

## بررسی و مقایسه کارایی سیستم‌های ردیاب خورشیدی تک‌محوره و دو‌محوره در بهینه‌سازی تولید انرژی برق خورشیدی

امید آذری<sup>۱\*</sup>، ندا اسدی جعفری<sup>۲</sup>

۱- دکتری تخصصی، معماری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، البرز، ایران. (arturazeri77@gmail.com)

۲- دکتری تخصصی، معماری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران. (drnedaasadi@gmail.com)

### چکیده

امروزه روش‌های مختلفی برای افزایش راندمان تبدیل انرژی خورشیدی وجود دارد. به دلیل حرکت خورشید، سیستم‌های فتوولتائیک ثابت سنتی بیشتر اوقات تحت تابش نور خورشید با زاویه مایل قرار دارند و نمی‌توانند از منابع نوری به طور کامل استفاده کنند. با معرفی سیستم ردیابی خورشید، نرخ دریافت نور افزایش می‌یابد و ظرفیت تولید به طور قابل توجهی نسبت به کارایی سیستم، بهبود پیدا می‌کند و هزینه تولید برق خورشیدی را کاهش می‌دهد. بسته به طراحی سیستم ردیابی خورشید (ردیاب‌های خورشیدی) می‌توان آنها را به صورت تک‌محوره و دو‌محوره طبقه‌بندی کرد. ردیاب‌های خورشیدی تک‌محوره با استفاده از الگوریتم‌های مختلف در یک صفحه افقی در جهت خورشید می‌چرخند. در این حالت، ردیاب‌های خورشیدی تک‌محوره تغییر ارتفاع خورشید در طول روز را در نظر نمی‌گیرند. زاویه پنل خورشیدی برابر با عرض جغرافیایی منطقه‌ای است که ردیاب در آن نصب شده است. ردیاب‌های خورشیدی دو‌محوره نسبت به تک‌محوره مزیت دارند، زیرا تغییر ارتفاع خورشید را در طول روز و در طول سال در نظر می‌گیرند. در این مطالعه با معرفی و مقایسه روش‌های ذکر شده به بررسی راهکارهای موثر و کارآمد برای استفاده بهینه از انرژی خورشید برای تولید انرژی پرداخته شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان‌دهنده بهبود قابل توجه در دقت اندازه‌گیری تابش مستقیم خورشید با استفاده از این سیستم ردیابی تطبیقی است.

**واژه‌های کلیدی:** انرژی خورشیدی، سیستم کنترل ردیابی خورشیدی، سیستم هوشمند مستقل، تک و دو محوره.

### ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، توجه ویژه‌ای به منابع انرژی تجدیدپذیر به ویژه انرژی خورشیدی شده است. سیستم‌های فتوولتائیک برای تولید برق پاک در مقیاس وسیع به کار می‌روند، اما بازده تبدیل انرژی خورشیدی هنوز بهبودپذیر است. پنل‌های ثابت خورشیدی اغلب به دلیل حرکت ظاهری خورشید در آسمان، اکثر اوقات در زاویه‌ای نسبت به تابش نور قرار دارند و نمی‌توانند از کل انرژی تابشی بهره‌برداری کامل کنند. این امر منجر به از دست دادن بخش قابل توجهی از انرژی خورشیدی می‌شود. برای رفع این مشکل، سیستم‌های ردیاب خورشیدی معرفی شده‌اند. در این سیستم‌ها، پانل‌ها همواره در بهترین زاویه ممکن نسبت به خورشید قرار می‌گیرند. نتیجه این است که نرخ دریافت نور خورشید افزایش یافته و تولید برق نسبت

