع آب شیرین جهانی را مصرف کرده است که تقریباً ۱۰٪ از کل برداشت جهانی آب شیرین را تشکیل می‌دهد. همچنین، پیش‌بینی می‌شود که تقاضای انرژی برای نمک‌زدایی آب تا سال ۲۰۳۰ دو برابر شود.
۴. گزارش سازمان ملل متحد – آب و بحران اقلیمی (2024)
این گزارش تأکید می‌کند که تغییرات اقلیمی باعث تغییر الگوهای بارش، کاهش برف در مناطق کوهستانی و افزایش دوره‌های خشکسالی شده است که این عوامل به بحران آب دامن می‌زنند. همچنین، فعالیت‌های انسانی مانند استخراج بی‌رویه آب‌های زیرزمینی و استفاده ناکارآمد از منابع آب، وضعیت کمبود آب را تشدید کرده است.

نتیجه‌گیری: مراجع علمی و گزارش‌های بین‌المللی نشان می‌دهند که ناترازی منابع آب به دلیل افزایش تقاضا، کاهش منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی، و چالش‌های زیرساختی به یک بحران جهانی تبدیل شده است. این بحران نیازمند رویکردی جامع و چندبعدی برای مدیریت پایدار منابع آب است.

پیوست اول:

عنوان: تحلیل اثرات زیست محیطی نیروگاه‌های خورشیدی بر منابع طبیعی چالش‌ها و راهکارها

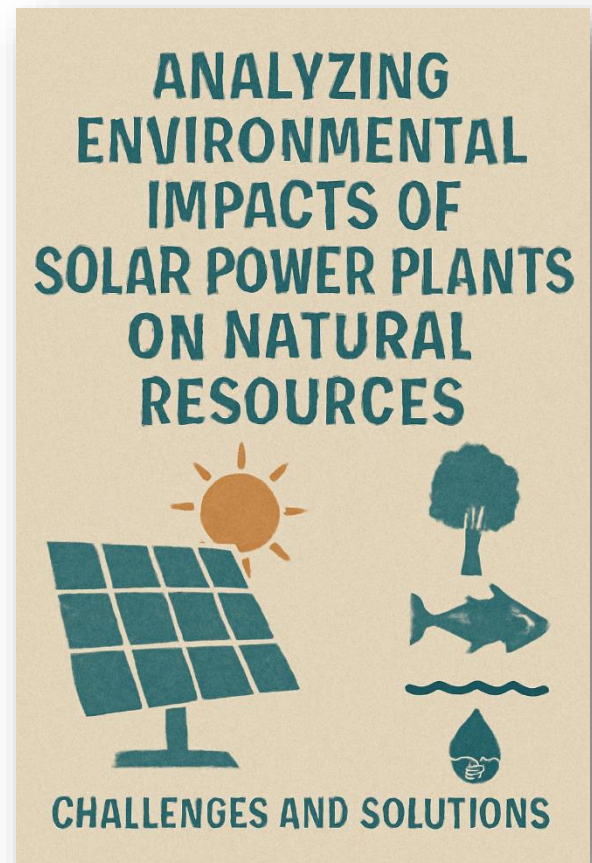
مقدمه:

با توجه به افزایش بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌ویژه انرژی خورشیدی، لازم است اثرات آن بر محیط زیست به‌ویژه بر منابع طبیعی مانند تنوع زیستی، خاک، و چرخه‌های اکولوژیکی منطقه به‌طور دقیق بررسی شود. در این تحلیل، سه محور اصلی مورد توجه قرار می‌گیرند: (۱) اثر بر تنوع زیستی، (۲) اثر بر سلامت خاک و ریزاقلیم، و (۳) اثر بلندمدت بر چرخه‌های اکولوژیکی منطقه.

۱. اثر بر تنوع زیستی:

موضوع:

توسعه نیروگاه‌های خورشیدی به‌ویژه در مناطق طبیعی و کشاورزی می‌تواند باعث تغییرات اکولوژیکی و تهدید تنوع زیستی شود. نصب پنل‌ها بر زمین‌های بکر، به‌ویژه در مناطق خشک و بیابانی، می‌تواند موجب قطع مسیرهای زیستی، ایجاد موانع فیزیکی برای حیات وحش و کاهش زیستگاه‌های طبیعی شود.



دلیل:

- کاهش و تکه‌تکه شدن زیستگاه‌ها باعث کاهش پراکندگی گونه‌های مختلف جانوری و گیاهی می‌شود.
- ایجاد سایه‌سازی شدید یا محدودیت در دسترسی به منابع طبیعی می‌تواند شرایط دشواری برای گونه‌های گیاهی و جانوری ایجاد کند.

راهکارها:

- در نظر گرفتن طرح‌های زیست محیطی مانند "کشت خورشیدی (agrivoltaics)" که همزمان با تولید انرژی، شرایط زیستی منطقه را حفظ کند.
- ارزیابی دقیق اثرات اکولوژیکی قبل از شروع پروژه‌ها و استفاده از زمین‌های غیر کشاورزی یا زمین‌های بی‌استفاده.

۲. اثر بر سلامت خاک و ریزاقلیم:

موضوع:

نیروگاه‌های خورشیدی می‌توانند بر روی خاک و ریزاقلیم تأثیرات قابل توجهی بگذارند. تغییرات در دمای سطحی خاک، رطوبت و الگوی تبخیر ممکن است به کاهش کیفیت خاک و تغییرات منفی در روند رشد گیاهان منجر شود.

- سایه‌سازی ناشی از پنل‌ها می‌تواند باعث کاهش تبخیر آب از خاک و تغییر در میزان رطوبت در سطح خاک شود.
- تغییرات دما و شرایط نور می‌تواند الگوی رشد گیاهان را تغییر دهد، که به نوبه خود تأثیر منفی بر کشاورزی و اکوسیستم‌های طبیعی خواهد داشت.
- افزایش یا کاهش دما به‌ویژه در مناطق خشک می‌تواند موجب تغییر در میکروکلیمات‌های منطقه و کاهش کیفیت خاک شود.

راهکارها:

- طراحی و نصب پنل‌ها به گونه‌ای که کمترین تأثیر را بر روی خاک و ریزاقلیم منطقه داشته باشد.
- استفاده از خاک‌های بی‌استفاده یا زیرساخت‌های سبز برای نصب نیروگاه‌های خورشیدی.

۳. اثر بلندمدت بر چرخه‌های اکولوژیکی منطقه:

موضوع:

نیروگاه‌های خورشیدی می‌توانند به طور بلندمدت بر چرخه‌های اکولوژیکی منطقه تأثیر بگذارند. این تأثیرات به‌ویژه در مناطق با اکوسیستم‌های حساس ممکن است منجر به کاهش تنوع زیستی و تغییر در روابط موجودات زنده با محیط‌زیست شود.

دلیل:

- قطع چرخه‌های طبیعی نوری و آبی خاک می‌تواند اثرات منفی بر گیاهان و جانوران بومی داشته باشد.
- بی‌توجهی به تنوع زیستی در طراحی و اجرای پروژه‌های انرژی خورشیدی می‌تواند باعث ایجاد اکوسیستم‌های مصنوعی و ناپایدار شود.
- تأثیرات بلندمدت بر روی حیوانات گرده‌افشان و دیگر موجودات زیستی ممکن است در درازمدت به بحران‌های زیست‌محیطی منجر شود.

راهکارها:

- توجه به چرخه‌های اکولوژیکی و شبیه‌سازی اثرات بلندمدت پروژه‌ها بر روی زیست‌محیط از ابتدا.
- استفاده از فن‌آوری‌های نوین برای کاهش تأثیرات زیست‌محیطی در درازمدت، مانند طراحی سیستم‌های بازیافت و مدیریت منابع به‌طور هوشمند.

