

مروری بر فناوری‌های نوین تولید برق از منابع انرژی تجدید پذیر با تاکید بر عدم قطعیت ها و اختلالات عملکردی

زهره بهرام پور

کارشناسی ارشد از دانشگاه قم- رشته مهندسی صنایع-گرایش بهینه سازی سیستم ها

bahrampourzahra@aol.com

چکیده:

با توجه به افزایش روزافزون نیاز جهانی به انرژی و نگرانی‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی، توسعه فناوری‌های نوین تولید برق از منابع انرژی تجدیدپذیر به‌عنوان راه‌حلی پایدار و سازگار با محیط زیست اهمیت فراوانی یافته است. این مقاله مروری به بررسی فناوری‌های نوین تولید برق از منابع تجدیدپذیر، با تمرکز بر تنوع روش‌ها و به ویژه به عنوان یکی از این فناوری‌ها، سیستم‌های خورشیدی شناور (Floating PV) می‌پردازد. در این بررسی، انواع فناوری‌های مورد استفاده، چالش‌های مربوط به عدم قطعیت‌ها و اختلالات عملکردی، و کاربردهای مختلف آن‌ها تحلیل شده است. همچنین نقش فناوری‌های پیشرفته مانند هوش مصنوعی و مدل‌سازی دقیق در بهبود عملکرد و پایداری این سامانه‌ها مورد بحث قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که علی‌رغم پیشرفت‌های قابل توجه در افزایش راندمان و کاهش هزینه‌ها، همچنان نیاز به پژوهش‌های بیشتر برای مدیریت عدم قطعیت‌ها و مقابله با اختلالات عملکردی وجود دارد.

کلیدواژه‌ها:

انرژی تجدیدپذیر، فناوری‌های نوین، عدم قطعیت، اختلالات عملکردی، بهینه‌سازی، هوش مصنوعی، مدیریت انرژی، سیستم‌های خورشیدی شناور.

**مقدمه:**

افزایش روزافزون تقاضا برای انرژی در دهه‌های اخیر، همراه با محدودیت منابع فسیلی و پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از مصرف گسترده آن‌ها، موجب شده است که نگاه جهانی به سوی منابع تجدیدپذیر و پایدار انرژی سوق پیدا کند. منابع انرژی تجدیدپذیر به آن دسته از منابعی اطلاق می‌شود که در یک بازه زمانی انسانی به‌طور طبیعی تجدید می‌شوند و برخلاف سوخت‌های فسیلی، تولید دی‌اکسید کربن و آلاینده‌های مضر ندارند. این منابع نه تنها در کاهش آلودگی‌های محیطی نقش کلیدی دارند، بلکه از منظر امنیت انرژی و پایداری در بلندمدت نیز مورد توجه کشورها قرار گرفته‌اند.

فناوری‌های نوین نقش تعیین‌کننده‌ای در ارتقاء بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و افزایش قابلیت اطمینان در استفاده از منابع تجدیدپذیر دارند. در سال‌های اخیر، توسعه سلول‌های خورشیدی نسل جدید مانند سلول‌های پروسکایتی با بازدهی بالا و هزینه ساخت پایین، افق‌های جدیدی در انرژی خورشیدی ایجاد کرده است (گرین و همکاران، ۲۰۲۲). در حوزه انرژی بادی نیز توربین‌های پیشرفته با پره‌های هوشمند و سیستم‌های کنترلی مبتنی بر یادگیری ماشین، امکان تطبیق با شرایط متغیر باد را فراهم کرده‌اند (جونگ و کیم، ۲۰۲۰). علاوه بر این، پیشرفت در سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی، به‌ویژه باتری‌های لیتیوم-یونی و باتری‌های حالت جامد، توانسته است مسئله ناپایداری منابع تجدیدپذیر را تا حدود زیادی رفع کند (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین پیاده‌سازی شبکه‌های هوشمند و سیستم‌های تولید پراکنده، مدیریت همزمان تولید و مصرف را تسهیل کرده و امکان بهره‌گیری پایدارتر از منابع تجدیدپذیر را فراهم آورده‌اند (فانگ و همکاران، ۲۰۱۲).

با توجه به این تحولات، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر نه تنها به عنوان یک گزینه زیست‌محیطی، بلکه به عنوان ضرورتی اقتصادی و فناورانه در مسیر توسعه پایدار مطرح است. با این حال، بهره‌برداری گسترده از این منابع با چالش‌هایی مانند ناپایداری، وابستگی به شرایط جوی، و پیچیدگی‌های کنترلی همراه است که بررسی آن‌ها در ادامه مقاله مورد توجه قرار خواهد گرفت.