به حالت ثابت به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. از مزایای برجسته این سیستم‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: افزایش راندمان کلی تبدیل انرژی با دنبال کردن دقیق مسیر خورشید در طول روز. بهینه سازی تولید برق و بهره برداری از پانل‌ها در ساعات صبحگاهی و شامگاهی. کاهش هزینه‌های نهایی سرمایه‌ای با تولید انرژی بیشتر در واحد سطح. ردیاب‌های خورشیدی را بر اساس تعداد محورها می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد: - تک محوره: این سیستم‌ها حول یک محور شمال-جنوب می‌چرخند تا زاویه افقی تابش خورشید (شرق به غرب) را دنبال کنند. زاویه میل پانل در این سامانه ثابت بوده و معمولاً برابر با عرض جغرافیایی محل نصب است. بنابراین، ردیاب تک محوره فقط زاویه سمت تابش را اصلاح می‌کند و تغییرات ارتفاعی خورشید را پوشش نمی‌دهد. با این حال، هزینه ساخت و نگهداری این سامانه نسبتاً کمتر است و برای مزارع خورشیدی بزرگ مناسب تلقی می‌شود. دومحوره: در این نوع سیستم‌ها، پانل می‌تواند حول دو محور عمودی و افقی بچرخد. به عبارت دیگر، علاوه بر زاویه سمت، تغییرات ارتفاع خورشید را نیز دنبال می‌کند. این قابلیت اجازه می‌دهد که پانل در کل سال تقریباً مستقیم در جهت خورشید قرار گیرد و بیشترین نور را دریافت کند. اگرچه پیچیدگی و هزینه نصب ردیاب دومحوره بیشتر است، اما در مناطقی با تغییرات زیاد زاویه خورشید (به ویژه در عرضهای جغرافیایی بالا) راندمان کلی بسیار بالاتر است. برای بهینه سازی عملکرد ردیاب‌ها، از الگوریتم‌های کنترلی متنوعی استفاده می‌شود. دو روش متداول عبارتند از: - مسیریابی خورشیدی: مختصات موقعیت خورشید برای هر زمان در طول سال محاسبه و در حافظه ذخیره می‌شود. کنترلر با توجه به ساعت و تاریخ، پانل را در جهت مناسب قرار می‌دهد تا همیشه به خورشید نشانه روی کند. - ردیابی مبتنی بر حسگر: چند حسگر نوری (مانند پنلهای کوچک فتوولتائیک) در مجموعه نصب می‌شوند تا شدت نور را در جهت‌های مختلف اندازه‌گیری کنند. کنترلر مدام جریان یا ولتاژ خروجی این حسگرها را پایش کرده و پانل اصلی را به جهتی می‌چرخاند که بیشترین نور را دریافت کند. این روش در شرایط ابری بسیار مؤثر است؛ زیرا حسگرها تشخیص می‌دهند چه زاویه‌ای بیشترین انرژی را می‌گیرد و پانل را متناظر تنظیم می‌کنند. بسیاری از سامانه‌ها هر دو روش را با هم ترکیب می‌کنند تا دقت ردیابی به حداکثر برسد. همچنین، ردیاب‌های پیشرفته امکان نظارت و کنترل از راه دور را فراهم می‌کنند. با استفاده از ماژول‌های ارتباط بیسیم، پارامترهای مهم مانند ولتاژ و جریان باتری، دمای پانل‌ها و وضعیت عملکرد سیستم به‌صورت لحظه‌ای پایش می‌شوند که این قابلیت نگهداری پیشگیرانه و عیب‌یابی سریع را تسهیل می‌کند. مطالعات نشان می‌دهد استفاده از ردیاب‌های خورشیدی منجر به افزایش قابل توجه تولید انرژی در مزارع خورشیدی می‌شود. به عنوان مثال، سیستم‌های دومحوره در بسیاری از شرایط اقلیمی توانسته‌اند تولید برق را به سیستم‌های ثابت افزایش دهند. این افزایش راندمان به معنای بهره‌برداری بهینه‌تر از منابع خورشیدی و کاهش هزینه تولید هر کیلو وات ساعت است. همچنین، تنظیم دقیق زاویه تابلوها در شرایط متغیر جوی (مانند زمان‌های ابری) دقت سیستم را بالا برده و پایداری عملکرد آن را تضمین می‌کند. در مجموع، فناوری ردیاب خورشیدی به عنوان یکی از راهکارهای مؤثر برای بهبود بازده پنل‌های خورشیدی مطرح است. این سیستم‌ها با دنبال کردن دقیق مسیر نور خورشید در آسمان، امکان تولید انرژی حداکثری را فراهم می‌آورند و ضمن کاهش هزینه‌ها، نقش مهمی در توسعه انرژی‌های پاک ایفا می‌کنند.

## ۲- مبانی نظری

سامانه های ردیابی خورشیدی برای تنظیم موقعیت پنل های فتوولتائیک در راستای حرکت خورشید در طول روز طراحی شده اند تا در مقایسه با سازه های ثابت، انرژی بیشتری دریافت کنند. مطالعات متعددی نشان داده اند که استفاده از ردیاب ها می تواند به طور چشمگیری بازده انرژی را افزایش دهد. برای نمونه، یک مرور پژوهشی گزارش کرده است که سامانه های دوماحوره به طور میانگین بیش از ۲۷٪ عملکرد بهتری نسبت به پنلهای ثابت دارند [1]. همچنین پژوهش دیگری نشان می دهد که ردیاب های تک محوره حداقل حدود ۲۰٪ و ردیاب های دوماحوره تا بیش از ۴۰٪ انرژی بیشتری نسبت به سامانه های ثابت تولید می کنند [2]. میزان این بهبود به شرایط محیطی و نوع طراحی بستگی دارد، اما به طور کلی هر دو نوع ردیاب عملکرد بهتری نسبت به سامانه های ثابت ارائه می دهند، هرچند ردیاب های دوماحوره از نظر سازه و کنترل پیچیده تر هستند.