نتیجه‌گیری: با توجه به چالش‌های زیست‌محیطی که در پی توسعه نیروگاه‌های خورشیدی در برخی مناطق ممکن است بروز کند، اهمیت ارزیابی دقیق و مدیریت علمی و پایدار پروژه‌ها امری ضروری است. از این رو، پیشنهاد می‌شود که در تمامی پروژه‌های انرژی خورشیدی به‌ویژه در مناطق حساس اکولوژیکی، ملاحظات زیست‌محیطی به‌طور جامع و دقیق بررسی و به‌کار گرفته شوند.

پیوست دوم:

درباره نرخ کاهش راندمان سالانه پنل‌های خورشیدی، تحقیقات علمی مختلفی انجام شده است که نشان می‌دهند این نرخ بسته به نوع پنل، شرایط محیطی و کیفیت ساخت متفاوت است.

مراجع علمی معتبر درباره نرخ کاهش راندمان پنل‌های خورشیدی:

1. National Renewable Energy Laboratory (NREL) – Photovoltaic Degradation Rates: An Analytical Review

- خلاصه: این گزارش تحلیلی از NREL به بررسی نرخ‌های کاهش راندمان پنل‌های خورشیدی در شرایط مختلف می‌پردازد. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که نرخ کاهش راندمان سالانه پنل‌های مونوکریستالی سیلیکونی معمولاً کمتر از ۰.۵٪ است. با این حال، در شرایط خاص مانند آب و هوای گرم و مرطوب، این نرخ می‌تواند بالاتر باشد.
- لینک: ([NREL](#))

2. Alafnan, H. (2024) – The Impact of PV Panel Degradation Rate, Initial System Efficiency, and Interest Rate on the Levelized Cost of Energy for PV Projects

- خلاصه: این مطالعه نشان می‌دهد که نرخ کاهش راندمان سالانه پنل‌های خورشیدی می‌تواند بین ۰.۵٪ تا ۲.۵٪ متغیر باشد. این تفاوت‌ها بسته به کیفیت ساخت، نوع پنل و شرایط محیطی است.
- لینک: ([MDPI](#))

3. Evaluation of degradation factor effect on solar panels performance

- خلاصه: مطالعه‌ای که نرخ کاهش راندمان سالانه پنل‌های خورشیدی را بین ۰.۴۴۱٪ تا ۰.۸۵۰٪ گزارش کرده است. این نرخ‌ها بسته به شرایط عملیاتی و نگهداری سیستم متغیر هستند.
- لینک: ([ResearchGate](#))

✓ نتیجه‌گیری: با توجه به مراجع علمی فوق، می‌توان نتیجه گرفت که نرخ کاهش راندمان سالانه پنل‌های خورشیدی معمولاً بین ۰.۳٪ تا ۰.۸٪ است، اما در شرایط خاص می‌تواند بالاتر حتی ۲/۵ درصد باشد. برای کاهش این نرخ و افزایش طول عمر پنل‌ها، انتخاب پنل‌های با کیفیت بالا، نصب صحیح، و نگهداری منظم سیستم توصیه می‌شود.

پیوست سوم:

پنل‌های خورشیدی در پایان عمر مفید

پسماندهای حاصل از پنل‌های خورشیدی به‌ویژه در پایان عمر مفید آن‌ها می‌تواند چالش‌های زیست‌محیطی قابل توجهی ایجاد کند. این پسماندها به‌ویژه وقتی که پنل‌های فتوولتائیک آسیب می‌بینند یا از رده خارج می‌شوند، می‌توانند مشکلاتی در زمینه بازیافت، آلودگی و مدیریت مواد شیمیایی ایجاد کنند. در ادامه به شرح چالش‌های اصلی مربوط به پسماند پنل‌های خورشیدی می‌پردازیم و منابع علمی مرتبط با آن را ارائه می‌دهیم.

چالش‌های پسماند پنل‌های خورشیدی در چرخه عمر

۱. مواد شیمیایی خطرناک در پنل‌ها

پنل‌های فتوولتائیک، به‌ویژه پنل‌های سیلیکونی، حاوی مواد شیمیایی و فلزات سنگین مانند **کادمیوم، سرب، و سیلیکون** هستند. این مواد می‌توانند در صورت تخریب یا عدم بازیافت صحیح، به محیط زیست آسیب برسانند. آسیب به پنل‌ها می‌تواند در اثر ضربه، حرارت، یا استفاده نامناسب اتفاق بیفتد و مواد شیمیایی در آن‌ها آزاد شوند.



- **چالش:** هنگامی که پنل‌ها آسیب می‌بینند، ممکن است مواد سمی مانند کادمیوم به خاک یا آب نشت کنند که این می‌تواند به آلودگی خاک و منابع آب منجر شود.

۲. فرآیند بازیافت پیچیده و گران‌قیمت

با توجه به پیچیدگی و تنوع مواد استفاده‌شده در پنل‌های خورشیدی، فرآیند بازیافت آن‌ها می‌تواند پیچیده و گران‌قیمت باشد. برای بازیافت پنل‌های خورشیدی، به‌ویژه آن‌هایی که از مواد مختلف مانند شیشه، پلاستیک، سیلیکون و فلزات ساخته شده‌اند، باید از روش‌های خاص و پیشرفته استفاده کرد.

- **چالش:** هزینه‌های بالا و عدم وجود زیرساخت‌های کافی برای بازیافت پنل‌های خورشیدی، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، می‌تواند به انباشت پسماند منجر شود.

۳. اثر بر تنوع زیستی و محیط‌زیست

هنگامی که پنل‌های خورشیدی فرسوده یا آسیب دیده به درستی بازیافت نمی‌شوند، ممکن است پسماندهای آن‌ها در محیط‌های طبیعی دفن شوند و به‌ویژه در خاک و منابع آب منتشر شوند. این مواد می‌توانند بر تنوع زیستی منطقه تأثیر بگذارند.

- **چالش:** آلودگی مواد شیمیایی حاصل از پسماند پنل‌های خورشیدی می‌تواند به اکوسیستم‌های محلی آسیب برساند و باعث از بین رفتن تنوع زیستی شود.

۴. محاسبه طول عمر و مدیریت مؤثر

پنل‌های خورشیدی معمولاً عمر مفید ۲۰ تا ۳۰ سال دارند، اما با گذر زمان، عملکرد آن‌ها کاهش می‌یابد و ممکن است نیاز به تعویض پیدا کنند. این واقعیت که تعداد زیادی پنل خورشیدی در حال ورود به پایان عمر خود هستند، نیاز به سیستم‌های بازیافت مؤثر را افزایش می‌دهد.

- **چالش:** عدم برنامه‌ریزی و مدیریت مناسب برای بازیافت پنل‌های خورشیدی می‌تواند منجر به بحران پسماند در آینده نزدیک شود.

مراجع علمی برای چالش‌های پسماند پنل‌های خورشیدی

1. Golev, A., et al. (2020) – Environmental impacts of solar photovoltaic waste: a review

○ خلاصه: این مقاله به بررسی اثرات زیست‌محیطی پسماند پنل‌های خورشیدی و چالش‌های آن‌ها در فرآیندهای بازیافت پرداخته است. نویسندگان به مشکلاتی مانند انتشار مواد شیمیایی سمی و پیچیدگی‌های بازیافت اشاره کرده‌اند.

- لینک به مقاله: [Environmental impacts of solar photovoltaic waste](#)

2. International Renewable Energy Agency (IRENA) – End-of-life management: Solar Photovoltaic Panels

○ خلاصه: این گزارش از آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر به بررسی چالش‌های پسماند‌های ناشی از پنل‌های خورشیدی و نیاز به روش‌های بازیافت مؤثر می‌پردازد. IRENA به‌ویژه بر لزوم گسترش فناوری‌های بازیافت و کاهش اثرات منفی محیطی تأکید کرده است.

- لینک به گزارش: [IRENA - End-of-life management](#)

3. Solar Energy Industries Association (SEIA) – Recycling Solar Panels

○ خلاصه: این گزارش به بررسی وضعیت بازیافت پنل‌های خورشیدی در ایالات متحده و جهان می‌پردازد. همچنین، به چالش‌ها و راهکارهای بهینه‌سازی فرآیند بازیافت اشاره می‌کند.