انرژی‌های تجدیدپذیر دارای انواع متعددی هستند که هر کدام بر اساس شرایط اقلیمی و جغرافیایی در مناطق مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. انرژی خورشیدی یکی از رایج‌ترین انواع این منابع است که از تابش خورشید برای تولید برق به وسیله سلول‌های فتوولتائیک بهره می‌برد. انرژی بادی نیز با استفاده از نیروی باد و چرخش توربین‌ها تولید برق کرده و به‌ویژه در مناطق بادخیز، مورد استفاده گسترده قرار گرفته است. همچنین انرژی آبی یا هیدروالکتریک با بهره‌گیری از پتانسیل جریان‌ات آب در رودخانه‌ها یا سدها، نقش مهمی در تأمین برق کشورهایی با منابع آبی مناسب ایفا می‌کند.



در کنار این موارد، انرژی زمین‌گرمایی از حرارت درونی زمین برای تولید انرژی استفاده می‌کند، و زیست‌توده (بیوماس) نیز با بهره‌گیری از بقایای گیاهی و حیوانی، منبعی دیگر برای استخراج انرژی به‌شمار می‌رود. با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در توسعه فناوری‌های تولید انرژی پاک، این سامانه‌ها ذاتاً با نوعی ناپایداری عملکرد همراه هستند، چرا که توان خروجی آن‌ها به شرایط جوی متغیر وابسته است. به عبارتی، منابعی مانند خورشید و باد قابل کنترل یا ذخیره‌سازی مستقیم نیستند و همین مسئله منجر به ایجاد عدم قطعیت‌هایی در فرآیند تولید انرژی می‌شود.

برای نمونه، در یک نیروگاه خورشیدی، ممکن است به دلیل تغییرات ناگهانی در تابش خورشید ناشی از عبور ابر یا سایر پدیده‌های جوی، توان خروجی با کاهش یا افزایش شدید مواجه شود. در مورد نیروگاه‌های بادی نیز، نوسانات در سرعت باد می‌تواند باعث ناپایداری و حتی قطع تولید در بازه‌های زمانی کوتاه شود (جونگ و کیم، ۲۰۲۰).

در میان انواع انرژی، انرژی الکتریکی به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین اشکال مصرف انرژی در جوامع صنعتی مطرح است. با گسترش صنعت، توسعه شهرنشینی و پیشرفت فناوری‌های دیجیتال، مصرف برق به‌شدت در حال افزایش است. به‌عنوان نمونه، در ایالات متحده آمریکا، سهم برق از مصرف کلی انرژی که در سال ۱۹۷۰ حدود ۲۵ درصد بوده، در سال ۲۰۱۷ به ۴۰ درصد رسیده و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰ این مقدار به بیش از ۶۵ درصد افزایش یابد (U.S. EIA, ۲۰۱۷). از جمله دلایل اصلی این روند می‌توان به انتقال آسان، بازدهی بالا، انعطاف‌پذیری در تبدیل به سایر اشکال انرژی و آلودگی بسیار کم در محل مصرف اشاره کرد.

فرآیند تولید برق از منابع انرژی تجدیدپذیر، بر پایه استفاده از پدیده‌های طبیعی همچون تابش خورشید، جریان باد، حرکت آب و حرارت زمین استوار است. این منابع برخلاف سوخت‌های فسیلی، قابلیت تجدید طبیعی در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت دارند و از نظر زیست‌محیطی نیز آلودگی کمتری ایجاد می‌کنند. برای مثال، در سامانه‌های فتوولتائیک (PV)، انرژی خورشید توسط سلول‌های نیمه‌رسانا به‌طور مستقیم به جریان الکتریکی تبدیل می‌شود. در توربین‌های بادی نیز، انرژی جنبشی باد با به حرکت درآوردن پره‌ها، ژنراتورها را فعال کرده و در نهایت منجر به تولید برق می‌شود (گرین و همکاران، ۲۰۲۲).

با توجه به نیاز روزافزون کشورها به برق و افزایش نگرانی‌ها درباره پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی، بهره‌برداری از منابع انرژی پاک و تجدیدپذیر به‌عنوان راهکاری اساسی برای تأمین پایدار انرژی و حفظ محیط‌زیست در دستور کار قرار گرفته است. در این میان، سامانه‌های فتوولتائیک به دلیل دسترسی



گسترده به تابش خورشید در بسیاری از نقاط جهان، یکی از مناسب‌ترین گزینه‌های تولید برق پاک به‌شمار می‌آیند.

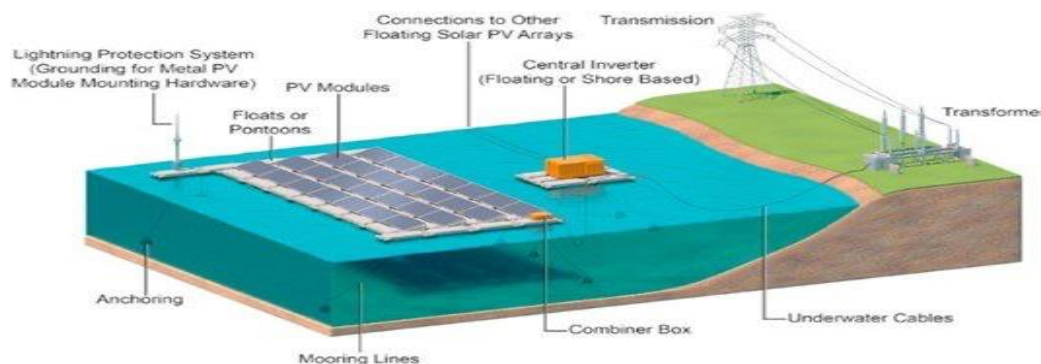
روش‌های تولید برق از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر

ردیف	نوع انرژی تجدیدپذیر	روش تولید برق	توضیح مختصر
1	انرژی خورشیدی	(PV) فتوولتائیک	تبدیل مستقیم نور خورشید به برق با استفاده از سلول‌های خورشیدی نیمه‌رسانا.
2	انرژی خورشیدی	نیروگاه حرارتی (CSP) خورشیدی	استفاده از آینه‌ها برای متمرکز کردن نور خورشید و تولید بخار جهت چرخاندن توربین.
3	انرژی بادی	توربین بادی	تبدیل انرژی جنبشی باد به انرژی الکتریکی از طریق چرخش پره‌ها و ژنراتور.
4	انرژی آبی (هیدروپاور)	سد و نیروگاه آبی	استفاده از اختلاف ارتفاع آب برای چرخاندن توربین و تولید برق.
5	انرژی امواج دریا	ژنراتورهای موجی	استفاده از حرکت بالا و پایین امواج دریا برای به حرکت درآوردن سامانه‌های مکانیکی و تولید برق.
6	انرژی جزر و مد	نیروگاه جزر و مد	بهره‌گیری از اختلاف تراز آب در جزر و مد برای چرخش توربین‌ها.
7	زیست‌توده (Biomass)	احتراق یا گازی‌سازی زیست‌توده	سوزاندن مواد آلی (چوب، زباله کشاورزی و ...) برای تولید بخار و برق.
8	انرژی زمین‌گرمایی (ژئوترمال)	نیروگاه زمین‌گرمایی	استخراج حرارت از اعماق زمین برای تولید بخار و چرخش توربین.
9	هیدروژن سبز	پیل سوختی هیدروژنی	استفاده از واکنش شیمیایی بین هیدروژن و اکسیژن برای تولید برق بدون آلاینده.

10	انرژی آبی کوچک	Small میکروهیدرو (Hydro)	تولید برق در مقیاس کوچک با استفاده از جریان رودخانه‌ها یا نهرها بدون نیاز به سدسازی بزرگ.
----	----------------	--------------------------	---

از جمله مزایای انرژی خورشیدی می‌توان به در دسترس بودن در اقلیم‌های مختلف و عدم تولید آلودگی در محل مصرف اشاره کرد. در عین حال، با توجه به بحران آب در کشور، بررسی راهکارهای کاهش تبخیر از سطح مخازن آبی نیز به‌عنوان یکی از اولویت‌های مهم در مدیریت منابع آب مطرح است. روش‌های کاهش تبخیر معمولاً به پنج دسته‌ی اصلی تقسیم می‌شوند: شیمیایی، فیزیکی، بیولوژیکی، بهره‌برداری ساختاری و مکانیکی (کریگ، گرین، اسکوبی و اش‌میت^۱، ۲۰۰۵).

یکی از راهکارهای نوآورانه برای حل هم‌زمان دو چالش تأمین انرژی و مدیریت منابع آب، بهره‌گیری از سامانه‌های فتوولتائیک شناور (Floating PV – FPV) است. این سامانه‌ها نوعی پوشش فیزیکی هستند که ضمن کاهش تبخیر از سطح آب، منافع اقتصادی، زیست‌محیطی و فنی قابل توجهی را نیز به همراه دارند.



شکل ۱: نمای شماتیک از اجزای یک سامانه خورشیدی شناور (FPV)

اجزای اصلی شامل: صفحات فتوولتائیک (PV)، پانتون‌های شناور، سیستم مهاربندی، اینورتر مرکزی، خطوط انتقال برق، تجهیزات اتصال به ساحل و سیستم حفاظت در برابر صاعقه.

در این سامانه‌ها، سازه‌هایی سایه‌دار به‌صورت پوشش‌های معلق بر سطح مخازن، حوضچه‌ها و دریاچه‌ها نصب می‌شوند. این پوشش‌ها با کاهش شدت تابش نور خورشید، کاهش سرعت باد در سطح آب و افزایش رطوبت