## ۱-۲ عملکرد سامانه های ردیابی تک محوره و دوماحوره

اخیرا نتایج مطالعات میدانی و شبیه سازی شده نشان می دهد که ردیاب های تک محوره معمولاً افزایش بازدهی قابل توجهی دارند. در یک مطالعه موردی در شهر مانتا، اکوادور (در نزدیکی خط استوا)، دو نوع ردیاب تکمحوره آزمایش شدند: یکی مبتنی بر الگوریتم موقعیت خورشید (نجومی) و دیگری بر اساس حسگرهای نوری. هر دو سامانه عملکردی بسیار بهتر از پنل ثابت داشتند؛ تولید خالص انرژی در ردیاب نجومی ۳۱،۸٪ و در ردیاب LDR ۳۷٪ بیشتر از سامانه ثابت بود [3]. با این حال، ردیاب نجومی از نظر بازدهی نهایی و مصرف انرژی موتور عملکرد بهتری داشت و تنها دو دقیقه در هر ساعت نیاز به فعالسازی داشت، در حالی که سیستم LDR به صورت پیوسته فعال بود. در پژوهش های دیگر نیز نتایج مشابهی گزارش شده است. آل شعبانی [4] بیان می کند که ردیاب تک محوره حدود ۳۷،۵٪ و ردیاب دوماحوره ۴۳،۹٪ انرژی بیشتری نسبت به پنل ثابت تولید کرده اند. در آزمایش جدید وی، ردیاب حسگری حدود ۲۰٪ بازدهی بیشتر نسبت به سامانه ثابت داشت. این یافته ها نشان می دهد که ردیاب های تکمحوره معمولاً افزایش انرژی در محدوده چند ده درصدی ایجاد می کنند. همچنین این نوع سامانه ها به دلیل سادگی مکانیکی و هزینه پایین تر نسبت به سامانه های دوماحوره، در بسیاری از پروژه ها گزینه ای اقتصادی تر محسوب می شوند. ردیاب های دوماحوره با قابلیت تنظیم زاویه در دو محور (آزیموت و ارتفاع)، قادرند مسیر خورشید را دقیق تر دنبال کنند و در نتیجه، معمولاً انرژی بیشتری تولید می کنند. مرور پژوهشی نشان می دهد که ردیاب های دوماحوره به طور میانگین بیش از ۲۷٪ انرژی بیشتری نسبت به سامانه های ثابت تولید می کنند. همچنین، گزارش کرده اند که ردیاب های دوماحوره می توانند بین ۲۰٪ تا ۴۰٪ بازدهی بیشتری نسبت به سامانه های غیرردیاب داشته باشند. در یک آزمایش در نپال، ردیاب دوماحوره مبتنی بر LDR در شرایط نیمه ابری حدود ۷،۷٪ تا ۱۲،۵٪ بازدهی بالاتری نسبت به پنل ثابت داشت. پژوهشهای دیگر نیز افزایش های بزرگتری (حدود ۲۳٪ تا ۳۱٪) گزارش کرده اند با این حال، پیچیدگی مکانیکی و هزینه نگهداری ردیاب های دوماحوره بیشتر است. این سامانه ها پیچیده ترین نوع ردیاب ها از نظر سازه و کنترل هستند و در نتیجه تصمیم گیری میان نوع تک محوره یا دوماحوره باید بر اساس توازن بین بازدهی و هزینه انجام شود [5]. در حوزه پیاده سازی، سامانه های ردیابی می توانند باز یا بسته باشند. ردیاب های مبتنی بر الگوریتم های نجومی (Open-loop) به حسگر نیاز ندارند و اگر به درستی کالیبره شوند، کارایی بسیار بالایی دارند. در مقابل، سامانه های مبتنی بر حسگر (Closed-loop) بهینه سازی لحظه ای را فراهم می کنند اما به انرژی و نگهداری بیشتری نیاز دارند. علاوه بر این، استفاده از فناوری های جدید مانند کنترل گرهای هوشمند و پایش لحظه ای (IoT) موجب افزایش دقت و پایداری عملکرد شده است [3]. از نظر اقتصادی، انتخاب نوع ردیاب به شرایط اقلیمی و هزینه سرمایه

گذاری بستگی دارد. در مناطق با تابش مستقیم زیاد، افزایش انرژی تولیدی از ردیاب‌های دایره‌محور ممکن است هزینه‌های اضافی را توجیه کند؛ اما در شرایط دیگر، سامانه‌های تک‌محوره گزینه‌ای متعادل میان هزینه و عملکرد هستند. به طور کلی، یافته‌های پژوهش‌های ۲۰۲۳ تا ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که هر دو نوع ردیاب تک‌محوره و دایره‌محور می‌توانند بازده انرژی خورشیدی را به طور قابل توجهی افزایش دهند اما انتخاب نهایی باید بر اساس عوامل اقلیمی، هزینه، پیچیدگی و قابلیت نگهداری انجام گیرد [2].

## ۲-۲ الگوریتم‌های کنترل

چندین الگوریتم کنترل بازخورد برای پردازش داده‌های حسگر و محاسبه دستورات محرک استفاده می‌شوند. انتخاب الگوریتم بر پاسخگویی، پایداری و دقت تأثیر می‌گذارد [6]:  
کنترل On-Off\* :

این روش کنترل حلقه بسته ساده‌ترین نوع است که بر اساس علامت خطا، عملکرد را به طور کامل روشن یا خاموش می‌کند. در پیگیری خورشید، کنترل on-off ممکن است موتور را تا زمانی که جفت سنسورهای نور حداکثر روشنایی تراز شوند، هدایت کند، و سپس آن را متوقف سازد. مزیت اصلی آن، سادگی و مقاومت (عدم نیاز به تنظیمات پیچیده) است. اما، این روش معمولاً حول نقطه تنظیم نوسان می‌کند و خطای استقرار<sup>†</sup> بزرگتری نسبت به کنترل‌های پیشرفته‌تر دارد. در حقیقت، کنترل on-off بیش‌ترین کاربرد را در ادبیات مربوط به سیستم‌های پیگیری خورشید دارد؛ به طوری که در حدود ۵۷٪ از مطالعات این حوزه از این روش استفاده می‌کنند.  
کنترل PID<sup>‡</sup> :