- لینک به گزارش: [SEIA - Recycling Solar Panels](#)

4. Müller, J., et al. (2021) – Solar Panel Waste: A Global Overview of the Challenges and Solutions

○ خلاصه: مقاله‌ای که چالش‌های جهانی مربوط به پسماند‌های پنل‌های خورشیدی را بررسی کرده و راه‌حل‌هایی برای مدیریت و بازیافت این پسماندها پیشنهاد می‌دهد.

- لینک به مقاله: [Solar Panel Waste: A Global Overview](#)

نتیجه‌گیری: پسماند‌های پنل‌های خورشیدی و اثرات آن‌ها بر محیط‌زیست، به‌ویژه در صورت آسیب دیدن یا پایان عمر پنل‌ها، چالش‌های قابل توجهی را ایجاد می‌کند. این چالش‌ها شامل انتشار مواد سمی، پیچیدگی‌های بازیافت، و تهدیدات زیست‌محیطی است. کشورهای پیشرفته در حال کار بر روی سیستم‌های بازیافت و فناوری‌های بهبود یافته برای کاهش این اثرات هستند. استفاده از پنل‌های خورشیدی قابل بازیافت و ایجاد زیرساخت‌های مناسب برای مدیریت پسماند از اهمیت بالایی برخوردار است.

پیوست چهارم

بازیافت پنل‌های خورشیدی و چالش‌های آن

بازیافت پنل‌های خورشیدی، به‌ویژه پس از آسیب دیدن یا پایان عمر مفید آن‌ها، موضوعی پیچیده است که چالش‌های زیادی به همراه دارد. اما همچنان، با توجه به اهمیت بازیافت در کاهش اثرات زیست محیطی و تأمین منابع برای تولید پنل‌های جدید، این فرآیند در حال پیشرفت است. در اینجا به بررسی چالش‌های بازیافت، آلودگی‌ها و اثرات منفی آن‌ها می‌پردازیم.

۱. آیا پنل‌های خورشیدی قابل بازیافت هستند؟

بله، پنل‌های خورشیدی قابل بازیافت هستند، اما فرآیند بازیافت آن‌ها چالش‌های خاص خود را دارد. پنل‌های خورشیدی معمولاً از سیلیکون، شیشه، پلاستیک، و فلزات ساخته می‌شوند که هر کدام نیاز به فرآیندهای متفاوت برای بازیافت دارند.

• **سیلیکون:** این ماده یکی از اصلی‌ترین اجزای پنل‌های خورشیدی است که معمولاً از سیلیکون کریستالی (مونوکریستالی یا پلی کریستالی) ساخته می‌شود. بازیافت سیلیکون چالش‌برانگیز است، زیرا برای استخراج سیلیکون از پنل‌های خورشیدی آسیب دیده، نیاز به فرآیندهای خاصی است که به‌طور معمول شامل استفاده از گرما و مواد شیمیایی می‌شود.

• **شیشه:** پنل‌های خورشیدی معمولاً حاوی شیشه‌های مقاوم هستند که بازیافت آن‌ها نسبتاً آسان‌تر از سیلیکون است. این شیشه‌ها می‌توانند پس از بازیافت به‌عنوان مواد اولیه در تولید محصولات جدید استفاده شوند.

• **فلزات:** پنل‌های خورشیدی معمولاً حاوی فلزاتی مانند آلومینیوم، نقره، و مس هستند که به راحتی می‌توانند بازیافت شوند و مجدداً به‌عنوان مواد اولیه در تولید محصولات دیگر مورد استفاده قرار گیرند.

۲. چالش‌های بازیافت پنل‌های خورشیدی

اگرچه پنل‌های خورشیدی قابل بازیافت هستند، فرآیند بازیافت آن‌ها همچنان با مشکلاتی همراه است:

- **پیچیدگی فرآیند بازیافت:** پنل‌های خورشیدی از مواد مختلفی تشکیل شده‌اند که هر کدام نیاز به فرآیندهای بازیافت متفاوت دارند. به‌ویژه جداسازی مواد مختلف مانند شیشه، سیلیکون و فلزات از یکدیگر نیاز به فناوری‌های خاص و هزینه‌بر دارد.
- **هزینه‌های بالا:** فرآیندهای بازیافت پنل‌های خورشیدی به‌ویژه در مقیاس وسیع هزینه‌های زیادی به دنبال دارند. این فرآیندها معمولاً به‌طور اقتصادی از نظر تجاری جذاب نیستند، زیرا بازیافت پنل‌ها هنوز نیاز به فناوری‌های پیشرفته دارد که در برخی موارد به سرمایه‌گذاری‌های سنگین نیاز دارند.



- **تعداد کم مراکز بازیافت:** در حال حاضر، تعداد مراکز بازیافت پنل‌های خورشیدی بسیار کم است و تنها تعداد محدودی از کشورها دارای زیرساخت‌های مناسب برای بازیافت این پنل‌ها هستند. این باعث می‌شود که بسیاری از پنل‌ها به‌جای بازیافت به محل‌های دفن زباله منتقل شوند.

۳. آلودگی‌های ناشی از بازیافت و پسماند پنل‌های خورشیدی

اگر فرآیند بازیافت به درستی انجام نشود یا پنل‌ها در محل‌های دفن زباله قرار گیرند، می‌توانند آلودگی‌های جدی ایجاد کنند. این آلودگی‌ها شامل:

- **انتشار مواد سمی:** پنل‌های خورشیدی حاوی مواد شیمیایی خطرناکی مانند **کادمیوم** و **پلی‌سولفیدهای فلزی** هستند که در صورت عدم بازیافت صحیح می‌توانند وارد خاک و آب شوند. این مواد می‌توانند خطرات جدی برای محیط‌زیست و سلامت انسان‌ها ایجاد کنند.
- **پسماندهای شیمیایی:** فرآیند تولید پنل‌های خورشیدی به‌ویژه در تولید سیلیکون، به مواد شیمیایی خاص نیاز دارد که در صورت نشت یا دفع نادرست، می‌توانند آلودگی شیمیایی ایجاد کنند.
- **انتشار گازهای گلخانه‌ای:** فرآیند تولید و بازیافت پنل‌های خورشیدی نیز در برخی مراحل می‌تواند باعث انتشار گازهای گلخانه‌ای شود. به‌ویژه در مرحله تولید پنل‌های خورشیدی، انرژی مصرفی بالا است که در صورتی که از منابع انرژی فسیلی تأمین شود، می‌تواند به انتشار دی‌اکسید کربن (CO_2) منجر شود.

۴. مدیریت بهتر و راهکارهای مقابله با مشکلات بازیافت

چند راهکار برای بهبود فرآیند بازیافت و کاهش اثرات منفی آن وجود دارد:

- **توسعه فناوری‌های بازیافت پیشرفته:** با استفاده از فناوری‌های نوین، می‌توان فرآیندهای بازیافت را کارآمدتر کرد. به‌عنوان مثال، استفاده از فناوری‌هایی مانند **لیزینگ مواد** که مواد مختلف پنل‌ها را به‌طور کارآمدتر و با هزینه پایین‌تر جدا می‌کنند، می‌تواند به کاهش هزینه‌های بازیافت و افزایش بهره‌وری آن کمک کند.
- **استفاده از انرژی تجدیدپذیر در فرآیند تولید:** استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در فرآیند تولید پنل‌های خورشیدی و همچنین در فرآیند بازیافت می‌تواند به کاهش میزان گازهای گلخانه‌ای و آلودگی ناشی از تولید و بازیافت پنل‌ها کمک کند.
- **قوانین و مقررات بازیافت:** بسیاری از کشورها، به‌ویژه در اتحادیه اروپا، قوانین خاصی برای بازیافت پنل‌های خورشیدی وضع کرده‌اند. این قوانین به تولیدکنندگان پنل‌های خورشیدی ملزم می‌کنند که مسئولیت بازیافت محصولات خود را در پایان عمر آن‌ها بپذیرند. برای مثال، در اروپا، سیستم **WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment)** برای بازیافت پنل‌های خورشیدی وجود دارد.

