

رصد فناوری سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر ابرخازن برای

تثبیت فرکانس شبکه‌های برق مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر

چکیده گزارش:

افزایش سهم منابع انرژی تجدیدپذیر، به‌ویژه نیروگاه‌های خورشیدی و بادی، اگرچه نقش مهمی در گذار به نظام‌های انرژی پاک دارد، اما به دلیل ماهیت متغیر تولید، چالش‌هایی همچون نوسانات توان، انحراف فرکانس، افت کیفیت توان و کاهش پایداری شبکه برق را به همراه آورده است. از این رو، توسعه سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی با قابلیت پاسخ‌دهی سریع به‌عنوان یکی از راهکارهای کلیدی برای افزایش انعطاف‌پذیری و قابلیت اطمینان شبکه مورد توجه قرار گرفته است. در این میان، ابرخازن‌ها به دلیل چگالی توان بالا، زمان پاسخ بسیار کوتاه، راندمان زیاد، قابلیت شارژ و دشارژ سریع و عمر سیکلی طولانی، گزینه‌ای مناسب برای کاربردهایی نظیر تثبیت فرکانس، بهبود کیفیت توان و جبران نوسانات سریع منابع تجدیدپذیر محسوب می‌شوند. این گزارش با هدف رصد و تحلیل روند توسعه فناوری سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر ابرخازن برای کاربرد در تثبیت فرکانس شبکه‌های برق دارای نفوذ بالای انرژی‌های تجدیدپذیر تدوین شده است. در این راستا، اصول عملکرد فناوری، روندهای جهانی توسعه، سطح بلوغ فناوری، وضعیت پتنت‌ها، بازیگران اصلی، بازار جهانی، روندهای نوظهور مواد و طراحی سلول، ظرفیت‌های ایران و فرصت‌های پیش‌روی شرکت‌های دانش‌بنیان مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که اگرچه تولید صنعتی سلول‌های ابرخازنی پیشرفته عمدتاً در اختیار کشورهای پیشرو است، اما ایران با تکیه بر توانمندی‌های خود در فناوری نانو، طراحی سامانه‌های ذخیره‌سازی، توسعه سیستم‌های مدیریت انرژی، ساخت ماژول‌های بومی و اجرای پروژه‌های پایلوت در صنعت برق، از ظرفیت مناسبی برای ورود به این حوزه برخوردار است. بر این اساس، توسعه مرحله‌ای این فناوری با تمرکز بر کاربردهای شبکه‌ای، همکاری میان پژوهشگاه‌ها، دانشگاه‌ها، شرکت‌های دانش‌بنیان و صنعت برق، می‌تواند ضمن افزایش تاب‌آوری شبکه و تسهیل توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، زمینه ایجاد زنجیره ارزش داخلی و ارتقای توان فناورانه کشور را فراهم سازد.

شناسنامه گزارش رصد فناوری

عنوان گزارش	رصد فناوری سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر ابرخازن برای تثبیت فرکانس شبکه‌های برق مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر
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- ضرورت توسعه فناوری