کنترل‌های تناسبی-انتگرالی-مشتقی، سه عمل بر خطای مسیر انجام می‌دهند. وظیفه قسمت تناسبی پاسخ‌دهی متناسب با خطاست، قسمت انتگرالی خطای استقرار را حذف می‌کند، و قسمت مشتقی نوسانات را کاهش می‌دهد. آن‌ها زمانی خوب عمل می‌کنند که دینامیک سیستم معتدل و نسبتاً خطی باشد. در پیگیری خورشید، PID می‌تواند حرکت نرم و پیوسته‌ای با کم‌ترین عبور بیش از حد از نقطه هدف<sup>§</sup> فراهم آورد. بر اساس گزارش Fuentes-Morales و همکاران، در حدود ۶٪ از پیاده‌سازی‌های سیستم‌های ردیابی حلقه بسته، از کنترل PID استفاده کرده‌اند. تنظیم PID (انتخاب ضرایب تناسبی، انتگرالی و مشتقی) لازم است، که می‌تواند به صورت تجربی یا از طریق روش‌های بهینه‌سازی انجام شود. یک عیب آن است که PID فرض می‌کند سیستم خطی است؛ بنابراین، اثرات بزرگ اختلالات یا اثرات غیرخطی مانند بازی دنده ممکن است باعث کاهش دقت شود [6].  
کنترل منطق فازی\*\* :

کنترل‌های فازی از مجموعه‌ای از قواعد «اگر-آنگاه» تعریف شده توسط انسان برای مدیریت ورودی‌های حسگر استفاده می‌کنند. برای مثال، قواعدی مانند «اگر حسگر شرق بسیار روشن‌تر از حسگر غرب است، آرام به سمت شرق حرکت کن»، پاسخ‌های غیرخطی و سازگار با تغییرات را ممکن می‌سازند. سیستم‌های فازی در مقابله با ورودی‌های ناقص یا پرسر و صدای عالی هستند و می‌توانند در برابر تغییر شرایط (مانند ابرها، سایه‌گذاری جزئی) مقاوم باشند. در عمل، ردیاب‌های مبتنی بر منطق فازی در آزمایش‌ها عملکرد بهتری نسبت به کنترل‌های ساده نشان داده‌اند و سیگنال‌های بالاتری دریافت کرده‌اند.

\*.On-Off (Bang-Bang) Control

† steady-state error

‡ PID Control

§ overshoot

\*\* Fuzzy Logic Control

این نوع کنترل نیازمند طراحی مجموعه قواعد و توابع عضویت است که می‌تواند پیچیده باشد. طبق بررسی سال ۲۰۲۰، کنترل فازی در حدود ۱۰٪ از سیستم‌های پیگیری مورد استفاده قرار گرفته است [6]. کنترلرهای مبتنی بر هوش مصنوعی (شبکه‌های عصبی، یادگیریمبتنی بر ماشین)\*: تحقیقات اخیر بر روش‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی یا یادگیری ماشین تمرکز دارند. برای مثال، کنترلرهای عصبی آموزش دیده می‌توانند موقعیت خورشید را پیش‌بینی کنند یا مستقیماً الگوهای حسگر را به دستورات موتور نگاشته و تبدیل کنند. روش‌های هوش مصنوعی می‌توانند پارامترهای کنترل را به صورت آن‌بورد (در حین عمل) بهینه‌سازی کنند. این تکنیک‌ها وعده بهبودی در انطباق‌پذیری دارد و می‌توانند از داده‌ها یاد بگیرند، اما نیازمند محاسبات بیشتر و داده‌های آموزش هستند. یک بررسی جامع نشان می‌دهد که پیگیری مبتنی بر هوش مصنوعی (مانند یادگیری عمیق) می‌تواند در شرایط ابری، بهره‌وری انرژی را حدود ۸٪ افزایش دهد زمانی که در منطق پیگیری به کار رود. اگرچه این روش‌ها در حال حاضر، بیشتر در نمونه‌های تحقیقاتی باقی مانده‌اند و هنوز در سیستم‌های تجاری رایج نشده‌اند. [6]. استراتژی‌های هیبریدی †:

در عمل، بسیاری از سیستم‌ها روش‌های مختلف را ترکیب می‌کنند. برای مثال، یک سیستم پیگیری ممکن است بیشتر وقت‌ها از یک الگوریتم باز ‡ استفاده کند (برای صرفه‌جویی در مصرف توان حسگر) و در نزدیکی ظهر خورشید یا در شرایط تابش پراکنده، به سمت کنترل حلقه بسته با فیدبک LDR تغییر حالت دهد برخی دیگر از کنترل‌های ترکیبی استفاده می‌کنند، مانند حلقه بیرونی موقعیت خورشید که فرمان‌هایی را به حلقه داخلی کنترل موتور می‌دهد. [6].

### ۳- مطالعات تطبیقی

در این بخش جدول ارائه شده است. هدف، جمع‌بندی داده‌های میدانی و عددی گزارش شده در هر مطالعه است تا تفاوت‌های عملکردی (افزایش انرژی)، الزامات محرکی، و ویژگیهای روش شناختی هر پژوهش بررسی شود.