مراجع علمی برای چالش‌های بازیافت پنل‌های خورشیدی

1. **Golev, A., et al. (2020) – Environmental impacts of solar photovoltaic waste: a review**
این مقاله به بررسی اثرات زیست محیطی پسماند پنل‌های خورشیدی و چالش‌های آن‌ها در فرآیندهای بازیافت پرداخته است.
 - لینک: [Environmental impacts of solar photovoltaic waste](#)
2. **International Renewable Energy Agency (IRENA) – End-of-life management: Solar Photovoltaic Panels**
به بررسی چالش‌های پسماند پنل‌های خورشیدی و نیاز به روش‌های بازیافت مؤثر می‌پردازد IRENA گزارش.
 - لینک: [IRENA - End-of-life management](#)
3. **Solar Energy Industries Association (SEIA) – Recycling Solar Panels**
این گزارش به بررسی وضعیت بازیافت پنل‌های خورشیدی در ایالات متحده و جهان می‌پردازد.
 - لینک: [SEIA - Recycling Solar Panels](#)

نتیجه‌گیری: بازیافت پنل‌های خورشیدی پس از آسیب دیدن یا پایان عمر مفید آن‌ها چالش‌های زیادی به همراه دارد. فرآیند بازیافت می‌تواند به آلودگی‌های شیمیایی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و مشکلات زیست محیطی منجر شود. با این حال، با پیشرفت در فناوری‌های بازیافت، مدیریت بهتر و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در فرآیندهای تولید و بازیافت، می‌توان این مشکلات را کاهش داد و به پایداری بیشتری در صنعت انرژی خورشیدی دست یافت.

پیوست پنجم:

مراحل مختلف تولید، نصب، و نگهداری نیروگاه خورشیدی.

این مراحل شامل فرآیند تولید پنل‌ها، نصب سیستم، بهره‌برداری، و در نهایت باز یافت یا پایان عمر پنل‌ها است. در ادامه، به بررسی پسماندها، پساب‌ها و تولید گازهای گلخانه‌ای مرتبط با هر مرحله می‌پردازیم و همچنین اطلاعاتی برای یک مگاوات انرژی خورشیدی ارائه خواهیم داد.

۱. تولید پنل‌های خورشیدی

تولید پنل‌های خورشیدی، به‌ویژه پنل‌های فتوولتائیک سیلیکونی، شامل استفاده از مواد خام و فرآیندهای پیچیده‌ای است که می‌تواند پسماند، پساب و گازهای گلخانه‌ای زیادی تولید کند.

پسماندها در فرآیند تولید:

- **پسماندهای سیلیکونی:** تولید سیلیکون از مواد خام مانند سیلیکات‌های فلزی تولید پسماندهایی مانند سیلیکون اضافی و خاکستر می‌کند.
- **فلزات سنگین:** در پنل‌های خورشیدی، فلزات سنگینی مانند کادمیوم و سرب برای برخی از انواع پنل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند که در صورت عدم مدیریت مناسب می‌توانند به آلودگی محیطی منجر شوند.

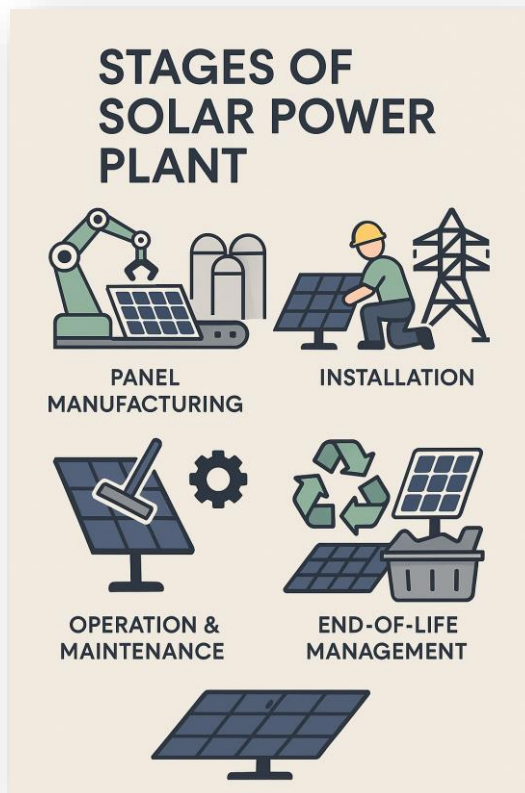
- **پسماند شیمیایی:** مواد شیمیایی مورد استفاده در فرآیندهای تمیزکاری و تولید سلول‌های خورشیدی ممکن است در محیط باقی بمانند و وارد پساب‌ها شوند.

پساب‌ها در فرآیند تولید:

- **پساب شیمیایی:** فرآیند تولید سیلیکون و سایر مواد مورد استفاده در تولید پنل‌ها می‌تواند پساب‌های شیمیایی تولید کند که ممکن است حاوی مواد سمی باشند.
- **پساب حلال‌ها:** در فرآیندهای تمیزکاری سلول‌ها، استفاده از حلال‌ها و مواد شیمیایی ممکن است به پساب‌های آلوده منتهی شود.

انتشار گازهای گلخانه‌ای در تولید:

- تولید پنل‌های خورشیدی به انرژی زیادی نیاز دارد. اگر این انرژی از منابع فسیلی تأمین شود، گازهای گلخانه‌ای مانند CO_2 تولید می‌شود. به‌طور متوسط، تولید هر کیلووات ساعت برق از انرژی خورشیدی در مراحل تولید پنل‌ها به میزان ۲۰۰ تا ۳۰۰ گرم CO_2 تولید می‌کند.



برای تولید یک مگاوات نیروگاه خورشیدی (معادل ۱۰۰۰ کیلووات)، حدود ۲۰۰,۰۰۰ تا ۳۰۰,۰۰۰ کیلوگرم CO_2 در فرآیند تولید پنل‌ها تولید می‌شود.

۲. نصب سیستم‌های خورشیدی

در این مرحله، نصب پنل‌ها، ساختارهای نگهدارنده، سیم‌کشی و تجهیزات جانبی شامل فرآیندهایی است که به تولید پسماند و گازهای گلخانه‌ای منجر می‌شود.

پسماندها در مرحله نصب:

- **پسماندهای ساخت و ساز:** در این مرحله، به‌ویژه در هنگام نصب سیستم‌ها، پسماندهایی مانند فلزات اضافی، قطعات پلاستیکی، بسته‌بندی و مواد مصرفی تولید می‌شود.
- **پسماندهای فلزی و پلاستیکی:** در هنگام نصب، قطعات اضافی فلزی و پلاستیکی که در فرآیند نصب و ساخت ایجاد می‌شود، باید به‌طور صحیح مدیریت شود.

پساب‌ها و آلودگی ناشی از نصب:

- **پساب ناشی از شست‌وشوی پنل‌ها:** شست‌وشوی پنل‌ها در مرحله نصب یا نگهداری ممکن است به مصرف بالای آب و تولید پساب منجر شود.

انتشار گازهای گلخانه‌ای در مرحله نصب:

- **انتشار CO_2 :** در صورتی که حمل و نقل و نصب پنل‌ها با وسایل نقلیه آلاینده یا از منابع انرژی فسیلی استفاده کنند، ممکن است به تولید CO_2 و گازهای دیگر منتهی شود.

۳. بهره‌برداری و تولید انرژی خورشیدی

پس از نصب، پنل‌های خورشیدی انرژی پاک تولید می‌کنند، که این مرحله تقریباً هیچ پسماند و گاز گلخانه‌ای تولید نمی‌کند. تنها پسماندهای کم‌حجم مانند پسماندهای نگهداری و تعمیرات یا آب و شست‌وشو وجود دارند.