۱-۱- گذار صنعت برق به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر

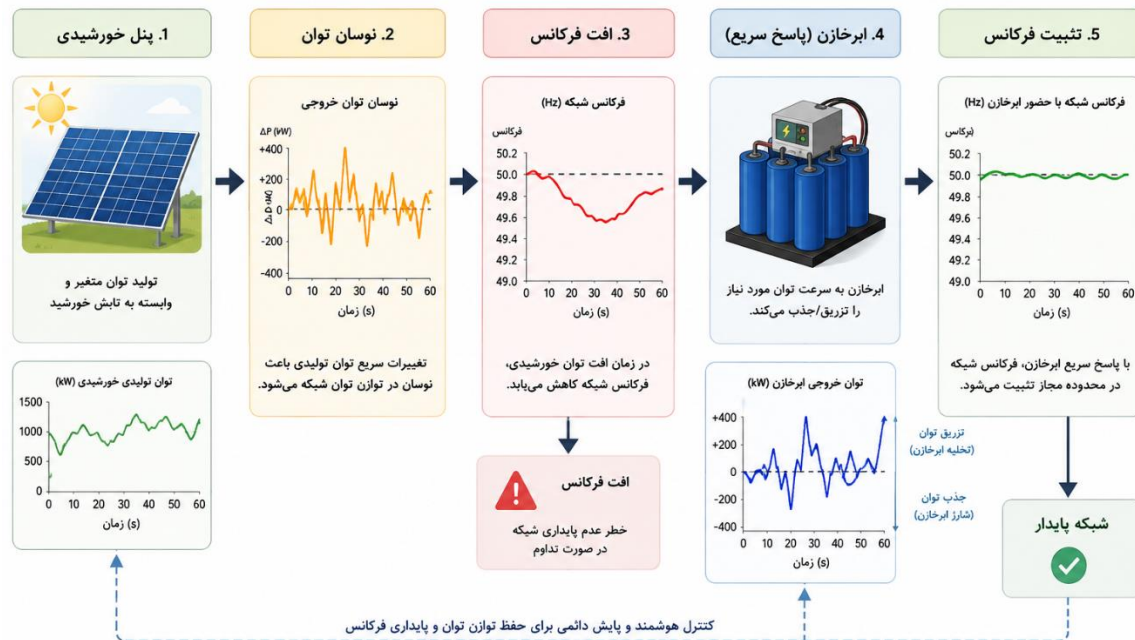
صنعت برق جهان در دهه اخیر با تحولی بنیادین در ساختار تولید انرژی مواجه شده است. افزایش نگرانی‌های ناشی از تغییرات اقلیمی، کاهش منابع سوخت‌های فسیلی، تعهد کشورها به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و کاهش هزینه تولید برق از منابع تجدیدپذیر، موجب شده است که توسعه نیروگاه‌های خورشیدی و بادی به یکی از مهم‌ترین راهبردهای بخش انرژی تبدیل شود. بر اساس گزارش‌های آژانس بین‌المللی انرژی (IEA)، انرژی خورشیدی طی سال‌های اخیر سریع‌ترین نرخ رشد را در میان تمامی فناوری‌های تولید برق داشته و انتظار می‌رود طی دهه آینده سهم قابل توجهی از ظرفیت جدید تولید برق جهان را به خود اختصاص دهد. در ایران نیز با وجود ظرفیت بالای تابش خورشیدی، توسعه نیروگاه‌های فتوولتائیک در برنامه‌های کلان وزارت نیرو قرار گرفته است. رشد ظرفیت نیروگاه‌های خورشیدی و بادی، اگرچه موجب کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کاهش انتشار آلاینده‌ها می‌شود، اما چالش‌های جدیدی را نیز برای بهره‌برداری ایمن و پایدار از شبکه برق ایجاد می‌کند [۱].

۱-۲- چالش نوسانات توان در منابع انرژی تجدیدپذیر

برخلاف نیروگاه‌های حرارتی که توان خروجی آن‌ها تا حد زیادی قابل کنترل است، توان تولیدی منابع تجدیدپذیر تابع مستقیم شرایط محیطی است. تغییر شدت تابش خورشید، عبور ابرها، تغییر سرعت باد و نوسانات دمای محیط، باعث تغییرات لحظه‌ای توان خروجی این منابع می‌شود. این تغییرات می‌توانند در بازه زمانی چند میلی‌ثانیه تا چند دقیقه رخ دهند و در صورت نفوذ گسترده منابع تجدیدپذیر، موجب بروز نوسانات قابل توجه در شبکه برق شوند. در شبکه‌های سستی، ژنراتورهای سنکرون به دلیل جرم دوار زیاد، نقش مهمی در تأمین اینرسی شبکه و حفظ پایداری فرکانس ایفا می‌کنند. اما با افزایش سهم منابع مبتنی بر مبدل‌های الکترونیک قدرت، مانند سامانه‌های فتوولتائیک، اینرسی مؤثر شبکه کاهش یافته و حساسیت سیستم نسبت به تغییرات ناگهانی توان افزایش می‌یابد. در نتیجه، حتی نوسانات نسبتاً کوچک در تولید یا مصرف می‌توانند باعث انحراف فرکانس، افت کیفیت توان و افزایش احتمال خاموشی شوند [۲].