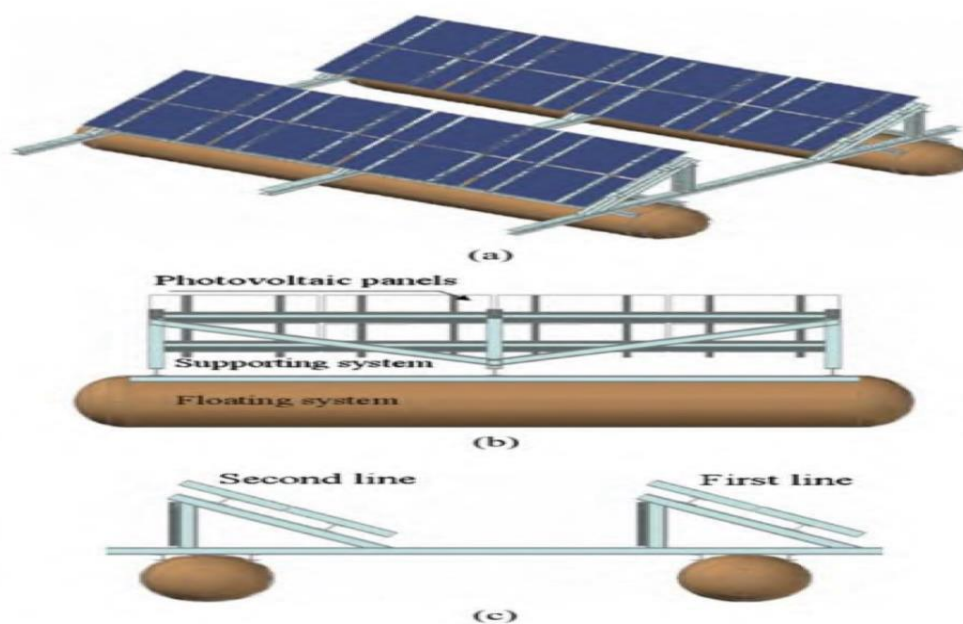
¹ Craig, Green, Scobie & Schmidt



نسبی در ناحیه زیر پوشش، منجر به کاهش قابل توجه میزان تبخیر می‌شوند. همچنین این سازه‌ها از رشد جلبک‌ها نیز جلوگیری می‌کنند.

دسته‌بندی سیستم‌های خورشیدی شناور

ویژگی‌ها / توضیحات	زیرمجموعه‌ها	معیار دسته‌بندی
رایج‌ترین نوع؛ نصب ساده‌تر، مناسب برای نصب گسترده، امکان ردیابی نور خورشید	روی سطح آب (شناور)	محل قرارگیری
کاهش گرمایش ماژول، کاهش اثرات باد، نیاز به زیرساخت کمتر؛ اما جذب طیف محدود نور	درون آب (غوطه‌ور)	
خوردگی کمتر، امواج و باد کمتر، رشد جلبک محدود، دسترسی آسان‌تر به ساحل	آب شیرین	نوع آب
نیازمند تجهیزات ضد خوردگی، تأثیر بیشتر امواج، تعمیر و نگهداری دشوارتر	آب شور (دریا)	
متداول‌ترین نوع، دوام بالا، نیازمند فریم پشتیبان	ماژول سخت Flat (rigid PV)	نوع ماژول خورشیدی
سازگار با حرکت امواج، نصب مستقیم روی آب، فناوری نوین با نیاز به توسعه بیشتر	ماژول منعطف (Flexible PV)	



سیستم تولید انرژی خورشیدی شناور. (a) واحد ماژول؛ (b) دید عقب و (c) نمای جانبی

شکل ۲: نمای شماتیک از اجزای مختلف سیستم خورشیدی شناور (FPV)

(الف) واحد ماژول خورشیدی، (ب) نمای جانبی، (ج) دید از پشت سیستم نصب‌شده روی آب

نکته قابل توجه این است که تا پیش از سال ۲۰۱۴ تنها سه نیروگاه خورشیدی شناور در جهان احداث شده بود، اما طی دو سال بعد، این تعداد به بیش از هفتاد نیروگاه افزایش یافت. کشورهای آمریکا و ژاپن در این حوزه پیشگام هستند. ایالات متحده با احداث شش نیروگاه خورشیدی شناور با ظرفیت‌هایی بین ۳ تا ۵۰ مگاوات، سهم قابل توجهی دارد (ملوین^۱، ۲۰۱۵). کشور ژاپن نیز با نصب ۴۵ نیروگاه از این نوع، رتبه نخست را به خود

¹ Melvin



اختصاص داده است (مینامیو^۱، ۲۰۱۶). دلیل اصلی توسعه سریع این فناوری در ژاپن، وجود سیاست‌های تعرفه‌ای تشویقی و کمبود زمین جهت نصب نیروگاه‌های خورشیدی زمینی اعلام شده است.

در سال ۲۰۰۷، یکی از نخستین پروژه‌های سامانه فتوولتائیک شناور (FPV) در استان آیچی ژاپن با ظرفیت ۲۰ کیلووات نصب شد. این پروژه توسط یوکیه‌یرو اودا^۲ و همکارانش (۲۰۰۷) مورد مطالعه قرار گرفت: هدف اصلی این پژوهش مقایسه توان تولیدی پنل‌ها در شرایط خنک‌کاری با آب در مقابل خنک‌کاری هوایی بود. در این طرح، ماژول‌های خورشیدی شناور از طریق لنگرهای ثابت در محل نگه داشته می‌شدند و کابل‌های DC آن‌ها به اینورتر مستقر روی زمین متصل بود. شبکه برق شهری به این سامانه متصل بود و خروجی‌ها هر دقیقه پایش می‌شدند. برای خنک‌سازی پنل‌ها از سیستم آبرسانی نوبتی نصب‌شده روی یکی از سازه‌های شناور استفاده شد که منجر به کاهش دمای پنل‌ها از ۱۷ درجه به ۷٫۴ درجه سانتی‌گراد در ماه اوت ۲۰۰۷ گردید.

