سیاست‌های توسعه و به‌کارگیری سامانه‌های ذخیره‌سازی مبتنی بر ابرخازن برای تثبیت فرکانس نیروگاه‌های خورشیدی در ایران

چکیده گزارش سیاستی:

گسترش ظرفیت نیروگاه‌های خورشیدی در کشور، اگرچه یکی از مسیرهای مهم برای تأمین برق و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی است، اما افزایش سهم منابع تولید متغیر و مبتنی بر مبدل‌های الکترونیک قدرت، نیاز به توسعه راهکارهای جدید برای حفظ انعطاف‌پذیری و پایداری شبکه را افزایش می‌دهد. تغییرات سریع تابش خورشید می‌تواند موجب نوسان توان خروجی نیروگاه‌های خورشیدی شود و در شرایط نفوذ بالای این منابع، مدیریت این نوسانات و تأمین پاسخ سریع فرکانسی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. در سطح جهانی نیز ذخیره‌سازی انرژی به یکی از ابزارهای اصلی افزایش انعطاف‌پذیری شبکه و ادغام منابع تجدیدپذیر تبدیل شده است. در این میان، ابرخازن‌ها به دلیل توان ویژه بالا، سرعت پاسخ بسیار سریع، قابلیت شارژ و دشارژ در تعداد زیاد سیکل و قابلیت ارائه توان در بازه‌های کوتاه، می‌توانند برای کاربردهایی که نیازمند پاسخ سریع توان هستند، از جمله تثبیت فرکانس و جبران نوسانات سریع توان، مورد توجه قرار گیرند. مسئله اصلی برای ایران صرفاً فقدان فناوری ابرخازن نیست، بلکه نبود یک چارچوب منسجم برای شناسایی کاربرد، ارزیابی اقتصادی، تعریف الزامات اتصال به شبکه، اجرای پایلوت و ایجاد بازار برای خدمات شبکه‌ای ذخیره‌سازها است. بر این اساس، سیاست پیشنهادی این گزارش، حرکت از رویکرد «توسعه عمومی فناوری ذخیره‌سازی» به سمت توسعه کاربردمحور سامانه‌های ذخیره‌سازی سریع در نیروگاه‌های خورشیدی است. در این رویکرد، ابتدا کاربرد تثبیت فرکانس از نظر فنی و اقتصادی ارزیابی شده، سپس سامانه متناسب با نیاز واقعی طراحی و ساخته و در یک نیروگاه خورشیدی به‌صورت پایلوت اجرا می‌شود. در نهایت، ایجاد چارچوب تنظیم‌گری برای خدمات جانبی شبکه، تعریف مشوق‌های اجرای پایلوت، توسعه زنجیره ارزش داخلی و ایجاد سازوکار خرید خدمات انعطاف‌پذیری می‌تواند زمینه توسعه این فناوری و مشارکت شرکت‌های دانش‌بنیان ایرانی را فراهم کند.

شناسنامه گزارش سیاستی

عنوان گزارش	سیاست‌های توسعه و به‌کارگیری سامانه‌های ذخیره‌سازی مبتنی بر ابرخازن برای تثبیت فرکانس نیروگاه‌های خورشیدی در ایران
حوزه تخصصی	فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی، ابرخازن‌ها و سامانه‌های ذخیره‌سازی مبتنی بر ابرخازن، شبکه‌های هوشمند و خدمات جانبی شبکه برق، انرژی‌های تجدیدپذیر و یکپارچه‌سازی با شبکه، الکترونیک قدرت و سیستم‌های مدیریت انرژی، فناوری نانو و مواد پیشرفته برای ذخیره‌سازی انرژی، گذار انرژی و انعطاف‌پذیری شبکه برق
مخاطبان اصلی	مدیران و سیاست‌گذاران وزارت نیرو، مدیران و پژوهشگران پژوهشگاه نیرو، ستاد ویژه توسعه فناوری نانو و میکرو، شرکت مدیریت شبکه برق ایران، سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق (ساتبا)، شرکت‌های برق منطقه‌ای و شرکت‌های توزیع نیروی برق
سفارش دهنده	پژوهشگاه نیرو
نویسندگان	دکتر مجید میرزایی (ایمیل سازمانی: mjmirzaei@nri.ac.ir – دکتر سید سعید طاهری- دکتر فرهاد فلاحی
ناظر	پژوهشکده تولید
پژوهشکده، گروه پژوهشی	پژوهشکده تولید- مرکز تخصصی نوآوری و توسعه فناوری نانو
تاریخ مطالعه	مرداد ۱۴۰۵