۱-۳- اهمیت تثبیت فرکانس در شبکه برق

فرکانس شبکه یکی از مهم‌ترین شاخص‌های عملکرد سیستم قدرت است و بیانگر تعادل لحظه‌ای میان توان تولید و توان مصرفی است. هرگونه عدم تعادل میان تولید و مصرف، خود را به صورت تغییر فرکانس نشان می‌دهد. در شبکه برق ایران، همانند بسیاری از کشورهای دیگر، فرکانس نامی برابر ۵۰ هرتز است و انحراف از این مقدار باید در محدوده بسیار محدودی حفظ شود. کاهش فرکانس معمولاً ناشی از کمبود تولید نسبت به بار است، در حالی که افزایش فرکانس نشان‌دهنده تولید بیش از میزان مصرف است. در صورتی که این انحراف‌ها به سرعت جبران نشوند، ممکن است عملکرد تجهیزات حفاظتی، ژنراتورها، ترانسفورماتورها و تجهیزات الکترونیک قدرت مختل شده و در نهایت منجر به خاموشی‌های گسترده شود. با افزایش سهم منابع تجدیدپذیر، نیاز به سامانه‌هایی که بتوانند در کسری از ثانیه تغییرات توان را جبران کنند، بیش از گذشته احساس می‌شود. این سامانه‌ها باید قادر باشند انرژی را در زمان بسیار کوتاه جذب یا تزریق کرده و از انحراف فرکانس جلوگیری کنند [۳].



شکل ۱. شماتیک اثر نوسانات توان خورشیدی بر فرکانس شبکه

۱-۴- نقش سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی در پایداری شبکه

سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی (Energy Storage Systems) به عنوان یکی از ارکان اصلی شبکه‌های هوشمند، امکان متعادل‌سازی لحظه‌ای تولید و مصرف را فراهم می‌کنند. این سامانه‌ها می‌توانند انرژی اضافی تولیدشده در زمان مازاد تولید را ذخیره کرده و در زمان کاهش تولید یا افزایش بار، آن را مجدداً به شبکه تزریق کنند. فناوری‌های متنوعی برای ذخیره‌سازی انرژی توسعه یافته‌اند که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به باتری‌های لیتیوم‌یونی، نیروگاه‌های تلمبه‌ذخیره‌ای، فلاپویل، ذخیره‌سازی مغناطیسی ابررسانا (SMES)، سامانه‌های هوای فشرده و ابرخازن‌ها اشاره کرد. هر یک از این فناوری‌ها دارای مزایا، محدودیت‌ها و حوزه کاربرد متفاوتی هستند و انتخاب فناوری مناسب به عواملی مانند زمان پاسخ، ظرفیت ذخیره‌سازی، تعداد سیکل کاری، راندمان، هزینه و شرایط بهره‌برداری بستگی دارد. در کاربردهایی مانند تثبیت فرکانس که سرعت پاسخ اهمیت بسیار بالایی دارد، سامانه‌های ذخیره‌سازی با توان ویژه بالا نسبت به سامانه‌های دارای انرژی ویژه بالا، ارجحیت دارند. مقایسه فناوری‌های مختلف ذخیره‌سازی انرژی در جدول ۱ نشان می‌دهد که هیچ فناوری به‌تنهایی قادر به پاسخگویی به تمامی نیازهای شبکه برق نیست و انتخاب فناوری مناسب باید بر اساس نوع خدمت مورد انتظار انجام شود. در کاربردهایی نظیر پیک‌سای، انتقال انرژی بین دوره‌های کم‌باری و پرباری و ذخیره‌سازی چندساعته، باتری‌های لیتیوم‌یونی به دلیل چگالی انرژی بالا گزینه مناسبی هستند. در مقابل، در خدمات جانبی شبکه مانند کنترل اولیه فرکانس، جبران نوسانات لحظه‌ای توان و بهبود کیفیت توان، چگالی توان، سرعت پاسخ و طول عمر سیکلی اهمیت بیشتری نسبت به ظرفیت ذخیره انرژی دارند. از این منظر، ابرخازن‌ها به دلیل زمان پاسخ در حد میلی‌ثانیه، راندمان بسیار بالا، تحمل بیش از یک میلیون چرخه شارژ و دشارژ و قابلیت تبادل سریع توان، برتری محسوسی نسبت به سایر فناوری‌ها دارند. اگرچه سامانه‌های SMES نیز عملکردی مشابه یا حتی سریع‌تر ارائه می‌دهند، اما هزینه سرمایه‌گذاری بسیار بالا، نیاز به سامانه‌های برودتی برای حفظ حالت ابررسانایی و پیچیدگی بهره‌برداری، استفاده گسترده از آن‌ها را محدود کرده است. فلاپویل‌ها نیز گزینه مناسبی برای پاسخ سریع هستند،