پسماندها در بهره‌برداری:

- **پسماندهای نگهداری:** در این مرحله، به‌ویژه در صورت نیاز به تعمیر یا تعویض پنل‌ها، ممکن است پسماندهایی مانند روغن‌ها و مواد شیمیایی مصرفی تولید شود.

پساب‌ها و گازهای گلخانه‌ای در بهره‌برداری:

- در این مرحله تقریباً هیچ گاز گلخانه‌ای تولید نمی‌شود، زیرا پنل‌های خورشیدی انرژی پاک تولید می‌کنند.

۴. پایان عمر پنل‌های خورشیدی و بازیافت

پس از پایان عمر پنل‌های خورشیدی (معمولاً بعد از ۲۰ تا ۳۰ سال)، پنل‌ها باید بازیافت یا دفع شوند. این مرحله چالش‌های خود را در زمینه پسماند و پساب دارد.

پسماندها در پایان عمر:

- **پسماندهای شیمیایی و فلزی:** پنل‌های خورشیدی حاوی مواد شیمیایی مانند کادمیوم و فلزات سنگین هستند که در صورت عدم بازیافت صحیح، می‌توانند به محیط زیست آسیب برسانند.
- **پسماندهای شیشه‌ای:** شیشه پنل‌های خورشیدی در صورت عدم بازیافت مناسب می‌تواند به دفن زباله‌ها و آلودگی محیط زیست منتهی شود.

پساب‌ها و گازهای گلخانه‌ای در پایان عمر:

- **فرآیند بازیافت پنل‌ها ممکن است نیاز به استفاده از انرژی داشته باشد و در صورتی که از منابع انرژی فسیلی برای این کار استفاده شود، گازهای گلخانه‌ای تولید می‌شود.**

نتیجه‌گیری: در مجموع، برای تولید یک نیروگاه خورشیدی ۱ مگاوات، در مراحل مختلف تولید، نصب و بازیافت، با پسماندها و پساب‌های شیمیایی، فلزات سنگین و گازهای گلخانه‌ای روبه‌رو هستیم. اما نکته مهم این است که در طول بهره‌برداری، انرژی خورشیدی به‌طور عمده بدون تولید آلودگی عمل می‌کند و در بلندمدت می‌تواند به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و وابستگی به سوخت‌های فسیلی کمک کند.

با این حال، مدیریت پسماند و توسعه فناوری‌های بازیافت می‌تواند به کاهش اثرات منفی در فرآیندهای تولید، نصب و بازیافت پنل‌های خورشیدی کمک کند.

مقایسه‌ای از میزان پسماند، پساب، و انتشار گازهای گلخانه‌ای در مراحل مختلف چرخه عمر یک نیروگاه خورشیدی ۱ مگاوات در جدول زیر ارائه شده است. این اطلاعات می‌تواند کمک کند تا چالش‌های زیست‌محیطی در هر مرحله از فرآیند انرژی خورشیدی بهتر درک شوند.

مقایسه پسماندها و اثرات زیست‌محیطی در مراحل مختلف

مرحله	پسماند تولید شده (کیلوگرم)	پساب‌های شیمیایی	آب مصرفی و پساب‌ها	انتشار گازهای گلخانه‌ای کیلوگرم CO2
تولید	۲۰۰,۰۰۰ تا ۳۰۰,۰۰۰ کیلوگرم CO2	پسماند سیلیکونی، فلزات سنگین (کادمیوم، سرب)	مصرف آب در تولید سیلیکون، پساب از شست‌وشو	۲۰۰-۳۰۰ گرم CO2 به ازای هر کیلووات ساعت تولید انرژی
نصب	پسماند ساخت‌وساز اندک	مقادیر کمی از پسماند بسته‌بندی و مواد شیمیایی	آب برای شست‌وشوی پنل‌ها	انتشار CO2 ناشی از حمل‌ونقل و نصب
بهره‌برداری	پسماند حداقلی	حداقل (مواد شیمیایی برای شست‌وشو)	مصرف آب کم (بسته به نیاز شست‌وشو)	تقریباً صفر در طول عملیات
پایان عمر	پسماندهای بازیافت پنل‌ها (فلزات، شیشه)	مواد سمی از پنل‌ها (کادمیوم، سرب)	پساب‌های ناشی از شست‌وشوی پنل‌ها و دفع پسماندها	CO2 ناشی از بازیافت، حمل‌ونقل و دفن زباله

مراجع علمی برای ردیابی:

1. **International Renewable Energy Agency (IRENA) – End-of-life management: Solar Photovoltaic Panels**
این گزارش به بررسی چالش‌های پسماندهای پنل‌های خورشیدی و نیاز به روش‌های بازیافت مؤثر می‌پردازد.
 - لینک به گزارش: [IRENA - End-of-life management](#)
2. **Golev, A., et al. (2020) – Environmental impacts of solar photovoltaic waste: a review**
این مقاله به بررسی اثرات زیست‌محیطی پسماند پنل‌های خورشیدی و چالش‌های آن‌ها در فرآیندهای بازیافت پرداخته است.
 - لینک به مقاله: [Environmental impacts of solar photovoltaic waste](#)
3. **Solar Energy Industries Association (SEIA) – Recycling Solar Panels**
این گزارش به بررسی وضعیت بازیافت پنل‌های خورشیدی در ایالات متحده و جهان می‌پردازد.
 - لینک به گزارش: [SEIA - Recycling Solar Panels](#)



پیوست ششم

زمین زراعی و تعداد پنل‌های خورشیدی

برای محاسبه نیاز به زمین زراعی و تعداد پنل‌های خورشیدی برای تولید 1 مگاوات انرژی خورشیدی (MW)، باید به چند عامل مختلف توجه کنیم، از جمله نوع پنل‌های خورشیدی، کارایی پنل‌ها و میزان تابش نور خورشید در منطقه‌ای که نیروگاه نصب می‌شود.

۱- نیاز به زمین زراعی برای یک مگاوات انرژی خورشیدی

مساحت زمین مورد نیاز برای یک مگاوات نیروگاه خورشیدی بسته به نوع و کارایی پنل‌ها و شدت تابش خورشید متغیر است. در شرایط معمولی، برای نصب یک نیروگاه خورشیدی یک مگاوات، زمین مورد نیاز به شرح زیر است:

- به طور متوسط، ۲ تا ۴ هکتار زمین برای نصب ۱ مگاوات نیروگاه خورشیدی مورد نیاز است.

- این مقدار به شرایط محلی و شدت تابش خورشید بستگی دارد. در مناطق با تابش خورشید بیشتر (مثل مناطق خشک یا بیابانی)، این نیاز ممکن است کمتر باشد.

مثال:

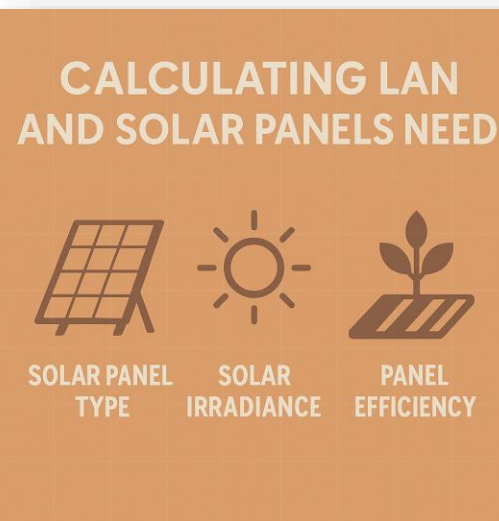
- برای تولید 1 مگاوات برق خورشیدی، زمین مورد نیاز معمولاً حدود 2 هکتار خواهد بود، البته بسته به فناوری و طراحی سیستم، ممکن است این مقدار متفاوت باشد.
- در مناطق با تابش خورشید بالا، این مقدار به ۱/۵ هکتار هم کاهش می‌یابد.