#### جدول ۱- مقایسه‌ای مطالعات تطبیقی اسنادی

| مطالعه                        | نوع ردیاب                           | داده‌های میدانی / روش‌شناسی                        | جزئیات محرک/ عملیات                                   | افزایش تولید انرژی                                                 |
|-------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| پونسه-جرا و همکاران، ۲۰۲۴ [3] | تک‌محوره جومی؛ حسگر (LDR)           | آزمایش میدانی در ماننا، اکوادور؛ نظارت لحظه‌ای IoT | نجومی: حدود ۲ دقیقه در ساعت؛ LDR پیوسته               | نجومی ۸.۳۱٪؛ LDR ۳۷٪                                               |
| الشعابانی، ۲۰۲۴ [4]           | تک‌محوره - نمونه اولیه حسگر خورشیدی | آزمایش نمونه اولیه + مقایسه مروری                  | نمونه اولیه: مصرف کم حسگر محور — مقدار دقیق مشخص نیست | نمونه اولیه ~ ۲۰٪؛ مثال‌های مروری: تک‌محوره ۵.۳۷٪؛ دوم‌محوره ۹.۴۳٪ |
| پالیاال همکاران، ۲۰۲۴ [1]     | تک‌محوره و دوم‌محوره                | مرور مقالات میدانی و شبیه‌سازی                     | متغیر؛ مرور-trade-off                                 | دوم‌محوره: بیش از ۲۷٪ میانگین گزارش شده                            |

\* AI-Based Controllers (Neural Networks, Machine Learning):

† Hybrid Strategies

‡ open-loop

|                                           |                                                                |                                                      |                                                                                    |                                                                   |
|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| اولی و همکاران،<br>[2]۲۰۲۴                | دومحوره- حلقه بسته<br>LDR                                      | آزمایش مقایسه‌ای -<br>داده‌های میدانی ارائه<br>شده   | حرکت مکررتر؛ مقدار<br>دقیق ذکر نشده                                                | محدوده گزارش شده: ۲۰-<br>۴۰٪ نسبت به ثابت وابسته به<br>شرایط      |
| سانتوس<br>آراوجو و<br>همکاران،<br>[7]۲۰۲۴ | الگوریتم مبتنی بر هوش<br>مصنوعی - نیروگاه<br>فتوولتائیک دوطرفه | اعتبارسنجی در نیروگاه<br>بزرگ دولتی/تجربی            | بهینه‌سازی در سطح<br>نیروگاه؛ مشخصات<br>محرك وابسته به<br>پیاده‌سازی               | حدود ۸٪ در شرایط<br>ابری/متغیر نسبت به<br>الگوریتم‌های تجاری      |
| فلورس-هرناندز<br>و همکاران،<br>[8]۲۰۲۴    | دومحوره - استراتژی<br>پایش لحظه‌ای                             | آزمایش تجربی با دو<br>ردیاب یکسان تحت<br>شرایط مشابه | Movement count<br>↓ ۳۳.۵۳٪<br>operation time<br>↓ ۷۷.۶۰٪<br>انرژی<br>محرك ↓ ۱۸.۱۴٪ | تولید انرژی عملاً بدون کاهش؛<br>تمرکز بر کاهش حرکت و<br>مصرف محرك |

### ۳-۱ بررسی تطبیقی استفاده از سیستم های تطبیقی خورشیدی در استرالیا، چین و آمریکا

چین بزرگترین بازار جهان برای هر دو نوع انرژی فتوولتائیک و حرارتی خورشیدی است. ظرفیت فتوولتائیک آن در ماه مه ۲۰۲۵ از ۱۰۰۰ گیگاوات (یک تراوات، ۱ تراوات) عبور کرد [11]. تا ژوئن ۲۰۲۵، ظرفیت فتوولتائیک چین از ۱۱۰۰ گیگاوات فراتر رفت [12]. در سال ۲۰۲۴، چین ۲۷۷ گیگاوات انرژی خورشیدی اضافه کرد که معادل ۱۵٪ از کل ظرفیت خورشیدی نصب شده تجمعی جهان بود. [13] در سال ۲۰۲۴، انرژی خورشیدی در مقیاس صنعتی ۲۱۸.۵ تراوات ساعت در ایالات متحده تولید کرد. کل تولید خورشیدی در آن سال، از جمله تولید فتوولتائیک در مقیاس کوچک تخمین زده شده، ۳۰۳.۲ تراوات ساعت بود [14]. تا پایان سال ۲۰۲۴، ایالات متحده ۲۳۹ گیگاوات ظرفیت فتوولتائیک نصب شده (در مقیاس صنعتی و کوچک) و انرژی خورشیدی متمرکز داشت [15]. این ظرفیت تنها توسط چین و اتحادیه اروپا پیشی گرفته است [16]. در سال ۲۰۲۴، ۶۶٪ از کل ظرفیت تولید برق جدید در کشور از انرژی خورشیدی تأمین شد. انرژی خورشیدی سهم عمده‌ای در تأمین برق در استرالیا دارد. تا ژوئن ۲۰۲۵، بیش از ۴.۱۶ میلیون واحد نصب شده فتوولتائیک خورشیدی در استرالیا، ظرفیت ترکیبی ۴۱.۸ گیگاوات انرژی خورشیدی فتوولتائیک را داشتند [17]. انرژی خورشیدی ۱۹.۶٪ (یا ۴۶.۷ تراوات ساعت) از تولید انرژی الکتریکی استرالیا را در بازار ملی برق و سیستم به هم پیوسته جنوب غربی در سال ۲۰۲۴ به خود اختصاص داده است [18]. در استرالیا، شرایط تابش خورشیدی بسیار مساعد و اراضی باز برای پروژه‌های بزرگ وجود دارد و از این رو به‌کارگیری سامانه‌های ردیاب خورشیدی (به ویژه ردیاب تک‌محور) به سرعت در حال گسترش است. برای مثال گزارش‌ها حاکی است که بیش از ۸۰ درصد از پروژه‌های بزرگ مقیاس در این کشور از ردیاب‌ها استفاده می‌کنند. عملکرد ردیاب‌ها در استرالیا نشان داده که افزایش تولید بیشتری نسبت به سیستم ثابت قابل حصول است. در چین، اگرچه نصب‌های بزرگ-مقیاس خورشیدی بسیار وسیع هستند، ولی چالش‌های مربوط به اراضی، هزینه‌های جانبی و نگهداری پیچیده‌تر ردیاب‌ها باعث شده است که استفاده از ردیاب‌ها در مقیاس به سیستم ثابت با احتیاط بیشتری انجام شود.