اما به دلیل وجود اجزای مکانیکی دوار، نیازمند تعمیر و نگهداری بیشتری نسبت به ابرخازن‌ها هستند. بنابراین، در شبکه‌های دارای نفوذ بالای منابع انرژی تجدیدپذیر، ابرخازن‌ها یکی از مناسب‌ترین گزینه‌ها برای تثبیت فرکانس و کاهش نوسانات توان محسوب می‌شوند. با این حال، به دلیل چگالی انرژی محدود، استفاده از آن‌ها در قالب سامانه‌های هیبریدی باتری-ابرخازن به‌عنوان راهکاری مؤثر برای بهره‌گیری هم‌زمان از مزایای هر دو فناوری، به یکی از روندهای غالب توسعه فناوری در سال‌های اخیر تبدیل شده است [۴، ۵].

جدول ۱. مقایسه فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی برای خدمات جانبی شبکه

شاخص	ذخیره‌سازی مغناطیسی ابرسانا (SMES)	فلاپویل (Flywheel)	باتری لیتیومی	ابرخازن (Supercapacitor)
سازوکار ذخیره انرژی	انرژی میدان مغناطیسی	انرژی جنبشی جرم دوار	واکنش‌های الکتروشیمیایی	ذخیره الکترواستاتیکی و/یا شبه‌فازادایی
زمان پاسخ	کمتر از ۵ میلی‌ثانیه	۵ تا ۲۰ میلی‌ثانیه	۱۰۰ میلی‌ثانیه تا چند ثانیه	کمتر از ۱۰ میلی‌ثانیه
چگالی توان	بسیار زیاد	زیاد	متوسط (۲-۲۰ kW/kg)	بسیار زیاد (۱۵-۵ kW/kg)
چگالی انرژی	بسیار کم	متوسط (۸۰ Wh/kg - ۲۰)	زیاد (۲۸۰-۱۲۰ Wh/kg)	کم (۱۵-۳ Wh/kg)
راندمان رفت و برگشت	۹۵-۹۸٪	۸۵-۹۵٪	۹۰-۹۵٪	۹۹-۹۵٪
طول عمر سیکلی	بیش از ۱۰۰,۰۰۰ سیکل	بیش از ۱۰۰,۰۰۰ سیکل	۱۰۰۰-۳۰۰۰ سیکل	بیش از ۱,۰۰۰,۰۰۰ سیکل
عمق دشارژ مجاز	۱۰۰٪	۱۰۰٪	۸۰-۹۰٪	تقریباً ۱۰۰٪
خودتخلیه	زیاد	متوسط	کم	زیاد
نیاز به تعمیر و نگهداری	زیاد	متوسط	کم	بسیار کم
هزینه سرمایه‌گذاری	بسیار زیاد	زیاد	متوسط	متوسط تا زیاد
بلوغ فناوری (TRL)	۸-۶	۹-۸	۹	۹
کاربرد مناسب	کاربردهای خاص شبکه و مراکز تحقیقاتی	تثبیت فرکانس، UPS، بازیابی انرژی ترمز	ذخیره‌سازی انرژی، پیک‌سای، انتقال بار	تثبیت فرکانس، جبران نوسانات، کیفیت توان
تناسب برای تثبیت فرکانس	★★★★★	★★★★★	★★★	★★★★★
تناسب برای ذخیره‌سازی بلندمدت انرژی	★	★★	★★★★★	★

۱-۵- مزیت ابرخازن‌ها در کاربرد تثبیت فرکانس

ابرخازن‌ها (Supercapacitors یا Ultracapacitors) به دلیل سازوکار ذخیره انرژی مبتنی بر تشکیل لایه دوگانه الکتریکی و یا واکنش‌های شبه‌فازادایی، قادرند در مدت زمانی در حد میلی‌ثانیه شارژ و دشارژ شوند. این ویژگی آن‌ها را به یکی از