۲- تعداد پنل‌های خورشیدی برای تولید ۱ مگاوات برق

برای محاسبه تعداد پنل‌های مورد نیاز، باید به کارایی پنل‌های خورشیدی و توان خروجی هر پنل توجه کنیم.

تعداد پنل‌ها:

- توان هر پنل خورشیدی معمولاً بین ۳۰۰ وات تا ۴۰۰ وات است.
 - با فرض اینکه هر پنل ۳۵۰ وات تولید کند، می‌توان محاسبه کرد که به چه تعداد پنل نیاز داریم:
- پس برای تولید 1 مگاوات برق خورشیدی، به حدود ۲۸۵۰ تا ۳۰۰۰ پنل نیاز داریم.



مساحت هر پنل:

- هر پنل خورشیدی به طور متوسط ۱.۷ متر مربع مساحت دارد.
- بنابراین، برای نصب ۲۸۵۷ پنل به مساحت تقریباً ۴,۸۰۰ متر مربع یا ۰.۴۸ هکتار زمین برای پنل‌ها نیاز خواهید داشت.

۳. مراجع علمی برای ردیابی

برای اطلاعات دقیق‌تر و مرجع‌های معتبر در زمینه محاسبات زمین و تعداد پنل‌های خورشیدی، می‌توانید به این منابع علمی و گزارش‌ها مراجعه کنید:

1. International Renewable Energy Agency (IRENA) – Renewable Power Generation Costs 2020

این گزارش به هزینه‌ها و نیاز به زمین برای پروژه‌های انرژی خورشیدی پرداخته است.

- لینک به گزارش: [IRENA - Renewable Power Generation Costs 2020](#)

2. National Renewable Energy Laboratory (NREL) – Land Use for Solar Power

این گزارش به نیازهای زمین برای تولید انرژی خورشیدی در مناطق مختلف می‌پردازد.

- لینک به گزارش: [NREL - Land Use for Solar Power](#)

3. Solar Energy Industries Association (SEIA) – Solar Power Facts

این گزارش شامل اطلاعاتی درباره‌ی نیاز به زمین و توان خروجی پنل‌های خورشیدی است.

- لینک به گزارش: [SEIA - Solar Power Facts](#)

نتیجه‌گیری: برای تولید 1 مگاوات انرژی خورشیدی، به طور متوسط به حدود ۲ تا ۴ هکتار زمین و ۲۸۵۰ تا ۳۰۰۰ پنل خورشیدی نیاز داریم. البته این اعداد بسته به نوع پنل، منطقه نصب و شدت تابش خورشید می‌تواند تغییر کند. با توجه به استفاده بهینه از زمین‌های بایر یا بیابانی، می‌توان نیاز به زمین را کاهش داد.

پیوست هفتم

استانداردهای واردات پنل خورشیدی

برای واردات پنل‌های خورشیدی به ایران، باید طبق استانداردهای مشخصی عمل نمود. که به‌طور کلی شامل استانداردهای بین‌المللی و ملی برای کیفیت، بهره‌وری و ایمنی پنل‌های خورشیدی است. این استانداردها برای اطمینان از عملکرد بهینه، ایمنی و پایداری انرژی خورشیدی در کشور شما بسیار مهم هستند. در ادامه به شرح این استانداردها پرداخته‌ایم:

۱. استانداردهای بین‌المللی برای پنل‌های خورشیدی

برای واردات پنل‌های خورشیدی، رعایت استانداردهای جهانی ضروری است که معمولاً توسط سازمان‌های بین‌المللی مثل

IEC (International Electrotechnical Commission),

ISO (International Organization for Standardization) و

UL (Underwriters Laboratories)



تدوین می‌شود. برخی از مهم‌ترین استانداردهای بین‌المللی برای پنل‌های خورشیدی عبارتند از:

الف) استاندارد IEC 61215 :

- **تعریف:** این استاندارد برای ارزیابی و تست پنل‌های خورشیدی سیلیکونی (مونوکریستالی و پلی کریستالی) از نظر عملکرد و طول عمر به‌ویژه در شرایط سخت محیطی است.
- **چالش‌ها و تست‌ها:** پنل‌ها تحت آزمون‌هایی از جمله تست ضد آب، حرارت، یخبندان، باد، و شوک حرارتی قرار می‌گیرند. این استاندارد برای ارزیابی پایداری و کیفیت پنل‌های خورشیدی در بلندمدت بسیار مهم است.
- **اهمیت برای واردات:** پنل‌هایی که با این استاندارد مطابقت دارند، توانایی مقاومت در برابر شرایط اقلیمی مختلف (مانند گرمای شدید و سرمای شدید) را دارند.

ب) استاندارد IEC 61730 :

- **تعریف:** این استاندارد بر ایمنی پنل‌های خورشیدی در طول فرآیند تولید، حمل‌ونقل و نصب تأکید دارد. این استاندارد دو بخش دارد: ایمنی الکتریکی (IEC 61730-1) و ایمنی مکانیکی (IEC 61730-2).
- **اهمیت برای واردات:** رعایت این استاندارد باعث اطمینان از ایمنی پنل‌های خورشیدی می‌شود و از بروز مشکلاتی مانند خطرات آتش‌سوزی و شوک الکتریکی جلوگیری می‌کند.

ج) استاندارد UL 1703 :

- **تعریف:** این استاندارد به ارزیابی ایمنی پنل‌های خورشیدی در برابر آتش‌سوزی، ضربه و خطرات الکتریکی می‌پردازد.
- **اهمیت برای واردات:** پنل‌هایی که با این استاندارد مطابقت دارند، از نظر ایمنی بالا و قابل اعتماد هستند و می‌توانند در شرایط مختلف محیطی و کاربردی به‌خوبی عمل کنند.

۲. استانداردهای ملی ایران برای پنل‌های خورشیدی (تیم علمی شناسائی نموده است!)

در ایران، علاوه بر استانداردهای بین‌المللی، سازمان‌های ملی نیز برخی استانداردها برای واردات و نصب سیستم‌های انرژی خورشیدی دارند. برخی از استانداردهای ملی ایران که برای واردات پنل‌های خورشیدی باید رعایت شوند، به شرح زیر است:

الف) استاندارد ملی ایران شماره ۱۹۴۴ (سیستم‌های فتوولتائیک):

- **تعریف:** این استاندارد برای سیستم‌های فتوولتائیک و پنل‌های خورشیدی است که در آن مشخصات فنی، شرایط نصب، و روش‌های تست مشخص می‌شود.
- **اهمیت برای واردات:** این استاندارد شامل الزامات طراحی، نصب، و نگهداری سیستم‌های فتوولتائیک در ایران است. این استاندارد اطمینان می‌دهد که تجهیزات وارد شده به کشور از نظر فنی با نیازهای محیطی و اقلیمی ایران مطابقت داشته باشد.

ب) استاندارد ملی ایران شماره ۱۰۰۵ (خدمات انرژی خورشیدی):

- **تعریف:** این استاندارد به ارزیابی سیستم‌های انرژی خورشیدی از جمله بهره‌وری، راندمان، و سازگاری با شرایط محلی در ایران می‌پردازد.
- **اهمیت برای واردات:** به کمک این استاندارد، تجهیزات وارد شده باید با راندمان مناسب و بهره‌وری بالا برای تولید انرژی خورشیدی در شرایط ایرانی تطبیق داشته باشند.

ج) استانداردهای ایمنی ایران (شامل الزامات ایمنی نصب و سیم‌کشی):

- **رعایت ایمنی نصب پنل‌ها و سیستم‌های برق‌گیر خورشیدی نیز در استانداردهای ایرانی ضروری است.** به‌طور خاص، استفاده از تجهیزات مطابق با استانداردهای ایمنی در این زمینه حائز اهمیت است.

۳. راندمان پنل‌های خورشیدی و تاثیر آن بر واردات

در انتخاب پنل‌های خورشیدی برای واردات به ایران، راندمان یا بهره‌وری پنل‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. راندمان پنل‌ها نشان‌دهنده درصد انرژی است که پنل قادر به تبدیل تابش خورشید به انرژی الکتریکی است.

