

گزارش پژوهشی :

# بررسی ابعاد توسعه نیروگاه‌های خورشیدی (فتوولتائیک)



اندیشکده اقتصاد مقاومتی

گروه انرژی

فروردین ماه ۱۴۰۲

رهبر معظم انقلاب: علاج برون رفت از مشکلات کشور «اقتصاد مقاومتی» است.

## معرفی اندیشکده اقتصاد مقاومتی

اندیشکده اقتصاد مقاومتی یک کانون تفکر با مأموریت «تصمیم سازی برای حل مسائل اقتصاد کشور در راستای تحقق اقتصاد مقاومتی» است که در سال ۱۳۹۵ فعالیت رسمی خود را آغاز نمود.

شناسایی شبکه مسائل در هر حوزه موضوعی، طراحی راهکار برای حل مسائل احصاء شده و هم‌اندیشی جهت ارزیابی و تدقیق آن، بررسی تجربیات جهانی، طرح مباحث در فضای نخبگانی و رسانه‌ای و پیگیری راهکارهای ارائه شده از دستگاه‌ها و مسئولین مرتبط به منظور اتخاذ تصمیمات لازم، از جمله فعالیت‌هایی است که در اندیشکده انجام می‌شود.

علاقه‌مندان می‌توانند از طریق سایت [Mett.ir](http://Mett.ir) با اندیشکده اقتصاد مقاومتی در ارتباط باشند و نظرات، انتقادات و پیشنهادهای خود را در خصوص این گزارش و همچنین سایر فعالیت‌های اندیشکده، مطرح کنند.

## بررسی ابعاد توسعه نیروگاه‌های خورشیدی (فتوولتاییک)

انرژی	گروه موضوعی:
پژوهشی	نوع گزارش:
۱۴۰۲۰۱۱۲۵	شناسه:
۱۴۰۲/۰۱/۳۱	تاریخ انتشار:
محمدحسین احمدی	تهیه و تدوین:
صالح رحیمی	همکاران:
افشین غلامعلی پور	مدیر مطالعه:
محمد مهدی یزدانی	ناظر علمی:



## خلاصه مدیریتی

در طول سه دهه اخیر ظرفیت تولید برق ایران سالانه به طور متوسط ۲۴۰۰ مگاوات رشد کرده و سبد تولید برق کشور در حدود ۸۵ درصد به گاز طبیعی، به عنوان منبع اولیه انرژی وابسته شده است. با توجه به پایان پذیری و محدودیت در عرضه سوخت فسیلی، وابستگی شدید تولید برق به گاز طبیعی می‌تواند عاملی برای تهدید امنیت عرضه انرژی کشور باشد. ضمن اینکه در حال حاضر کشور با کسری تولید برق مواجه است و باید ظرفیت تولید برق خود را افزایش دهد. بنابراین تنوع بخشی به سبد تولید برق یک نیاز و ضرورت برای کشور است.

نیروگاه‌های خورشیدی در جهان به عنوان یکی از منابع تجدیدپذیر به سرعت در حال رشد هستند. ایران با توجه به ظرفیت‌های خوبی که به دلیل موقعیت جغرافیایی خود برای توسعه نیروگاه‌های خورشیدی دارد، می‌تواند با بهره‌گیری از این نیروگاه‌ها منجر به کاهش وابستگی صنعت برق به منابع فسیلی و در نتیجه افزایش امنیت انرژی و توسعه زنجیره ارزش نفت و گاز شود. در سال ۲۰۲۱ نیروگاه‌های جدید فتوولتاییک با ظرفیتی در حدود ۱۶۸ گیگاوات در سراسر جهان ساخته شد که رشدی ۲۱ درصدی نسبت سال ۲۰۲۰ داشته است. با احتساب این رشد، ظرفیت کل نیروگاه‌های فتوولتاییک در جهان تا پایان سال ۲۰۲۱ به ۹۴۰ گیگاوات رسید.