مناسب‌ترین گزینه‌ها برای جبران نوسانات سریع توان در شبکه‌های برق تبدیل کرده است. در مقایسه با باتری‌ها، ابرخازن‌ها دارای چگالی توان بسیار بالاتر، طول عمر چرخه‌ای بسیار زیاد (بیش از یک میلیون سیکل)، راندمان شارژ و دشارژ بالا و مقاومت مناسب در برابر شارژ و دشارژهای مکرر هستند. اگرچه چگالی انرژی آن‌ها نسبت به باتری‌ها پایین‌تر است، اما در کاربردهایی که نیاز به تأمین توان بالا در مدت کوتاه وجود دارد، این محدودیت اهمیت کمتری پیدا می‌کند. به همین دلیل، در بسیاری از پروژه‌های جدید شبکه هوشمند، ابرخازن‌ها به صورت مستقل یا در قالب سامانه‌های هیبریدی همراه با باتری‌های لیتیوم‌یونی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این ساختار، ابرخازن وظیفه جبران نوسانات سریع و باتری وظیفه تأمین انرژی در بازه‌های زمانی طولانی‌تر را بر عهده دارد. این رویکرد علاوه بر بهبود کیفیت توان، موجب کاهش تنش‌های کاری وارد بر باتری، افزایش طول عمر آن و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری می‌شود [۶، ۷].

۱-۶- ضرورت توسعه این فناوری در ایران

ایران از نظر منابع خورشیدی و بادی، در زمره کشورهای دارای ظرفیت بالای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر قرار دارد. توسعه نیروگاه‌های خورشیدی مقیاس بزرگ، نیروگاه‌های پراکنده، ریزشبکه‌ها و سامانه‌های تولید برق در مناطق دورافتاده، نیاز به استفاده از فناوری‌های ذخیره‌سازی سریع انرژی را بیش از پیش افزایش داده است. از سوی دیگر، سیاست‌های کلان کشور در زمینه افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر، توسعه شبکه هوشمند، کاهش شدت مصرف انرژی و حمایت از شرکت‌های دانش‌بنیان، فرصت مناسبی برای توسعه فناوری ابرخازن فراهم کرده است. با وجود آنکه در سال‌های اخیر تحقیقات متعددی در زمینه مواد نانوساختار مورد استفاده در ابرخازن‌ها در دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی کشور انجام شده است، فاصله قابل توجهی میان دستاوردهای آزمایشگاهی و تولید صنعتی این فناوری وجود دارد. بنابراین، توسعه زنجیره ارزش ابرخازن، از تولید مواد اولیه و الکترودهای پیشرفته تا طراحی ماژول‌ها و سامانه‌های ذخیره‌سازی، می‌تواند ضمن ایجاد ارزش افزوده بالا، زمینه شکل‌گیری شرکت‌های دانش‌بنیان و کاهش وابستگی کشور به فناوری‌های وارداتی را فراهم آورد [۴، ۸، ۹].

۲- معرفی فناوری و سازوکار عملکرد

۲-۱- معرفی فناوری ابرخازن

ابرخازن‌ها (Supercapacitors یا Ultracapacitors) نسل پیشرفته‌ای از سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی هستند که از نظر عملکرد، جایگاهی میان خازن‌های معمولی و باتری‌های قابل شارژ دارند. این تجهیزات با بهره‌گیری از سطح ویژه بسیار بالای الکترودها و فاصله بسیار کم میان بارهای الکتریکی، قادرند مقدار قابل توجهی انرژی را نسبت به خازن‌های متداول ذخیره کنند، در حالی که همچنان ویژگی اصلی خازن‌ها یعنی شارژ و دشارژ بسیار سریع را حفظ می‌کنند. برخلاف باتری‌ها که انرژی را عمدتاً از طریق واکنش‌های شیمیایی حجمی ذخیره می‌کنند، در ابرخازن‌ها بخش عمده انرژی در سطح مشترک میان الکترودها و الکترولیت ذخیره می‌شود. این ویژگی موجب می‌شود انتقال بار با مقاومت داخلی بسیار کم و در مدت زمانی در حد میلی‌ثانیه انجام گیرد. نتیجه این سازوکار، دستیابی به چگالی توان بسیار بالا، راندمان شارژ و دشارژ بیش از ۹۵ درصد، قابلیت انجام بیش از یک میلیون چرخه کاری و طول عمر عملیاتی قابل توجه است. اگرچه چگالی انرژی ابرخازن‌ها هنوز از باتری‌های لیتیوم‌یونی کمتر است، اما در کاربردهایی که نیاز به تبادل سریع توان وجود دارد، مانند تثبیت فرکانس شبکه، جبران افت ولتاژ، ترمز احیاکننده، راه‌اندازی تجهیزات با جریان هجومی بالا و پشتیبانی لحظه‌ای از شبکه، عملکرد آن‌ها برتری قابل توجهی نسبت به سایر فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی دارد [۱۰].