۱. بیان مسئله و شکاف سیاستی

۱.۱. بیان مسئله

افزایش ظرفیت تولید برق خورشیدی، ماهیت شبکه برق را در حال تغییر قرار داده است. نیروگاه‌های خورشیدی برخلاف نیروگاه‌های متعارف، تولیدی وابسته به شرایط جوی دارند و تغییرات تابش می‌تواند باعث تغییر سریع توان تولیدی شود. هم‌زمان، اتصال این منابع از طریق مبدل‌های الکترونیک قدرت، نحوه تأمین برخی خدمات سنتی شبکه از جمله پاسخ فرکانسی را تغییر می‌دهد. در چنین شرایطی، شبکه نیازمند منابعی است که بتوانند در مقیاس زمانی بسیار کوتاه نسبت به تغییرات تولید یا اختلالات شبکه واکنش نشان دهند. ذخیره‌سازهای انرژی یکی از راهکارهای مهم برای تأمین این انعطاف‌پذیری هستند. البته همه فناوری‌های ذخیره‌سازی برای همه کاربردها یکسان نیستند. باتری‌ها در سال‌های اخیر به سرعت در مقیاس شبکه توسعه یافته‌اند و در سال ۲۰۲۵ حدود ۱۰۸ گیگاوات ظرفیت جدید ذخیره‌سازی باتری در جهان اضافه شده است .اما کاربردهایی که نیازمند توان بسیار سریع و سیکل‌های پرتعداد هستند، می‌توانند نیازمند بررسی فناوری‌هایی مانند ابرخازن باشند.

بنابراین پرسش سیاستی اصلی این است:

آیا و تحت چه شرایط فنی و اقتصادی، توسعه سامانه‌های ذخیره‌سازی مبتنی بر ابرخازن می‌تواند برای تثبیت فرکانس و مدیریت نوسانات سریع توان نیروگاه‌های خورشیدی در ایران توجیه‌پذیر باشد و چه سیاست‌هایی برای ایجاد بازار و توسعه این فناوری مورد نیاز است؟

۲.۲. شکاف سیاستی

بررسی وضعیت موجود نشان می‌دهد که در کشور، سیاست‌های توسعه انرژی تجدیدپذیر عمدتاً بر افزایش ظرفیت تولید برق تجدیدپذیر متمرکز بوده‌اند، در حالی که توسعه هم‌زمان زیرساخت‌های انعطاف‌پذیری و ذخیره‌سازی متناسب با این ظرفیت کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از سوی دیگر، ذخیره‌سازی انرژی غالباً از منظر "ذخیره برق برای مصرف در زمان دیگر" مورد توجه قرار می‌گیرد، در حالی که بخش مهمی از ارزش ذخیره‌سازها می‌تواند ناشی از ارائه خدمات سریع شبکه‌ای مانند تنظیم فرکانس، کنترل توان و پشتیبانی از کیفیت توان باشد.

بنابراین شکاف سیاستی را می‌توان در پنج محور خلاصه کرد:

۱- شکاف در تعریف کاربرد: کاربردهای مشخص ذخیره‌سازها در نیروگاه‌های خورشیدی، به‌ویژه کاربردهای پاسخ سریع و تثبیت فرکانس، هنوز به‌صورت نظام‌مند اولویت‌بندی نشده‌اند.

۲- شکاف در ارزیابی اقتصادی: چارچوب مشخصی برای محاسبه ارزش اقتصادی خدمات فرکانسی و مقایسه هزینه سامانه ذخیره‌سازی با منافع آن وجود ندارد.

۳- شکاف در مقررات و بازار خدمات جانبی: مدل مشخصی برای مشارکت ذخیره‌سازها در ارائه خدمات جانبی شبکه و دریافت درآمد متناسب با این خدمات مورد نیاز است.

٤- شکاف در استانداردها و الزامات اتصال: الزامات فنی مشخص برای اتصال سامانه‌های ذخیره‌سازی مبتنی بر ابرخازن به نیروگاه‌های خورشیدی و شبکه باید تدوین و استانداردسازی شود.