با ظهور فناوری خورشیدی فتوولتاییک و سپس تجاری شدن آن، از اواخر دهه ۱۹۷۰ به مدت سه دهه، عمده پنل خورشیدی در جهان را آمریکا تولید می‌کرد. اما بین سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۳ توسعه صنعت پنل خورشیدی در چین تا ۸۰ درصد قیمت‌های جهانی را کاهش داد که یک دستاورد خیره‌کننده در یک بازار با فناوری بالا و رقابتی محسوب می‌شد. در حقیقت گسترش انرژی‌های تجدیدپذیر به یکی از هفت دسته کسب و کاری تبدیل شد که تحت برنامه‌های پنج ساله چین مورد توجه ویژه و حمایت‌هایی نظیر وام‌ها و مشوق‌های مالیاتی قرار می‌گرفت. با این اقدامات چین توانست بازار ساخت پنل خورشیدی فتوولتاییک را بدست بگیرد، به طوری که در حال حاضر ۷۵ درصد پنل مورد استفاده جهان در چین تولید می‌شود و از بین ۱۰ شرکت بزرگ تولیدکننده پنل و سلول خورشیدی جهان در سال ۲۰۲۰، ۸ شرکت چینی هستند. در ایران چند شرکت خط مونتاژ پنل خورشیدی وجود دارد اما سیلیکون و سلول خورشیدی مورد نیازشان وارداتی است.

با توجه به ماهیت غیریکنواخت نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتاییک در تولید، از نظر فنی یکی از الزامات حیاتی توسعه این نیروگاه‌ها، افزایش انعطاف شبکه متناسب با افزایش ظرفیت نیروگاه‌های تجدیدپذیر است که البته راهکارهای مختلفی برای آن وجود دارد. در جدول زیر خلاصه‌ای از اثرات مختلف توسعه نیروگاه‌های فتوولتاییک آمده است.

نوع اثر	آثار (مزیت یا عیب)
فنی	× عدم قطعیت تولید و نیاز به افزایش انعطاف‌پذیری شبکه × کاهش قطعیت تولید با افزایش ظرفیت در یک ناحیه خاص (تراکم ساخت)
اقتصادی و اجتماعی	✓ بازده بالای سرمایه‌گذاری ✓ افزایش امنیت انرژی ✓ ایجاد اشتغال ✓ توسعه منطقه‌ای ✓ کاهش هزینه انرژی ✓ عدم وابستگی به شبکه سراسری × هزینه اولیه بالای سرمایه‌گذاری × نیاز به زمین زیاد × وابستگی به نور خورشید و شرایط آب و هوایی × هزینه بالای سیستم ذخیره انرژی × کمبود مواد مورد نیاز برای تولید پنل
زیست محیطی	✓ عدم انتشار آلاینده و گاز گلخانه‌ای × استفاده زیاد از زمین و آلودگی گرمایی × ضایعات مربوط به تجهیزات × تهدید منابع طبیعی برای تولید تجهیزات
پدافندی	✓ افزایش امنیت انرژی با تنوع بخشی به سبد تولید برق ✓ کاهش وابستگی به شبکه سراسری برق و امکان تولید محلی برق

از نظر ظرفیت تولید، نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتاییک به دو دسته مقیاس کوچک (خانگی و تجاری) که کمتر از ۱ مگاوات هستند و بزرگ مقیاس (متمرکز) که بیشتر از ۱ مگاوات ظرفیت دارند تقسیم می‌شوند. در جدول زیر نقاط قوت، ضعف، تهدیدها و فرصت‌های توسعه نیروگاه‌های مقیاس کوچک متصل به شبکه آمده است.

نقاط قوت	نقاط ضعف
<ul style="list-style-type: none"> <li>منبع تغذیه پایدار به دلیل اتصال به شبکه</li> <li>کاهش تلفات توزیع هنگام نصب سیستم فتوولتاییک در محل استفاده</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>افزایش هزینه‌ها (شامل هزینه‌های سیستمی)</li> <li>خطرات مربوط به اتصال به شبکه (به عنوان مثال اضافه ولتاژ، جزیره‌ای شدن ناخواسته برای شبکه‌های ولتاژ پایین/متوسط)</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• استفاده از پنل به عنوان نمای ساختمان و عدم نیاز به تغییر کاربری زمین</li> </ul>
<b>تهدیدها</b>	<b>فرصت‌ها</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• پایداری شبکه در سطح نفوذ بالا</li> <li>• نارسایی با مشخصات مصرف</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• کمک به سیاست‌های کم کربن</li> <li>• ساختمان‌های کم مصرف یا انرژی مثبت برای انتقال انرژی</li> <li>• عدم وابستگی به شبکه سراسری</li> <li>• افزایش قابلیت اطمینان از طریق گسترش پراکندگی جغرافیایی</li> </ul>

همچنین در جدول زیر برای نیروگاه‌های مقیاس بزرگ متصل به شبکه نقاط قوت، ضعف، فرصت‌ها و تهدیدها به صورت خلاصه آورده شده است.