در ایالات متحده، سامانه‌های تک‌محور تقریباً به استاندارد در پروژه‌های بزرگ مقیاس تبدیل شده‌اند—گزارش‌ها می‌گویند بیشتر پروژه‌های جدید در مقیاس تجاری از ردیاب تک‌محور بهره می‌برند. این موضوع به کاهش هزینه‌های ساخت، رشد تولید با ماژول‌های دوفیشیال و شرایط اراضی مساعد نسبت داده شده است. به‌طور کل، می‌توان نتیجه گرفت که «انتخاب سامانه ردیابی» باید با توجه به شرایط اراضی، اقلیم محلی، اقتصاد پروژه و توان نگهداری تعیین شود.

## جدول ۲- نیروگاه‌های خورشیدی در استرالیا

| استرالیا                          |                       |                                                                                        |                               |                                  |                  |
|-----------------------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|------------------|
| نام پروژه                         | موقعیت<br>جغرافیایی   | ویژگی‌های برجسته                                                                       | تولید سالیانه<br>(تقریبی)     | مساحت                            | ظرفیت<br>نصب‌شده |
| مرکز انرژی سبز<br>وسترن داونز*    | ایالت<br>کوئینزلند    | بزرگ‌ترین مزرعه خورشیدی در استرالیا<br>با استفاده از پنل‌های دوطرفه و ردیاب<br>تک‌محور | ۱,۷۵۷,۴۶۳<br>مگاوات‌ساعت      | ۱,۱۸۱ هکتار                      | ۴۶۰ مگاوات       |
| مزرعه خورشیدی<br>نیو انگلند سولار | ایالت نیو<br>سאות ولز | پروژه هیبریدی خورشیدی و باتری با<br>ظرفیت ذخیره‌سازی ۴۰۰ مگاوات‌ساعت                   | اطلاعات دقیق در<br>دسترس نیست | ۲,۰۰۰ هکتار                      | ۷۲۰ مگاوات       |
| مزرعه خورشیدی<br>والا والا†       | ایالت نیو<br>سאות ولز | قرارداد خرید برق ۱۵ ساله با<br>FRV ، بزرگ‌ترین پروژه Microsoft<br>در استرالیا          | ۷۴۰,۰۰۰<br>مگاوات‌ساعت        | ۶۰۵ هکتار                        | ۳۰۰ مگاوات       |
| مزرعه خورشیدی<br>سندی کریک‡       | ایالت نیو<br>سאות ولز | بزرگ‌ترین پروژه خورشیدی در دست<br>ساخت در استرالیا با ظرفیت<br>ذخیره‌سازی باتری        | ۱,۷۵۷,۴۶۳<br>مگاوات‌ساعت      | اطلاعات دقیق<br>در دسترس<br>نیست | ۸۴۰ مگاوات       |

\* <https://westerndownsgreenpowerhub.com.au/>

† <https://www.power-technology.com/>

‡ <https://infrastructurepipeline.org/>

جدول ۳- نیروگاههای خورشیدی در چین

| چین                                                             |                     |                                                                      |                               |                                     |                  |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|------------------|
| نام پروژه                                                       | موقعیت<br>جغرافیایی | ویژگی‌های برجسته                                                     | تولید سالانه                  | مساحت                               | ظرفیت<br>نصب‌شده |
| مزرعه خورشیدی<br>آرومچی                                         | استان سین کیانگ     | بزرگ‌ترین مزرعه<br>خورشیدی جهان از نظر<br>ظرفیت نصب‌شده              | ۶,۰۹۰ میلیارد کیلووات‌ساعت    | ۳۲,۹۴۷<br>هکتار                     | ۳,۵ گیگاوات      |
| پارک خورشیدی<br>گلمود                                           | استان چینگ‌های      | یکی از اولین مزارع<br>خورشیدی با کیفیت<br>ساخت بالا در چین           | ۳۱۷ گیگاوات‌ساعت              | ۵۶۴ هکتار                           | ۲۰۰ مگاوات       |
| سیستم هیبریدی<br>خورشیدی-آبی<br>پارک خورشیدی<br>سد لونگ‌یانگشیا | استان گانسو         | ترکیب نیروگاه آبی با<br>پنل‌های خورشیدی برای<br>مدیریت نوسانات تولید | اطلاعات دقیق در دسترس<br>نیست | اطلاعات<br>دقیق در<br>دسترس<br>نیست | ۸۵۰ مگا وات      |