۲-۲- اصول ذخیره سازی انرژی در ابرخازن ها

ذخیره انرژی در ابرخازن ها بر پایه دو سازوکار اصلی انجام می شود: ذخیره سازی الکترواستاتیکی و ذخیره سازی الکتروشیمیایی شبه فارادایی. بر همین اساس، ابرخازن ها به سه گروه اصلی تقسیم می شوند: ابرخازن های لایه دوگانه الکتریکی (EDLC)، شبه ابرخازن ها (Pseudocapacitors) و ابرخازن های هیبریدی (Hybrid Supercapacitors) [۱۰].

۲-۲-۱- ابرخازن های لایه دوگانه الکتریکی (EDLC)

در این نوع، انرژی از طریق تجمع یون های الکترولیت بر سطح الکتروود ذخیره می شود. با اعمال ولتاژ، یون های مثبت و منفی بدون انجام واکنش شیمیایی در مجاورت سطح الکتروود آرایش یافته و لایه ای موسوم به "لایه دوگانه الکتریکی" تشکیل می دهند. از آنجا که هیچ تغییر شیمیایی در ساختار الکتروود رخ نمی دهد، این نوع ابرخازن دارای طول عمر بسیار زیاد، راندمان بالا و پایداری سیکلی مطلوب است. الکتروودهای EDLC معمولاً از کربن فعال، گرافن یا نانولوله های کربنی ساخته می شوند [۱۰].

۲-۲-۲- شبه ابرخازن ها (Pseudocapacitors)

در این گروه، علاوه بر تشکیل لایه دوگانه، واکنش های اکسایش-کاهش سریع و برگشت پذیر نیز در سطح الکتروود رخ می دهد. این واکنش ها ظرفیت ذخیره سازی انرژی را افزایش می دهند و موجب دستیابی به چگالی انرژی بالاتر نسبت به EDLC می شوند. از مهم ترین مواد مورد استفاده در این نوع ابرخازن می توان به اکسیدهای فلزی (مانند RuO_2 ، MnO_2 و NiO) و پلیمرهای رسانا اشاره کرد [۱۰].

۲-۲-۳- ابرخازن های هیبریدی

ابرخازن های هیبریدی با ترکیب سازوکارهای الکترواستاتیکی و فارادایی، تلاش می کنند مزایای هر دو فناوری را به طور هم زمان فراهم کنند. در این ساختار، معمولاً یک الکتروود از جنس مواد کربنی و الکتروود دیگر از مواد فعال شبه فارادایی ساخته می شود. این طراحی موجب افزایش چگالی انرژی، در حالی که بخش عمده ویژگی های توان بالا و سرعت پاسخ سریع حفظ می شود. در سال های اخیر، بخش عمده تحقیقات و توسعه صنعتی بر این نوع ابرخازن ها متمرکز بوده است.

۲-۳- نقش فناوری نانو در توسعه ابرخازن ها

عملکرد ابرخازن ها به طور مستقیم به ویژگی های سطحی و ساختار الکتروودها وابسته است. افزایش سطح ویژه، کاهش مقاومت انتقال بار، بهبود نفوذ یون ها و افزایش پایداری مکانیکی از جمله عواملی هستند که با مهندسی نانو ساختار مواد قابل دستیابی هستند. از این رو، فناوری نانو به عنوان یکی از مهم ترین محرک های توسعه نسل جدید ابرخازن ها شناخته می شود. مواد نانو ساختار به دلیل نسبت سطح به حجم بسیار بالا و امکان طراحی ساختارهای متخلخل، ظرفیت ذخیره سازی بار را افزایش داده و مسیر انتقال یون ها را کوتاه می کنند. این ویژگی ها موجب افزایش ظرفیت ویژه، بهبود چگالی توان، افزایش چگالی انرژی و کاهش مقاومت داخلی سامانه می شوند [۱۰].