۵- شکاف در مسیر توسعه فناوری داخلی: ارتباط منسجم میان پژوهشگاه‌ها، شرکت‌های دانش‌بنیان، سازندگان تجهیزات، بهره‌برداران نیروگاه‌های خورشیدی و متولیان شبکه هنوز نیازمند تقویت است.



شکل ۱. شکاف سیاستی و پیامدهای توسعه ابرخازن برای تثبیت فرکانس در سامانه های تجدیدپذیر

۳. راه‌حل پیشنهادی

راه‌حل پیشنهادی، ایجاد یک برنامه کاربردمحور توسعه ذخیره‌سازی سریع انرژی با تمرکز اولیه بر تثبیت فرکانس نیروگاه‌های خورشیدی است.

این برنامه در چهار گام پیشنهاد می‌شود:

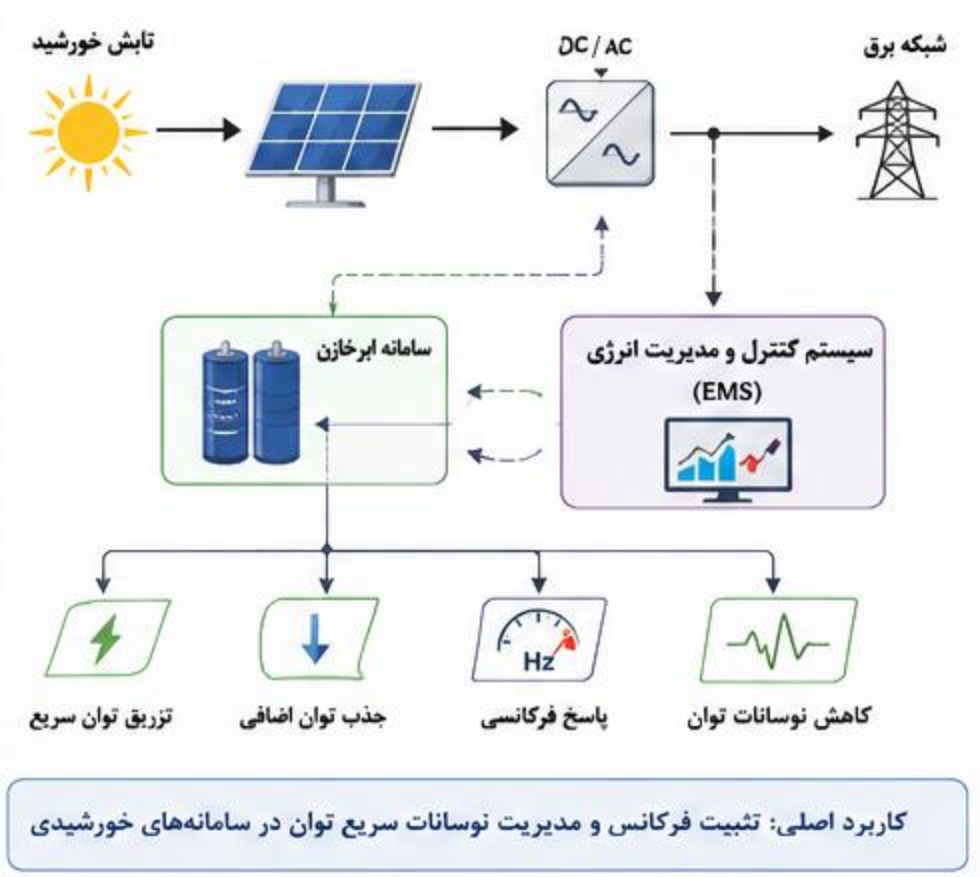
گام اول، ارزیابی فنی و اقتصادی: تعیین ظرفیت و توان موردنیاز، زمان پاسخ، تعداد سیکل کاری، راهبرد کنترل و هزینه سامانه و محاسبه شاخص‌هایی مانند هزینه به ازای هر کیلووات، هزینه چرخه عمر و ارزش اقتصادی خدمات فرکانسی.