<b>نقاط ضعف</b>	<b>نقاط قوت</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• هزینه‌های ساخت در مقایسه با سایر فناوری‌ها در بازار برق</li> <li>• متناوب و غیرقابل ارسال به نقاط دور شبکه</li> <li>• اشغال فضای زیاد نسبت به برق تولیدی</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• کاهش هزینه‌های نصب، عملیاتی و تعادل سیستم با افزایش مقیاس نیروگاه</li> </ul>
<b>تهدیدها</b>	<b>فرصت‌ها</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• قیمت سوخت‌های فسیلی</li> <li>• مدیریت شبکه</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• کمک به سیاست‌های کم کربن</li> </ul>

ایران به دلیل موقعیت ویژه جغرافیایی خود از زاویه تابش مناسبی در تمام طول سال برخوردار است و میزان شدت تابش خورشید در ایران به‌طور متوسط از میانگین جهانی بالاتر است و بیش از ۲۸۰ روز آفتابی در بیش از ۹۰ درصد مساحت این کشور ثبت شده است. همچنین منحنی روزانه تولید یک نیروگاه خورشیدی فتوولتاییک با منحنی روزانه بار شبکه برق ایران تطابق قابل قبولی دارد که از پذیرش ظرفیت بالای نیروگاه فتوولتاییک بدون ایجاد مشکل در شبکه برق خبر می‌دهد. اهمیت تنوع بخشی به سبد تأمین برق کشور، ایجاد اشتغال و کاهش هزینه‌های مربوط به توسعه شبکه توزیع و انتقال از دیگر مزیت‌های توسعه نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتاییک در ایران است.

در ایران سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی (ساتبا) متولی توسعه نیروگاه‌های تجدیدپذیر است. تا پیش از تشکیل این سازمان، سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا) متولی این امر بود و همزمان برخی از سازمان‌ها و وزارتخانه‌ها، فعالیت‌هایی به صورت موازی انجام می‌دادند. اما تشکیل ساتبا تمام این فعالیت‌ها را تجمیع کرد که تنها متولی توسعه نیروگاه‌های تجدیدپذیر در کشور این سازمان باشد.

در حال حاضر مجموع ظرفیت نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتاییک متمرکز متصل به شبکه (ظرفیت بیش از ۱۰۰ کیلووات) حدود ۴۰۰ مگاوات است. این میزان کمتر از ۰,۵ درصد از ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های کشور است. بیشتر این ظرفیت (نیروگاه‌های ظرفیت بالا و نزدیک ۱۰ مگاوات) با سرمایه‌گذاری خارجی و پس از سال ۹۴ وارد مدار شده‌اند که نشان دهنده عدم تمایل بخش خصوصی داخلی برای سرمایه‌گذاری در این حوزه است. دلایل این امر را می‌توان در عدم ثبات اقتصادی، قیمت پایین سوخت تحویلی به نیروگاه‌های حرارتی و سابقه بد وزارت نیرو در پرداخت مطالبات بخش خصوصی بیان کرد.

در نهایت پیشنهادهای زیر در راستای توسعه نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتاییک مطرح می‌شود:

- اصلاح اقتصاد برق یکی از مهمترین راهکارها برای رقابتی شدن نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتاییک با نیروگاه‌های حرارتی است. در حقیقت منطقی شدن قیمت گاز طبیعی مصرفی نیروگاه‌های حرارتی، علاوه بر الزام این نیروگاه‌ها به افزایش بهره‌وری به توسعه سایر روش‌های تولید برق کمک می‌کند.
- به منظور کاهش هزینه‌های تجهیزات مرتبط با طرح‌های بزرگ نیروگاه‌های خورشیدی، دولت می‌تواند با شرکت‌های چینی که هم‌اکنون زنجیره کامل فناوری خورشیدی فتوولتاییک را در اختیار دارند، وارد مذاکره شود و از ظرفیت‌های داخلی با انتقال بخشی از زنجیره به داخل کشور استفاده کند و علاوه بر تأمین هدف فوق موجب اشتغال‌زایی در این حوزه شود.