- **راندمان استاندارد پنل‌ها:** در حال حاضر، راندمان پنل‌های خورشیدی تجاری معمولاً بین ۱۵٪ تا ۲۲٪ است. این راندمان بستگی به نوع فناوری (مونوکریستالی، پلی‌کریستالی، یا نوار غیرکریستالی) و کیفیت پنل دارد.

- **راندمان و شرایط آب و هوایی:** در مناطق با تابش بالا مانند ایران، پنل‌های با راندمان بالا (حدود ۲۰٪ به بالا) می‌توانند کارایی بهتری ارائه دهند. این موضوع برای کاهش نیاز به زمین بیشتر و افزایش تولید انرژی اهمیت دارد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای واردات پنل خورشیدی به ایران

برای واردات پنل‌های خورشیدی به ایران، رعایت استانداردهای بین‌المللی مانند **IEC 61215**، **IEC 61730** و **UL 1703** به همراه استانداردهای ملی مانند **استاندارد ملی ایران شماره ۱۹۴۴** ضروری است. همچنین، توجه به **راندمان پنل‌ها** برای تطبیق با شرایط آب و هوایی ایران بسیار مهم است. از این رو، واردکنندگان باید از تولیدکنندگان پنل‌هایی با راندمان بالا و مطابق با این استانداردها انتخاب کنند. این رویکرد باعث می‌شود که هم از نظر فنی و هم از نظر زیست‌محیطی پنل‌های خورشیدی وارد شده به ایران با بهترین کیفیت و کارایی بالا باشند.

مراجع برای ردیابی بیشتر:

1. **IEC 61215** - [IEC Standards](#)
2. **IEC 61730** - [IEC 61730 Safety Standards](#)
3. **ISO 9001** - [ISO Standards](#)
4. **SEIA Solar Energy Facts** - [SEIA](#)
5. **National Renewable Energy Laboratory (NREL)** - [NREL Standards](#)

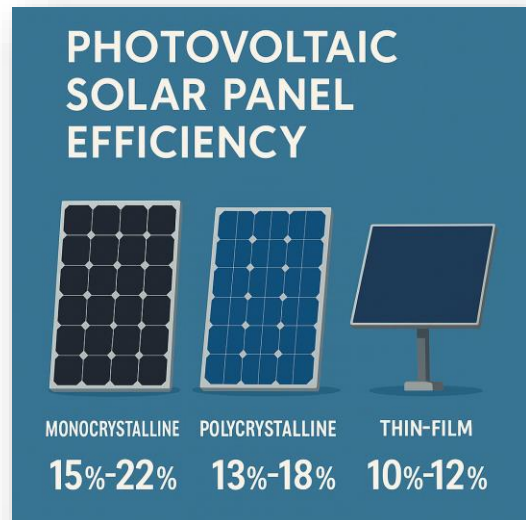
پیوست هشتم

راندمان پنل‌های خورشیدی فتوولتائیک (PV) بسته به نوع پنل، فناوری مورد استفاده، و سازنده متفاوت است.

در زیر به راندمان انواع مختلف پنل‌های فتوولتائیک اشاره می‌کنم:

۱. پنل‌های مونوکریستالی (Monocrystalline):

- راندمان: معمولاً بین ۱۸٪ تا ۲۲٪.
- ویژگی‌ها: این پنل‌ها بالاترین راندمان را در بین انواع مختلف پنل‌های فتوولتائیک دارند. این پنل‌ها از سیلیکون خالص ساخته می‌شوند و به دلیل ساختار یکنواخت بلورهای سیلیکون، کارایی بالاتری دارند.
- کاربرد: پنل‌های مونوکریستالی بیشتر برای استفاده در فضاهای محدود و پروژه‌های تجاری و صنعتی که نیاز به راندمان بالاتری دارند، مناسب هستند.



۲. پنل‌های پلی کریستالی (Polycrystalline):

- راندمان: معمولاً بین ۱۵٪ تا ۱۸٪.
- ویژگی‌ها: این پنل‌ها از سیلیکون ذوب شده ساخته می‌شوند و به طور معمول راندمان کمتری نسبت به پنل‌های مونوکریستالی دارند. این پنل‌ها هزینه کمتری دارند اما به دلیل ساختار بلورهای غیر یکنواخت، کارایی آن‌ها پایین‌تر است.
- کاربرد: این نوع پنل‌ها بیشتر برای پروژه‌هایی که نیاز به هزینه اولیه کمتر دارند و فضای بیشتری برای نصب پنل‌ها در اختیار دارند، مناسب هستند.

۳. پنل‌های نوار غیر کریستالی یا آمورف (Thin-Film):

- راندمان: معمولاً بین ۱۰٪ تا ۱۲٪.
- ویژگی‌ها: پنل‌های نوار غیر کریستالی یا فیلم نازک به طور معمول از مواد شیمیایی مانند کادمیوم تلوراید (CdTe) یا سیلیکون آمورف ساخته می‌شوند. این پنل‌ها سبک‌تر هستند و انعطاف‌پذیری بیشتری دارند، اما راندمان کمتری دارند.
- کاربرد: این پنل‌ها برای پروژه‌هایی که وزن کم و انعطاف‌پذیری بالا را نیاز دارند، مناسب هستند. به ویژه در نصب‌هایی که از فضا و وزن محدود برخوردار هستند، استفاده می‌شوند.

۴. پنل‌های با راندمان بالا (Bifacial):

- راندمان: این پنل‌ها می‌توانند راندمانی تا ۲۵٪ نیز داشته باشند.
- ویژگی‌ها: این پنل‌ها از هر دو طرف قادر به جذب نور هستند. به طور کلی، این پنل‌ها می‌توانند انرژی بیشتری از منابع غیرمستقیم مانند نور منعطف از زمین یا محیط اطراف جذب کنند.

- **کاربرد:** این نوع پنل‌ها برای استفاده در پروژه‌های خاص مانند نیروگاه‌های خورشیدی بزرگ یا سیستم‌هایی که نیاز به جذب حداکثری نور دارند، مناسب هستند.

۵. پنل‌های با فناوری پیشرفته HJT (Heterojunction) و Tandem:

- **راندمان:** پنل‌های HJT می‌توانند راندمانی در حدود ۲۳٪ تا ۲۶٪ داشته باشند.
- **ویژگی‌ها:** این پنل‌ها از ترکیب لایه‌های مختلف مواد برای جذب بیشتر نور استفاده می‌کنند و می‌توانند کارایی بسیار بالاتری نسبت به پنل‌های سیلیکونی معمولی داشته باشند.
- **کاربرد:** این فناوری‌ها بیشتر در پروژه‌های تحقیقاتی و پیشرفته در حال توسعه هستند و به‌طور عمومی در دسترس نیستند، ولی در آینده احتمالاً شاهد استفاده گسترده‌تری از آن‌ها خواهیم بود.

نتیجه‌گیری: در حال حاضر، راندمان پنل‌های فتوولتائیک در حال حاضر معمولاً بین ۱۵٪ تا ۲۵٪ متغیر است و این بستگی به نوع پنل و فناوری مورد استفاده دارد. پنل‌های مونوکریستالی به‌عنوان پرکاربردترین و بالاترین راندمان را دارند، اما پنل‌های پلی کریستالی و نوار غیرکریستالی هم با هزینه پایین‌تر کاربرد دارند. فناوری‌های جدید مانند **پنل‌های HJT** و **Bifacial** به‌ویژه در حال توسعه هستند و می‌توانند راندمان‌های بالاتری را ارائه دهند.