گام دوم، طراحی و ساخت داخلی: توسعه سامانه ذخیره‌سازی مبتنی بر ابرخازن با مشارکت شرکت‌های دانش‌بنیان و تمرکز بر ماژول ابرخازنی، مبدل قدرت، سیستم مدیریت انرژی و الگوریتم کنترل.

گام سوم،اجرای پایلوت: اتصال سامانه به یک نیروگاه خورشیدی منتخب و ارزیابی عملکرد آن در شرایط واقعی بهره‌برداری.

گام چهارم، توسعه بازار: پس از اثبات فنی و اقتصادی، تعریف سازوکار خرید خدمات فرکانسی و سایر خدمات جانبی از سامانه‌های ذخیره‌سازی.

این رویکرد با روند جهانی نیز هم‌راستا است؛ در بازارهای پیشرفته، ذخیره‌سازی به‌عنوان یک دارایی انعطاف‌پذیری شبکه و نه صرفاً یک مخزن انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۲. برنامه کاربردمحور توسعه ذخیره‌سازی سریع انرژی با تمرکز اولیه بر تثبیت فرکانس نیروگاه‌های خورشیدی

٤. موانع توسعه در ایران

مهم‌ترین موانع را می‌توان در چند دسته قرار داد:

موانع فنی

- محدودیت تجربه عملیاتی در استفاده از ابرخازن در مقیاس نیروگاهی
- نیاز به توسعه سامانه کنترل و مبدل‌های مناسب
- نبود داده‌های میدانی کافی در شرایط شبکه ایران
- نیاز به تعیین ظرفیت بهینه برای کاربرد تثبیت فرکانس

موانع اقتصادی

- هزینه اولیه نسبتاً بالای سامانه‌های ابرخازنی
- نوسانات نرخ ارز و هزینه تجهیزات وارداتی
- نبود سازوکار مشخص برای ارزش‌گذاری خدمات فرکانسی

- دشواری محاسبه بازگشت سرمایه صرفاً بر اساس فروش انرژی

موانع سیاستی و تنظیم‌گری

- نبود چارچوب مشخص برای مالکیت و بهره‌برداری از ذخیره‌سازهای متصل به شبکه
- نبود بازار شفاف خدمات جانبی
- مشخص نبودن مدل پرداخت بابت پاسخ فرکانسی
- نبود مشوق مشخص برای اجرای پایلوت‌های ذخیره‌سازی

موانع زنجیره تأمین

- وابستگی بخشی از زنجیره تأمین به تجهیزات خارجی
- محدودیت تولید داخلی برخی اجزای پیشرفته
- فاصله میان شرکت‌های فناور و نیازهای واقعی صنعت

موانع دانش و زیرساخت

- کمبود پروژه‌های میدانی
- پراکندگی ظرفیت‌های علمی و صنعتی
- کمبود داده‌های واقعی برای ارزیابی اقتصادی
- نبود زیرساخت‌های کافی برای آزمون سامانه‌های ذخیره‌سازی در مقیاس صنعتی



شکل ۳. موانع توسعه فناوری در ایران

۵. توصیه‌های سیاستی

توصیه اول: تعریف ذخیره‌سازی به‌عنوان بخشی از زیرساخت توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر

در برنامه‌های توسعه نیروگاه‌های خورشیدی، ظرفیت موردنیاز ذخیره‌سازی و خدمات انعطاف‌پذیری نیز در مطالعات توسعه شبکه لحاظ شود.

توصیه دوم: اجرای پایلوت ملی تثبیت فرکانس

یک پروژه پایلوت با مشارکت پژوهشگاه نیرو، شرکت‌های دانش‌بنیان، ساتبا و بهره‌بردار نیروگاه خورشیدی تعریف شود تا عملکرد فنی و اقتصادی سامانه ابرخازنی در شرایط واقعی شبکه ارزیابی شود.

توصیه سوم: ایجاد چارچوب ارزش‌گذاری خدمات فرکانسی

ارزش اقتصادی خدماتی مانند پاسخ سریع فرکانسی، تنظیم توان و کاهش نوسانات مشخص و سازوکار پرداخت به ارائه‌دهندگان این خدمات تدوین شود.

توصیه چهارم: تدوین الزامات اتصال و بهره‌برداری

الزامات فنی اتصال سامانه‌های ذخیره‌سازی به نیروگاه‌های خورشیدی و شبکه، شامل حفاظت، کنترل، کیفیت توان، پاسخ فرکانسی و الزامات ارتباطی تدوین شود.