## فهرست مطالب

مقدمه.....	۹
فصل ۱. آشنایی با نیروگاه‌های خورشیدی.....	۱۲
۱-۱- انواع فناوری خورشیدی.....	۱۲
۱-۱-۱- فناوری‌های حرارتی.....	۱۲
۱-۱-۲- فناوری‌های فتوولتائیک.....	۱۹
۲-۱- اجزای نیروگاه فتوولتائیک.....	۲۰
۱-۲-۱- انواع فناوری سلول فتوولتائیک.....	۲۰
۲-۲-۱- زنجیره ارزش فناوری فتوولتائیک.....	۲۲
۳-۱- بررسی بازار فتوولتائیک.....	۲۴
۱-۳-۱- شرکت‌های تولیدکننده تجهیزات فتوولتائیک.....	۲۶
فصل ۲. ارزیابی توسعه نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتائیک.....	۳۸
۱-۲- ارزیابی توسعه نیروگاه فتوولتائیک از منظر فنی و شبکه.....	۳۸
۱-۱-۲- اتصال نیروگاه فتوولتائیک به شبکه.....	۳۸
۲-۱-۲- چالش‌های توسعه نیروگاه‌های فتوولتائیک از دید مدیریت شبکه و سیستم‌های توزیع و فوق توزیع.....	۴۰
۲-۲- ارزیابی توسعه نیروگاه‌های فتوولتائیک از منظر اجتماعی- اقتصادی.....	۴۷
۳-۲- ارزیابی توسعه نیروگاه‌های فتوولتائیک از منظر زیست محیطی.....	۵۰
۴-۲- ارزیابی توسعه نیروگاه‌های فتوولتائیک از منظر پدافندی و امنیت انرژی.....	۵۱
۵-۲- ارزیابی توسعه نیروگاه‌های فتوولتائیک از منظر SWOT.....	۵۳
۱-۵-۲- تحلیل توسعه نیروگاه‌های فتوولتائیک جدا از شبکه.....	۵۳
۲-۵-۲- تحلیل توسعه نیروگاه‌های فتوولتائیک متصل به شبکه.....	۵۴
فصل ۳. پتانسیل‌ها و مزیت‌های توسعه نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتائیک در ایران.....	۵۸
۱-۳- وضعیت مناسب جغرافیایی ایران از لحاظ تابش.....	۵۸
۲-۳- منطبق بودن تولید نیروگاه فتوولتائیک با منحنی بار شبکه ایران.....	۵۹
۳-۳- تنوع بخشی به سبد تولید برق کشور.....	۶۱
۴-۳- کاهش هزینه‌های توسعه شبکه انتقال و توزیع.....	۶۱
۵-۳- ایجاد اشتغال.....	۶۱
فصل ۴. بررسی توسعه نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتائیک در ایران.....	۶۲

۶۲	۴-۱- تاریخچه توسعه نیروگاه‌های فتوولتاییک در ایران
۶۴	۴-۲- مراحل احداث و بهره‌برداری از نیروگاه‌های فتوولتاییک در ایران
۶۴	۴-۲-۱- بهره‌برداری از نیروگاه‌های مقایس کوچک (کمتر از ۱ مگاوات)
۶۵	۴-۲-۲- بهره‌برداری از نیروگاه‌های مقایس بزرگ (بیشتر از ۱ مگاوات)
۶۶	۴-۳- وضعیت فعلی توسعه نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتاییک در ایران
۷۲	فصل ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۷۳	منابع

## فهرست جداول

۳۶	جدول ۱. طرح توجیهی نیروگاه فتوولتاییک یک مگاواتی در کشور در سال ۱۴۰۰
۳۸	جدول ۲. طبقه‌بندی منابع تولید پراکنده با توجه به قدرت نامی
۴۰	جدول ۳. ارتباط کلاس و طرح‌های تعیین شده اتصال منابع تولید پراکنده
۵۰	جدول ۴. میزان انتشار آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای برای تولید هر مگاوات ساعت برق برحسب پوند
۵۳	جدول ۵. شاخص امنیت انرژی برای نیروگاه‌های تولید برق
۵۴	جدول ۶. تحلیل SWOT برای توسعه نیروگاه‌های فتوولتاییک جدا از شبکه
۵۵	جدول ۷. تحلیل SWOT برای نیروگاه‌های فتوولتاییک تولید پراکنده متصل به شبکه
۵۶	جدول ۸. تحلیل SWOT برای نیروگاه‌های فتوولتاییک متمرکز متصل به شبکه
۷۰	جدول ۹. سهم انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک از تولید برق (ناویژه) کشور