جدول ۴- نیروگاههای خورشیدی در ایالت متحده

| آمریکا                          |                     |                                                                                    |                               |                  |
|---------------------------------|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------|
| نام پروژه                       | موقعیت<br>جغرافیایی | ویژگی‌های برجسته                                                                   | مساحت                         | ظرفیت<br>نصب‌شده |
| پروژه خورشیدی ادواردز و سن‌بورن | کالیفرنیا           | بزرگ‌ترین مزرعه خورشیدی در ایالات<br>متحده با ۳,۳ گیگاوات‌ساعت ذخیره‌سازی<br>باتری | ۴,۶۶۰ هکتار                   | ۸۷۵ مگاوات       |
| پروژه خورشیدی ماموت             | ایندیانا            | بزرگ‌ترین پروژه خورشیدی در ایالات<br>متحده با ظرفیت ۱,۳۰۰ مگاوات                   | اطلاعات دقیق در<br>دسترس نیست | ۱,۳۰۰<br>مگاوات  |
| پروژه خورشیدی هورنت             | تگزاس               | استفاده از پنل‌های دوطرفه و ردیاب<br>تک‌محور                                       | اطلاعات دقیق در<br>دسترس نیست | ۶۰۰ مگاوات       |
| مزرعه خورشیدی سایدر             | نیویورک             | بزرگ‌ترین پروژه خورشیدی در ایالت<br>نیویورک                                        | ۲,۵۰۰ هکتار                   | ۵۰۰ مگاوات       |
| تاسیسات خورشیدی کاپرمانتین      | نوادا               | استفاده از ۹ میلیون پنل خورشیدی                                                    | ۴,۰۰۰ هکتار                   | ۸۰۲ مگاوات       |
| مزرعه خورشیدی دزرت سانلایت      | کالیفرنیا           | استفاده از ۸,۸ میلیون پنل خورشیدی                                                  | ۳,۹۰۰ هکتار                   | ۵۵۰ مگاوات       |

## جدول ۵- چالش‌ها و قوت‌ها در سه کشور

| چین                                                                                                                       | ایالات متحده (USA)                                                                                                                           | استرالیا                                                                                                                                                      | فاکتور                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| با توجه به وسعت و تعداد پروژه‌های بزرگ، تولید برق زیاد ولی بازدهی وابسته به توان انتقال و زیرساخت شبکه است                | بازدهی خوب مخصوصاً در ایالت‌های با تابش بالا؛ توانایی مدیریت شبکه و ذخیره‌سازی در برخی ایالت‌ها مزیت محسوب می‌شود.                           | مزیت طبیعی در تابش خورشید، آب‌وهوای مناسب، اما چالش‌هایی در پوشش جغرافیایی، هزینه انتقال برق در مناطق دورافتاده و کم‌جمعیت                                    | نسخه تولید برق نسبت به ظرفیت نصب‌شده چالش‌ها |
| نیاز زیاد به زیرساخت انتقال قوی، مشکلات زمین و محیط زیست، تأمین مواد و تأثیرات شبکه در مناطق دور                          | مسائل مقرراتی متفاوت بین ایالت‌ها، هزینه زمین و انتقال برق، تأمین ذخیره‌سازی برق، گاهی کمبود سیاست‌های هماهنگ ملی                            | محدودیت جمعیت و تقاضا داخلی، وابستگی به واردات پنل و تجهیزات، هزینه‌های لجستیک برای مناطق دور، مقررات محلی و زیست‌محیطی                                       |                                              |
| مقیاس بسیار بزرگ، توانایی سرمایه‌سازی هزینه‌ها با تولید انبوه، سیاست‌های دولتی قوی، توانمندی تولید داخلی تجهیزات خورشیدی* | فناوری پیشرفته، بازار بزرگ خصوصی، امکان سرمایه‌گذاری بخش خصوصی، توانایی ترکیب ذخیره‌سازی با انرژی خورشیدی، سیاست‌های تشویقی در برخی ایالت‌ها | تابش بالا، مزیت طبیعی، پتانسیل برای تولید هم برای بازار داخلی و صادرات (به ویژه تجهیزات یا فناوری)، فرصت‌های تولید محلی و کاهش وابستگی به واردات <sup>†</sup> | مزایا / قوت‌ها                               |