مهم ترین مواد نانویی مورد استفاده عبارتند از [۱۰]:

- گرافن (Graphene): رسانایی الکتریکی بسیار بالا، سطح ویژه زیاد و استحکام مکانیکی مطلوب
- نانولوله های کربنی (CNT): شبکه های رسانای سه بعدی با انتقال سریع الکترون

- کربن فعال نانومتخلخل: ماده غالب در ابرخازن‌های تجاری به دلیل هزینه مناسب و سطح ویژه بالا.
- MXene: خانواده‌ای از کاربردها و نیتريد‌های دوبعدی با رسانایی بالا و ظرفیت ویژه چشمگیر که یکی از مهم‌ترین روندهای تحقیقاتی سال‌های اخیر محسوب می‌شود.
- اکسیدهای فلزی نانوساختار: مانند NiO ، MnO_2 ، Co_3O_4 و RuO_2 که ظرفیت شبه‌فاراادی بالایی دارند.
- پلیمرهای رسانا: نظیر پلی‌آنیلین (PANI) و پلی‌پیرول (PPy) که به‌صورت مستقل یا در قالب کامپوزیت با مواد کربنی استفاده می‌شوند.

۲-۴- ساختار سامانه ذخیره‌سازی مبتنی بر ابرخازن

یک سامانه ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر ابرخازن (Supercapacitor Energy Storage System-SCES) تنها از سلول ابرخازنی تشکیل نشده است، بلکه مجموعه‌ای از زیرسامانه‌های الکتریکی، الکترونیکی و کنترلی را در بر می‌گیرد. اجزای اصلی این سامانه عبارت‌اند از:

- ماژول ابرخازنی
- سامانه مدیریت انرژی (EMS)
- مبدل DC/DC دوطرفه
- اینورتر متصل به شبکه
- سامانه پایش و حفاظت
- الگوریتم کنترل فرکانس

در کاربرد تثبیت فرکانس، سامانه کنترل به‌صورت پیوسته فرکانس شبکه را پایش می‌کند. در صورت بروز افت فرکانس ناشی از کاهش توان تولیدی منابع تجدیدپذیر، سامانه مدیریت انرژی فرمان دشارژ ابرخازن را صادر کرده و انرژی ذخیره‌شده از طریق مبدل توان به شبکه تزریق می‌شود. برعکس، در شرایط افزایش تولید و بالا رفتن فرکانس، ابرخازن با جذب توان اضافی شارژ شده و از افزایش بیش از حد فرکانس جلوگیری می‌کند. این فرآیند در بازه زمانی چند میلی‌ثانیه تا چند صد میلی‌ثانیه انجام می‌شود و نقش مؤثری در بهبود پایداری دینامیکی شبکه دارد [۱۱].

۲-۵- مزایا و محدودیت‌های فناوری

فناوری ابرخازن دارای مزایای متعددی از جمله زمان پاسخ بسیار سریع، چگالی توان بالا، طول عمر سیکلی بسیار زیاد، راندمان بالا، قابلیت عملکرد در بازه وسیع دمایی و نیاز اندک به تعمیر و نگهداری است. این ویژگی‌ها، آن را به گزینه‌ای مناسب برای خدمات جانبی شبکه از جمله کنترل فرکانس، تنظیم ولتاژ، کاهش نوسانات توان و افزایش کیفیت توان تبدیل کرده است. با این حال، محدودیت‌هایی نیز وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها چگالی انرژی کمتر نسبت به باتری‌ها، نرخ نسبتاً بالای خودتخلیه و هزینه بالاتر برخی مواد پیشرفته مانند گرافن و MXene است. از این‌رو، یکی از روندهای اصلی تحقیقات جهانی، توسعه مواد نانوساختار کم‌هزینه و طراحی سامانه‌های هیبریدی باتری-ابرخازن برای بهره‌گیری هم‌زمان از مزایای هر دو فناوری است [۱۰].

۳- روندهای جهانی توسعه فناوری

۳-۱- روند جهانی توسعه سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی

رشد سریع منابع انرژی تجدیدپذیر، توسعه خودروهای برقی، گسترش ریزشبکه‌ها و حرکت به سوی شبکه‌های هوشمند، موجب شده است سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی به یکی از ارکان اصلی زیرساخت‌های انرژی تبدیل شوند. طی یک دهه گذشته، سرمایه‌گذاری جهانی در این حوزه رشد قابل توجهی داشته و علاوه بر باتری‌های لیتیوم‌یونی، فناوری‌هایی نظیر ابرخازن، سامانه‌های هیبریدی، فلاپویل و ذخیره‌سازی هیدروژنی نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این میان، ابرخازن‌ها به دلیل توان ویژه بالا و پاسخ دینامیکی سریع، جایگاه ویژه‌ای در ارائه خدمات جانبی شبکه، تثبیت فرکانس، جبران نوسانات توان و پشتیبانی لحظه‌ای از منابع تجدیدپذیر پیدا کرده‌اند. برخلاف باتری‌ها که تمرکز اصلی آن‌ها بر ذخیره انرژی در بازه‌های زمانی طولانی است، توسعه ابرخازن‌ها عمدتاً در راستای افزایش توان، بهبود سرعت پاسخ و افزایش طول عمر سیکلی دنبال می‌شود [۴].