## فهرست اشکال

۱۳	شکل ۱. کلکتور سهوی
۱۴	شکل ۲. بازتابنده فرنل
۱۵	شکل ۳. برج خورشیدی
۱۶	شکل ۴. دیوار ترومب و نحوه عملکرد آن
۱۷	شکل ۵. ترموسیفون و نحوه عملکرد آن
۱۸	شکل ۶. آب‌گرمکن خورشیدی
۱۹	شکل ۷. مکانیزم عملکرد کلکتور خورشیدی تخت
۲۰	شکل ۸. اجزای نیروگاه فتوولتاییک متصل به شبکه
۲۳	شکل ۹. اجزای تشکیل دهنده یک پنل خورشیدی (سلول، ماژول و آرایه)
۲۳	شکل ۱۰. زنجیره ارزش تولید پنل‌های فتوولتاییک



- شکل ۱۱. طرح‌های اتصال منابع تولید پراکنده به شبکه برق ..... ۳۹
- شکل ۱۲. روش‌های افزایش انعطاف‌پذیری سیستم قدرت ..... ۴۵
- شکل ۱۳. انواع فناوری‌های ذخیره‌ساز انرژی و ویژگی‌های آن‌ها ..... ۴۶
- شکل ۱۴. مقایسه پتانسیل نیروگاه‌های فتوولتاییک در ایران و آلمان ..... ۵۹
- شکل ۱۵. ظرفیت نیروگاه‌های تجدیدپذیر کشور به تفکیک استان (مگاوات) ..... ۶۹
- شکل ۱۶. استان‌های پیشرو از منظر ظرفیت نیروگاه‌های تجدیدپذیر ..... ۶۹

## فهرست نمودارها

- نمودار ۱. سهم نیروگاه‌ها از ظرفیت نیروگاهی کشور ..... ۹
- نمودار ۲. مصرف سالانه گاز در بخش نیروگاهی برحسب میلیارد مترمکعب ..... ۱۰
- نمودار ۳. حداکثر تقاضای برق (پیک) در سال‌های مختلف و میزان تأمین شده ..... ۱۱
- نمودار ۴. سهم فعلی و پیش‌بینی آینده هر فناوری سلول خورشیدی در بازار ..... ۲۲
- نمودار ۵. مجموع ظرفیت نیروگاه‌های فتوولتاییک در جهان (گیگاوات) ..... ۲۵
- نمودار ۶. میزان برق تولید شده از منابع فتوولتاییک در جهان برحسب تراوات ساعت ..... ۲۵
- نمودار ۷. سهم منابع مختلف تولید برق در جهان (۲۰۲۱-۲۰۱۷) برحسب درصد ..... ۲۶
- نمودار ۸. روند قیمت هر وات ظرفیت پنل فتوولتاییک بر حسب دلار ..... ۲۷
- نمودار ۹. سهم کشورهای مختلف از بازار سلول فتوولتاییک ..... ۲۸
- نمودار ۱۰. سهم کشورهای مختلف در تولید ماژول فتوولتاییک در سال ۲۰۲۱ (درصد) ..... ۲۹
- نمودار ۱۱. ظرفیت تولید سلول فتوولتاییک شرکت‌های بزرگ در سال ۲۰۲۲ (مگاوات) ..... ۳۲
- نمودار ۱۲. ده شرکت برتر تولیدکننده اینورتر جهان در سال ۲۰۲۱ ..... ۳۵
- نمودار ۱۳. منحنی بار شبکه با وجود ظرفیت بالای فتوولتاییک ..... ۴۲
- نمودار ۱۴. منحنی شبانه‌روزی تعدیل شده شبکه برق ایران در سال ۲۰۱۵ ..... ۶۰
- نمودار ۱۵. منحنی تولید برق نیروگاه خورشیدی در یک شبانه روز ..... ۶۰
- نمودار ۱۶. میزان و سهم نیروگاه‌های تجدیدپذیر تا آذر ۱۴۰۱ (مگاوات) ..... ۶۶
- نمودار ۱۷. ظرفیت نیروگاه‌های تجدیدپذیر در کشور در هر سال برحسب مگاوات ..... ۶۷
- نمودار ۱۸. تولید نیروگاه‌های تجدیدپذیر در سال ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ (هزار کیلووات ساعت) ..... ۶۸
- نمودار ۱۹. میزان تولید برق چند نیروگاه خورشیدی فتوولتاییک در ماه‌های یک سال (کیلووات ساعت) ..... ۷۱