## ۴- نتیجه گیری

با توجه به نتایج مطالعات و مرور علمی گسترده، واضح است که به‌کارگیری سامانه‌های ردیاب تطبیقی در سیستم‌های فتوولتایک، به‌ویژه زمانی که با الگوریتم‌های کنترلی هوشمند، پیش‌بینی ابری و فناوری‌های مکمل نظیر مازول‌های دوفیشال ترکیب شود، می‌تواند منجر به افزایش چشم‌گیر تولید انرژی شود. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که در مقایسه با سامانه‌های ثابت، سیستم‌های ردیاب تک‌محور اغلب بین حدود ۲۰ تا ۳۵ درصد افزایش تولید و سیستم‌های دومحور بین حدود ۳۰ تا ۴۵ درصد یا بیشتر افزایش تولید دارند. در نتیجه، بهبود و به‌کارگیری الگوریتم‌های کنترلی - به‌ویژه در قالب سیستم‌های مبتنی بر پیش‌بینی در فضای ابری - می‌تواند ضمن افزایش دقت ردیابی، کاهش خطاها، بهبود دوام و کاهش هزینه‌های نگهداری را نیز موجب شود. مطالعات نشان داده‌اند که ردیاب‌ها در شرایط اقلیمی مناسب و با طراحی و کنترل بهینه، بازده سرمایه‌گذاری قابل قبول دارند. همچنین، انتخاب نوع ردیاب (تک‌محور یا دومحور) باید بر اساس شرایط اقلیمی منطقه، تابش خورشید، سطح زمین، سیاست‌های حمایتی، اقتصاد سرمایه‌گذاری، و فناوری‌های مکمل صورت گیرد. برای مثال، در مناطق با تابش شدید و زمین وسیع، ردیاب دومحور می‌تواند ارزش سرمایه‌گذاری بالاتری داشته باشد؛ اما در مناطق کم‌تابش یا با تعرفه پایین خرید برق، ردیاب تک‌محور یا حتی سیستم ثابت ممکن است از نظر اقتصادی منطقی‌تر باشد. در نهایت، با در نظر گرفتن سیاست‌های حمایتی مثل تعرفه‌های خرید برق، یارانه سرمایه‌گذاری، و استانداردهای طراحی و نگهداری، می‌توان اطمینان حاصل کرد که ردیاب‌های تطبیقی نه تنها از نظر فنی بلکه از نظر اقتصادی نیز توجیه‌پذیر هستند. بنابراین توصیه می‌شود در هر کشور یا منطقه، تحلیل سایت‌محور و اقتصادی جامع صورت گیرد تا بهترین نوع ردیاب، شکل کنترل و فناوری مکمل انتخاب شود و سود حاصل از افزایش تولید، به حداکثر برسد.

\* [PV Magazine Australia](#)

† [The Guardian](#)

## منابع

- [1] Paliyal, P. S., Mondal, S., Layek, S., Kuchhal, P., & Pandey, J. K. (2024). Automatic solar tracking system: A review pertaining to advancements and challenges in the current scenario. *Clean Energy*, 8(6), 237–262.
- [2] Oli, A., Sharma, S., Adhikari, P., Neupane, D., Khanal, S., & Labh, S. K. (2024). Comparative study on efficiency analysis of fixed and dual-axis solar tracking system. *Journal of Engineering and Sciences*, 3(1), 81–86.
- [3] Ponce-Jara, M. A., Pazmiño, I., Moreira-Espinoza, Á., Gunsha-Morales, A., & Rus-Casas, C. (2024). Assessment of single-axis solar tracking system efficiency in equatorial regions: A case study of Manta, Ecuador. *Energies*, 17(16), 3946.
- [4] Alshaabani, A. (2024). Developing the design of single-axis sun sensor solar tracking system. *Energies*, 17(14), 3442.
- [5] Mamodiya, U., & Tiwari, N. (2023). Dual-axis solar tracking system with different control strategies for improved energy efficiency. *Computers and Electrical Engineering*, 111(A).
- [6] Fuentes-Morales, R. F., Díaz Ponce, A., Peña-Cruz, M. I., Rodrigo, P. M., ... (año). Control algorithms applied to active solar tracking systems: A review. *Solar Energy*, 212(3), 203–219.
- [7] Santos de Araújo, J. V., de Lucena, M. P., da Silva Netto, A. V., Gomes, F. d. S. V., Oliveira, K. C. d., de Souza Neto, J. M. R., Cavalcante, S. L., Morales, L. R. V., Villanueva, J. M. M., & Macedo, E. C. T. d. (2024). Solar tracking control algorithm based on artificial intelligence applied to large-scale bifacial photovoltaic power plants. *Sensors*, 24(12), 3890.
- [8] Flores-Hernández, D. A., Islas-Estrada, L. R., & Palomino-Resendiz, S. I. (2024). A novel tracking strategy based on real-time monitoring to increase the lifetime of dual-axis solar tracking systems. *Applied Sciences*, 14(18), 8281.
- [9] Drury, E., Lopez, A., Denholm, P., & Margolis, R. (2013). Relative performance of tracking versus fixed tilt photovoltaic systems in the USA. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 22(12).
- [10] Icoyitungiye Olivier<sup>1</sup>, Bukuru Denis<sup>2</sup>, Pritpal Singh<sup>3</sup>, Niyonzima Jean Bosco<sup>1</sup>, Ntawuhorakomeye Noel<sup>2</sup>. (2025). Intelligent Solar Tracker Designed to Optimize Photovoltaic Yield in Burundi. *Journal of Power and Energy Engineering - Vol.13 No.10*.
- [11] Just staggering: "China installs 100 solar panels a second as total PV capacity tops 1 terawatt". *RenewEconomy*. 25 June
- [12] "Chinese PV Industry Brief: China passes 1.1 TW of solar despite June slowdown". *pv-magazine*. 25 July 2025.
- [13] "Infographic: China's solar capacity growth sets new record in 2024". *S&P Global*. 24 January 2025. Retrieved 22 February 2025.
- [14] Table 1.1. Net Generation by Energy Source: Total (All Sectors)". *U.S. Energy Information Administration*. Retrieved March 20, 2025.
- [15] Wood Mackenzie (March 11, 2025). "US Solar Market Insight: 2024 year in review". *Solar Energy Industries Association*.
- [16] "Renewable Capacity Statistics 2022" (PDF). *irena.org*. p. 32. Retrieved June 4, 2022.
- [17] Australian PV market since April 2001". *apvi.org.au*.
- [18] OpenElectricity". *Open Electricity Website*. Retrieved 16 January 2025.