در سال ۲۰۱۳، کارلوس فرر-گیسبرت^۳ و همکارانش (فرر-گیسبرت و همکاران، ۲۰۱۳) سیستم فتوولتائیک شناور جدیدی را بررسی کردند که توسط شرکت سلمین انرژی^۴ و دانشگاه پلی‌تکنیک والنسیا توسعه یافته بود. این سامانه از ماژول‌های شناور پلی‌اتیلنی تشکیل شده بود که به واسطه اجزای تولیدکننده تنش و اتصالات الاستیک قادر بودند خود را با سطوح متغیر آب مخزن منطبق کنند. برای ارزیابی عملیاتی این فناوری، یک نیروگاه کامل نزدیکی شهر آلیکانته اسپانیا در یک مخزن آب کشاورزی به مساحت ۴۰۷۰۰ مترمربع نصب شد، حال آنکه صرفاً بخش ثابتی از مخزن با پوشش معمولی خورشیدی اشغال شده بود. نتایج آزمایش‌ها نشان داد این سیستم از نظر فنی پایدار و از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر است.

در سال ۲۰۱۷، ماریا النا تابودا^۵ و همکارانش (تابودا و همکاران، ۲۰۱۷) در منطقه شمالی شیلی از سامانه‌های خورشیدی شناور به‌عنوان راهکاری دوگانه برای مشکل کمبود سوخت‌های فسیلی و اتلاف منابع آبی استفاده کردند. در این پژوهش، از صفحات خورشیدی شناور هم برای تولید برق و هم برای کاهش تبخیر سطح آب بهره گرفته شد؛ علاوه بر آن، سیستمی جهت گرمایش خورشیدی آب به منظور تأمین آب گرم مورد نیاز معادن اطراف مخزن طراحی شد. نتایج فنی و اقتصادی این مطالعه نشان داد عملکرد سامانه ارائه‌شده رضایت‌بخش است و می‌تواند همزمان به تولید انرژی و صرفه‌جویی در مصرف آب کمک کند.

¹ Minamino

² Yukihiro Ueda

³ Carlos Ferrer-Gisbert

⁴ Salminen Energy

⁵ María Elena Taboada

جدول پژوهشگران حوزه نیروگاه‌های خورشیدی شناور (FPV)

نام پژوهشگر	سال انتشار	عنوان/موضوع مقاله	زمینه تحقیق
گفران چادری، محمد حجاج، جف پورتمنس	۲۰۲۳	بررسی جامع عملکرد حرارتی سیستم‌های FPV و مدل‌سازی CFD برای تحلیل خنک‌کاری ماژول‌ها	تحلیل حرارتی و مدل‌سازی دینامیکی
پی. آنباراسو، آر. سورش کومار	۲۰۲۳	طراحی و توسعه سیستم نمونه FPV برای آبیاری کشاورزی در هند	کاربرد در کشاورزی و ارزیابی اقتصادی
هاوبو ژانگ، چن‌روی سو	۲۰۲۳	تحلیل خواص مکانیکی ساختار FPV دریایی و پایداری در برابر باد و موج	طراحی مکانیکی و پایداری سازه‌ای
آیشه جلاب، زهرا جلاب، ابوبکر الحمومی، جوزپه مارکو تینا، سعد مطاهر، عبدالقادر لعوید	۲۰۲۴	مرور جامع بر سیستم‌های خورشیدی شناور از منظر فنی، زیست‌محیطی و اقتصادی	تحلیل چندبعدی و ارزیابی فناوری
چینگ-فنگ چن	۲۰۲۳	روش طراحی بهینه برای سیستم‌های FPV با در نظر گرفتن عوامل اقتصادی و محیطی	بهینه‌سازی طراحی سیستم‌ها
وانگ های، لیو شیائو، وانگ کای	۲۰۲۴	بررسی مقاومت سازه‌های شناور و تحلیل عوامل مؤثر	طراحی ساختاری و هیدرودینامیک



مرور جامع و تحلیل آینده‌نگر	مرور میان‌رشته‌ای بر توسعه نیروگاه‌های خورشیدی شناور	۲۰۲۵	یوجیا وی، دانیال خجسته، کریستین ویندت، لووفنگ هوآنگ
-----------------------------	--	------	---

با گسترش روزافزون بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر به‌عنوان راهکاری برای مقابله با چالش‌های زیست‌محیطی و امنیت انرژی، مسائلی همچون عدم قطعیت و اختلال در عملکرد این فناوری‌ها اهمیت فزاینده‌ای یافته‌اند. برخلاف سیستم‌های تولید متمرکز و سنتی که تولید برق در آن‌ها پایدار و قابل کنترل است، منابع تجدیدپذیر همچون باد و خورشید، ماهیتی غیرقابل پیش‌بینی و وابسته به شرایط محیطی دارند. این موضوع می‌تواند منجر به نوسانات ولتاژ، اختلال در فرکانس شبکه و حتی خاموشی‌های مقطعی در بار مصرفی شود (فانگ و همکاران، ۲۰۱۲).