توصیه پنجم: حمایت از شرکت‌های دانش‌بنیان

حمایت‌ها به‌جای تمرکز صرف بر تولید سلول ابرخازن، در مرحله نخست بر ساخت سامانه، ماژول، مبدل قدرت، سیستم مدیریت انرژی و کنترل متمرکز شود.

توصیه ششم: ایجاد بازار اولیه

در پروژه‌های توسعه نیروگاه‌های خورشیدی منتخب، امکان استفاده از ذخیره‌سازها به‌عنوان بخشی از الزامات ارائه خدمات شبکه بررسی شود تا بازار اولیه برای فناوری ایجاد شود.

توصیه هفتم: توسعه زنجیره ارزش داخلی

در میان‌مدت، توسعه فناوری مواد، الکترودها، سلول، ماژول، سیستم مدیریت انرژی و مبدل قدرت در قالب یک نقشه راه منسجم دنبال شود.

توصیه هشتم: تصمیم‌گیری مبتنی بر هزینه به ازای توان

برای کاربرد تثبیت فرکانس، ارزیابی فناوری صرفاً بر مبنای هزینه به ازای kWh انجام نشود؛ بلکه شاخص‌هایی مانند هزینه به ازای kW توان قابل ارائه، زمان پاسخ، عمر سیکلی و هزینه چرخه عمر نیز لحاظ شوند. این نکته از نظر سیاست‌گذاری بسیار مهم است، زیرا کاربرد موردنظر شما "ذخیره‌سازی طولانی‌مدت انرژی" نیست؛ بلکه تأمین توان سریع برای پشتیبانی شبکه است.

٦. جمع‌بندی و چشم‌انداز

توسعه نیروگاه‌های خورشیدی بدون توجه هم‌زمان به نیازهای انعطاف‌پذیری شبکه می‌تواند در آینده چالش‌های جدیدی برای بهره‌برداری و پایداری سیستم قدرت ایجاد کند. از این منظر، ذخیره‌سازی انرژی باید نه به‌عنوان یک فناوری مستقل، بلکه

به‌عنوان جزئی از معماری آینده شبکه برق دیده شود. ابرخازن‌ها به دلیل ویژگی‌هایی همچون پاسخ سریع و قابلیت تحمل سیکل‌های زیاد، می‌توانند در بخشی از این زنجیره، به‌ویژه در تثبیت فرکانس، جبران نوسانات سریع توان و ارائه خدمات سریع شبکه‌ای مورد استفاده قرار گیرند.

با این حال، توصیه سیاستی این گزارش توسعه گسترده و بدون ارزیابی این فناوری نیست؛ بلکه پیشنهاد می‌شود ابتدا یک مسیر مرحله‌ای شامل ارزیابی ، طراحی، ساخت، پایلوت، اعتبارسنجی اقتصادی، تدوین مقررات، و توسعه بازار دنبال شود.

چشم‌انداز مطلوب آن است که ایران از مرحله مصرف‌کننده تجهیزات ذخیره‌سازی عبور کرده و به سمت طراحی و ساخت سامانه‌های ذخیره‌سازی و ارائه خدمات شبکه‌ای مبتنی بر آن‌ها حرکت کند.

در این مسیر، اجرای یک پایلوت واقعی در یک نیروگاه خورشیدی می‌تواند نقطه عطفی برای تبدیل دانش و ظرفیت فناورانه موجود به راهکار عملیاتی و قابل توسعه در صنعت برق کشور باشد.

۷. منابع و مراجع

1. IEA, *Electricity 2026 – Grids*.
2. IEA, *Electricity 2026 – Flexibility*.
3. IEA, *Global Energy Review 2026 – Battery Storage*.
4. IEA, *Introduction to System Integration of Renewables*
5. IEC 62933, *Electrical Energy Storage Systems*.
6. IEC 62391, *Fixed Electric Double-Layer Capacitors*
7. IEEE Std 1547, *Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces*.
8. IEC 62477-1, *Safety Requirements for Power Electronic Converter Systems and Equipment*.
9. IEC 62109, *Safety of Power Converters for Use in Photovoltaic Power Systems*.