پیوست نهم

روش‌های تست راندمان پنل‌های فتوولتائیک

برای ارزیابی راندمان پنل‌های فتوولتائیک، چندین روش استاندارد و دقیق وجود دارد که توسط سازمان‌های بین‌المللی مانند **IEC (International Electrotechnical Commission)** و **UL** ارزیابی عملکرد آن‌ها در شرایط مختلف و تأثیرات محیطی انجام می‌شود. در اینجا به روش‌های اصلی تست راندمان پنل‌های فتوولتائیک می‌پردازیم:

۱. تست عملکرد در شرایط استاندارد (STC - Standard Test Conditions)

تست راندمان پنل‌های خورشیدی معمولاً در شرایط استاندارد به نام **STC** انجام می‌شود. این شرایط به‌طور دقیق برای ارزیابی عملکرد پنل‌ها تعریف شده‌اند و شامل موارد زیر هستند:

شرایط تست استاندارد (STC):

- تابش نور خورشید: ۱۰۰۰ وات بر متر مربع (W/m^2) که مشابه تابش خورشید در یک روز صاف است.
- دمای سلول: ۲۵ درجه سانتی‌گراد (۷۷ درجه فارنهایت). این دما به‌عنوان دمای آزمایش برای سلول پنل خورشیدی در نظر گرفته می‌شود.
- طیف نور: طیف نور باید مشابه نور خورشید باشد (AM1.5)، که برای ارزیابی عملکرد پنل در شرایط معمولی استفاده می‌شود.

مراحل تست:

۱. اندازه‌گیری توان خروجی: در این تست، توان تولیدی پنل تحت تابش نور خورشید و در دمای استاندارد اندازه‌گیری می‌شود. توان اوج یا **Peak Power** که معمولاً با وات (W) اندازه‌گیری می‌شود، مشخص می‌کند که یک پنل در شرایط ایده‌آل چه میزان انرژی تولید می‌کند.

۲. محاسبه راندمان: راندمان پنل خورشیدی در این شرایط از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

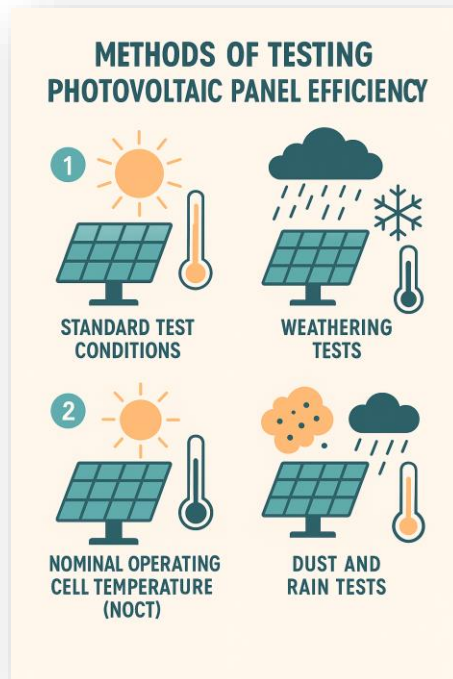
40

توان تابشی (۱۰۰۰ وات بر متر مربع) / توان تولیدی پنل = راندمان

معمولاً راندمان پنل‌های فتوولتائیک در این شرایط بین ۱۵٪ تا ۲۲٪ است.

۲. تست در شرایط واقعی محیطی (IEC 61215)

در شرایط واقعی، پنل‌ها تحت تأثیر دماهای بالا، رطوبت، باد و بارش قرار می‌گیرند که می‌تواند بر راندمان آن‌ها تأثیر بگذارد. بنابراین، برای اطمینان از کارایی و دوام پنل‌ها، تست‌های **IEC 61215** انجام می‌شود که شرایط واقعی محیطی را شبیه‌سازی می‌کند.



آزمون‌ها در این شرایط شامل:

- **تست دما و سرمايش:** پنل‌ها به دماهای بالا و پایین (حدود -۴۰ درجه سانتی‌گراد تا +۸۵ درجه سانتی‌گراد) تحت فشار قرار می‌گیرند تا مقاومت آن‌ها در برابر تغییرات دما و عملکرد آن‌ها بررسی شود.
- **تست بارندگی و رطوبت:** شبیه‌سازی شرایط رطوبتی و بارندگی برای بررسی تأثیرات آب بر عملکرد پنل‌ها و ارزیابی مقاومت آن‌ها در برابر خوردگی و آسیب‌های ناشی از رطوبت.
- **تست سایه‌اندازی:** ارزیابی عملکرد پنل‌ها در شرایطی که قسمتی از آن‌ها سایه می‌افتد و بررسی این‌که چگونه این شرایط بر راندمان کلی تأثیر می‌گذارد.

این تست‌ها معمولاً برای تعیین **طول عمر** پنل‌ها و تضمین عملکرد در طول سال‌ها استفاده می‌شوند.

۳. تست در شرایط عدم تابش (NOCT - Nominal Operating Cell Temperature)

تست **NOCT** برای ارزیابی عملکرد پنل‌ها در شرایطی است که تابش خورشید کمتر از حالت استاندارد باشد (مانند روزهای ابری). در این شرایط، پنل‌ها تحت تابش **۸۰۰ وات بر متر مربع** قرار می‌گیرند.

شرایط تست NOCT:

- **تابش نور خورشید:** ۸۰۰ وات بر متر مربع.
- **دمای محیط:** ۲۰ درجه سانتی‌گراد.
- **دمای سلول:** این تست به شبیه‌سازی عملکرد پنل‌ها در شرایط واقعی و معمولی بیشتر پرداخته و دمای سلول‌ها باید در حدود ۴۵ درجه سانتی‌گراد باشد.

مراحل تست NOCT:

- **اندازه‌گیری توان خروجی:** در این شرایط، میزان تولید انرژی پنل اندازه‌گیری می‌شود و مقایسه می‌شود با شرایط استاندارد (STC).
- **راندمان در شرایط واقعی:** در این تست، راندمان پنل‌ها در شرایط تابش کمتر و دمای بالاتر محیطی ارزیابی می‌شود.

۴. تست باران و گرد و غبار (Dust and Rain Tests)

این تست برای بررسی اثرات گرد و غبار و باران بر راندمان پنل‌ها انجام می‌شود. در مناطق خشک و بیابانی، تجمع گرد و غبار می‌تواند به‌طور قابل توجهی راندمان پنل‌ها را کاهش دهد.

شرایط تست گرد و غبار:

- **شبیه‌سازی گرد و غبار:** این تست‌ها با استفاده از گرد و غبار شبیه‌سازی شده بر سطح پنل‌ها، بررسی می‌کنند که چگونه تجمع گرد و غبار بر توان تولیدی پنل‌ها تأثیر می‌گذارد.

شرایط تست باران:

- شبیه‌سازی باران: بررسی می‌کند که چگونه بارش‌ها بر روی پنل‌ها تأثیر می‌گذارند و آیا شست‌وشوی پنل‌ها پس از بارش به بازگشت راندمان کمک می‌کند یا خیر.

۵. ارزیابی طول عمر پنل‌ها (Lifetime Testing)

یکی دیگر از تست‌های مهم برای پنل‌های خورشیدی، ارزیابی طول عمر آنها است. این تست برای ارزیابی عملکرد پنل‌ها در طول زمان انجام می‌شود و بررسی می‌کند که چگونه شرایط مختلف محیطی بر کارایی آنها تأثیر می‌گذارد.

مراحل تست طول عمر:

- شبیه‌سازی تغییرات طولانی‌مدت: پنل‌ها در معرض دماهای بالا، رطوبت، نور شدید و شرایط محیطی مختلف قرار می‌گیرند تا عملکرد آنها در طول چندین سال بررسی شود.
- محاسبه کاهش راندمان: بررسی کاهش تدریجی راندمان پنل‌ها در طول زمان.

نتیجه‌گیری: در نهایت، تست راندمان پنل‌های فتوولتائیک با استفاده از استانداردهای مختلف مانند **IEC 61215**، **NOCT** و سایر تست‌های محیطی انجام می‌شود. این تست‌ها به تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان کمک می‌کند تا از کیفیت و کارایی پنل‌ها در شرایط مختلف محیطی اطمینان حاصل کنند.