همچنین، از آنجا که نیروگاه‌های تجدیدپذیر غالباً به‌صورت پراکنده در سطح جغرافیایی نصب می‌شوند، کنترل و هماهنگی میان آن‌ها نیازمند زیرساخت‌ها و سامانه‌های کنترلی پیچیده‌تری است. در این زمینه، شبکه‌های هوشمند با قابلیت پایش لحظه‌ای داده‌ها و مدیریت خودکار تولید و مصرف انرژی، نقش حیاتی در پایداری عملکرد سیستم دارند (فانگ و همکاران، ۲۰۱۲).

یکی از دیگر چالش‌های جدی، عدم تطابق زمانی بین تولید و مصرف انرژی است. به‌طور معمول، بیشترین توان خورشیدی در میانه روز تولید می‌شود، در حالی که اوج مصرف در ساعات عصر و شب است. این ناهماهنگی موجب شده است که فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی مانند باتری‌های لیتیوم-یونی یا سیستم‌های ذخیره‌سازی حرارتی و هیدروژنی، به‌عنوان مکملی برای تولید تجدیدپذیر مطرح شوند (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۳). البته این فناوری‌ها نیز با چالش‌هایی از جمله هزینه بالا، محدودیت طول عمر و مسائل زیست‌محیطی در فرآیند بازیافت مواجه هستند.

در کنار موانع فنی، محدودیت زیرساختی و نبود سیاست‌های منسجم حمایتی نیز از رشد سریع منابع تجدیدپذیر جلوگیری کرده‌اند. اغلب شبکه‌های برق موجود، برای جریان انرژی یک‌طرفه طراحی شده‌اند و توانایی پذیرش تولید پراکنده و متغیر را ندارند. همچنین، بسیاری از کشورها فاقد سیاست‌های یکنواخت در زمینه اتصال منابع تجدیدپذیر به شبکه، تعرفه‌گذاری مناسب یا مشوق‌های مالی مؤثر هستند (آژانس بین‌المللی انرژی، ۲۰۲۲).

برای رفع این موانع، مجموعه‌ای از اقدامات فناورانه و مدیریتی باید همزمان اتخاذ شود. در حوزه فناوری، پیشرفت الگوریتم‌های پیش‌بینی مبتنی بر داده‌های هواشناسی، یادگیری ماشین و هوش مصنوعی توانسته‌اند به پیش‌بینی



دقیق‌تر تولید کمک کنند و تصمیم‌گیری را در سطح شبکه بهینه سازند (جونگ و کیم، ۲۰۲۰). همچنین توسعه و استقرار شبکه‌های هوشمند و زیرساخت‌های ذخیره‌سازی نقش کلیدی در کاهش نوسانات و افزایش پایداری دارند.

از سوی دیگر، تدوین سیاست‌های حمایتی، ارائه تسهیلات مالی، اصلاح ساختار تعرفه‌ها و ایجاد استانداردهای فنی یکپارچه می‌تواند زمینه‌ساز پذیرش بیشتر این فناوری‌ها شود. فرهنگ‌سازی عمومی در مورد اهمیت استفاده از انرژی‌های پاک نیز یکی از ارکان مهم موفقیت در این مسیر است (اژانس بین‌المللی انرژی، ۲۰۲۲).

در جمع‌بندی، دستیابی به پایداری عملکرد در منابع تجدیدپذیر، نیازمند نگاهی جامع به جنبه‌های فنی، اقتصادی و نهادی است. تنها از طریق ترکیب این عوامل می‌توان به توسعه پایدار و پایایی عملکرد شبکه‌های برق آینده امیدوار بود.

مروری بر فناوری‌های نوین تولید برق از منابع انرژی تجدیدپذیر با تأکید بر عدم قطعیت‌ها و اختلالات عملکردی

راهکارهای مقابله	نوع عدم قطعیت و اختلالات عملکردی	ویژگی‌ها	فناوری
ردیابی خورشید، الگوریتم‌های پیش‌بینی، خنک‌سازی فعال	ابرنیکی، گرد و غبار، زاویه تابش، دمای محیط	تبدیل مستقیم نور خورشید به برق؛ مناسب برای اقلیم‌های مختلف	سامانه‌های فتوولتائیک (PV)
ذخیره‌ساز انرژی، پیش‌بینی باد، ترکیب منابع	نوسانات سرعت باد، وقفه‌های ناگهانی	استفاده از انرژی جنبشی باد برای تولید برق	توربین‌های بادی
مدیریت منابع آبی، تلفیق با PV یا بادی	خشکسالی، تغییر فصلی دبی آب	تولید برق از جریان طبیعی آب بدون سد بزرگ	نیروگاه‌های برق آبی کوچک
استانداردسازی خوراک، ذخیره‌سازی کنترل‌شده	تغییر کیفیت و ترکیب مواد اولیه	تبدیل ضایعات زیستی به انرژی حرارتی یا الکتریکی	زیست‌توده

سیستم‌های هیبریدی تجدیدپذیر	ترکیب چند منبع انرژی برای افزایش پایداری	همپوشانی اختلالات منابع مختلف	بهینه‌سازی ترکیب منابع، هوش مصنوعی در مدیریت شبکه
-----------------------------------	---	----------------------------------	---

این مقاله با بهره‌گیری از رویکرد مروری نظام‌مند^۱ به تحلیل و بررسی مطالعات و فناوری‌های نوین در حوزه تولید برق از منابع انرژی تجدیدپذیر می‌پردازد، با تأکید ویژه بر موضوع عدم قطعیت‌ها و اختلالات عملکردی در این سیستم‌ها. جستجو در پایگاه‌های داده علمی معتبر مانند Scopus، ScienceDirect، Springer، IEEE Xplore و Google Scholar صورت گرفت. تمرکز جستجو بر مطالعات منتشر شده در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۴ بود تا نمای کاملی از آخرین تحولات، چالش‌ها و راهکارهای فناورانه در این حوزه ارائه گردد.

پس از گردآوری منابع اولیه، مقالات براساس معیارهای زیر انتخاب و دسته‌بندی شدند:

تمرکز بر منابع انرژی تجدیدپذیر و چالش‌های فنی مرتبط با ناپایداری و پیش‌بینی ناپذیری تولید برق؛

پوشش مفاهیم مرتبط با مدیریت شبکه، ذخیره‌سازی انرژی، و راهکارهای بهینه‌سازی عملکرد؛

انتشار در مجلات علمی معتبر دارای داوری تخصصی (peer-reviewed)

دارا بودن داده‌ها یا تحلیل‌هایی که بتواند مبنای استنتاج مفاهیم کلیدی مقاله قرار گیرد.

در ادامه، محتوای علمی استخراج شده از منابع منتخب، در قالب تحلیل مقایسه‌ای و طبقه‌بندی موضوعی بررسی شد. این تحلیل، زمینه را برای شناسایی شکاف‌های پژوهشی، ارزیابی قابلیت‌های فنی و اقتصادی فناوری‌ها، و ارائه پیشنهادهایی برای بهبود پایداری شبکه در مواجهه با نوسانات عملکردی فراهم کرد.

رویکرد مروری این مقاله، ضمن تبیین چالش‌های موجود، تلاش دارد دیدی جامع، کاربردی و آینده‌نگر نسبت به مسیر توسعه فناوری‌های تجدیدپذیر ارائه دهد تا برای سیاست‌گذاران، پژوهشگران و فعالان صنعت انرژی قابل استفاده باشد.

¹ Systematic Review



نتیجه گیری و پیشنهادات:

مروری بر فناوری‌های نوین تولید برق از منابع انرژی تجدیدپذیر با تاکید بر عدم قطعیت‌ها و اختلالات عملکردی نشان می‌دهد که این فناوری‌ها نقش کلیدی در گذار به سیستم‌های انرژی پایدار و پاک دارند. با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در بهره‌برداری از انرژی خورشیدی، بادی، آبی و سایر منابع تجدیدپذیر، چالش‌هایی مانند نوسانات تولید، تأثیر شرایط محیطی و مشکلات مربوط به اتصال به شبکه همچنان وجود دارد که می‌تواند عملکرد این سیستم‌ها را تحت تأثیر قرار دهد.

به‌کارگیری روش‌های پیشرفته مدل‌سازی، کنترل هوشمند و استراتژی‌های مدیریت ریسک برای مقابله با این عدم قطعیت‌ها و اختلالات، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همچنین، توسعه فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی و سیستم‌های هیبریدی می‌تواند به بهبود پایداری و قابلیت اطمینان شبکه‌های انرژی تجدیدپذیر کمک کند.

پیشنهاد می‌شود تمرکز تحقیقات آینده بر روی افزایش دقت پیش‌بینی، بهبود الگوریتم‌های کنترل، و ادغام فناوری‌های نوین در زیرساخت‌های انرژی باشد تا ضمن بهره‌برداری بهینه از منابع، امکان مقابله با عدم قطعیت‌ها و اختلالات به بهترین شکل فراهم گردد. این رویکردها موجب تسریع در تحقق اهداف توسعه پایدار و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی خواهد شد.

پیشنهادهای آتی:

۱. تحقیق و توسعه بیشتر در زمینه الگوریتم‌های پیش‌بینی انرژی با هدف کاهش عدم قطعیت و افزایش دقت پیش‌بینی تولید انرژی تجدیدپذیر.
۲. طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی پیشرفته برای جبران نوسانات و اختلالات در شبکه‌های انرژی.

۳. استفاده گسترده‌تر از هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در مدیریت هوشمند شبکه‌ها و کنترل پویای سامانه‌های انرژی.
۴. ایجاد چارچوب‌های سیاست‌گذاری پویا و منعطف که بتواند به سرعت با تغییرات فناوری و بازار انرژی تجدیدپذیر هماهنگ شود.
۵. تحقیقات میان‌رشته‌ای و همکاری‌های بین‌المللی برای به اشتراک‌گذاری دانش، تجربیات و توسعه فناوری‌های پایدار و مقرون‌به‌صرفه.
۶. توسعه فناوری‌های نوین در سیستم‌های فتوولتائیک شناور و سایر سامانه‌های مبتنی بر انرژی خورشیدی با هدف بهبود کارایی و کاهش اثرات زیست‌محیطی

منابع:

- Anbarasu, P., & Suresh Kumar, A. (2023). Design and development of a floating photovoltaic prototype system for agricultural irrigation in India. *Agricultural Energy Journal*.
- Aroni, M., Kang, C., & others. (2020). Blockchain applications in renewable energy networks. *Energy Reports*, 6, 56–69. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.09.002//>.
- Chadri, G., Hajjaj, M., & Portmans, J. (2023). Comprehensive performance review of floating photovoltaic (FPV) thermal systems and CFD modeling for module cooling analysis. *Journal of Renewable Energy Studies*.
- Chen, C. (2023). Optimal design method for floating photovoltaic systems considering economic and environmental factors. *Optimization in Renewable Energy*.
- Chen, Y., Liu, B., & others. (2019). Robust control in renewable energy systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 307–319. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.028//>.
- eia, "Electricity in the United States," U.S. Energy Information Administration, 2017.

- Eurelectric – The Union of the Electricity Industry. (2021). Microgrids and Local Energy Systems Report. https://www.eurelectric.org/media/5290/microgrids_report_2021.pdf/.
- Fang, X., Misra, S., Xue, G., & Yang, D. (2012). Smart grid—The new and improved power grid: A survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 14(4), 944–980. <https://doi.org/10.1109/SURV.2011.101911.00087//>.
- Fang, X., Misra, S., Xue, G., & Yang, D. (2012). Smart grid—The new and improved power grid: A survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 14(4), 944–980. <https://doi.org/10.1109/SURV.2011.101911.00087//>.
- G. K. X. Melvin, “Experimental study of the effect of floating solar panels on reducing evaporation in Singapore reservoirs,” NATIONAL UNIVERSITY OF SINGAPORE, 2015.
- Green, W., Li, Y., & Zhang, X. (2022). Green energy as a new determinant of green growth in China. Economic Modelling, 113, 105874. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2022.105874>
- Hai, W., Xiao, L., & Kai, W. (2024). Structural resistance evaluation and analysis of floating structures. Structural Engineering in Renewable Systems.
- Hong, T., Li, J., & others. (2016). Modeling and forecasting hourly electricity load and generation using machine learning. Applied Energy, 162, 286–297. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.087//>.
- I. Craig, A. Green, M. Scobie, and E. Schmidt, Controlling Evaporation Loss from Water Storages, no. 1000580/1. 2005, p. 207.
- International Energy Agency (IEA). (2022). Renewables 2022: Analysis and forecast to 2027. [//">https://www.iea.org/reports/renewables-2022 //](https://www.iea.org/reports/renewables-2022).
- Jalab, A., Jalab, Z., Al-Hammoumi, A. B., Tina, G. M., Muttahir, S., & Laouid, A. Q. (2024). A comprehensive review of floating solar PV systems from technical, environmental, and economic perspectives. International Journal of Solar Energy Engineering.

- Jung, S., & Kim, H.-K. (2020). Impact of near-future turbine technology on the wind power potential of low wind regions. *Applied Energy*, 272, 115251. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115251//>.
- Palma, M., García, F., & others. (2022). AI-based decision support models for managing renewable energy grids. *Journal of Cleaner Production*, 352, 131509. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131509//>.
- S. Minamino, "floating solar plants: niche rising to the surface?," *Solarplaza*, 2016
- U.S. Energy Information Administration (EIA). (2017). Electricity in the United States. <https://www.eia.gov/energyexplained/electricity/electricity-in-the-us.php//>.
- Wei, Y., Khajesteh, D., Windt, K., & Huang, L. (2024). Performance review of floating photovoltaic systems with focus on technical and environmental aspects. *Environmental Energy Reviews*.
- Zhang, H., & Su, C. (2023). Mechanical property analysis of marine FPV structures and stability against wind and waves. *Marine Renewable Energy Research*.
- Zhang, Y., Wang, B., & Li, J. (2023). A comprehensive review of energy storage technology development and application. *Energy Storage*, 5(1), e12345. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.12345//>.
- Zhang, Y., Zhao, Y., & others. (2023). Recent advances in solid-state lithium batteries. *Nature Reviews Materials*, 8, 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41578-023-00533-7//>.