۳-۲- روند انتشار مقالات علمی

بررسی پایگاه‌های علمی بین‌المللی نشان می‌دهد که تعداد مقالات منتشرشده در حوزه ابرخازن‌ها طی دهه گذشته رشد چشمگیری داشته است. این رشد عمدتاً ناشی از پیشرفت در حوزه مواد نانوساختار، به‌ویژه گرافن، نانولوله‌های کربنی، MXene و کامپوزیت‌های هیبریدی بوده است. در سال‌های اخیر، تمرکز پژوهش‌ها از افزایش ظرفیت ویژه صرف، به سمت توسعه الکترودهایی با چگالی انرژی بالاتر، دوام سیکلی بیشتر، انعطاف‌پذیری مکانیکی و قابلیت تولید انبوه تغییر یافته است. همچنین سهم مقالات مرتبط با کاربرد ابرخازن‌ها در شبکه‌های هوشمند، خودروهای برقی، ذخیره‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر و سامانه‌های هیبریدی باتری-ابرخازن به‌طور مستمر در حال افزایش است. روند انتشار مقالات نشان می‌دهد که فناوری ابرخازن از مرحله تحقیقات پایه عبور کرده و بخش قابل توجهی از پژوهش‌ها بر توسعه محصولات و کاربردهای صنعتی متمرکز شده است [۱۲].

۳-۳- روند تحول مواد مورد استفاده در ابرخازن‌ها

یکی از مهم‌ترین محرک‌های پیشرفت فناوری ابرخازن، توسعه مواد الکترودی است. در دهه‌های گذشته، کربن فعال به دلیل سطح ویژه بالا و هزینه مناسب، ماده غالب در ابرخازن‌های تجاری بود. با این حال، محدودیت ظرفیت ویژه این ماده، پژوهشگران را به سمت استفاده از نانومواد پیشرفته سوق داده است. در سال‌های اخیر، گرافن و نانولوله‌های کربنی به دلیل رسانایی بالا، ساختار دوبعدی و سه‌بعدی و قابلیت ایجاد شبکه‌های رسانا، به‌عنوان مواد کلیدی نسل جدید ابرخازن‌ها مطرح شده‌اند. پس از آن، ظهور خانواده مواد دوبعدی MXene نقطه عطفی در توسعه ابرخازن‌ها ایجاد کرد. این مواد به دلیل رسانایی فلزی، گروه‌های عاملی سطحی و امکان انتقال سریع یون‌ها، ظرفیت ویژه و چگالی توان بالاتری نسبت به بسیاری از مواد متداول ارائه می‌دهند. در کنار این مواد، توسعه کامپوزیت‌های مبتنی بر گرافن-اکسید فلزی، CNT-پلیمر رسانا و MXene-کربن فعال، به یکی از مهم‌ترین روندهای تحقیقاتی تبدیل شده است [۱۲].

جدول ۲. سیر تحول نسل‌های مختلف ابرخازن [۱۰].

نسل فناوری	بازه زمانی توسعه	ماده غالب الکتروود	ویژگی شاخص	محدودیت اصلی	وضعیت تجاری
نسل اول	تا حدود ۲۰۰۵	کربن فعال (Activated Carbon)	هزینه پایین، پایداری بالا، فناوری بالغ	چگالی انرژی پایین	کاملاً تجاری (TRL 9)
نسل دوم	۲۰۰۵-۲۰۱۵	نانولوله‌های کربنی (CNT)	رسانایی بهتر، کاهش مقاومت داخلی، افزایش توان	هزینه تولید بالا	تجاری محدود (TRL 8-9)
نسل سوم	۲۰۱۰-۲۰۲۰	گرافن و کامپوزیت‌های گرافنی	سطح ویژه بالا، رسانایی بسیار زیاد، افزایش چگالی انرژی	مقیاس‌پذیری تولید و هزینه	در حال تجاری‌سازی (TRL 7-9)
نسل چهارم	۲۰۱۸-اکنون	MXene و کامپوزیت‌های دوبعدی	ظرفیت ویژه بالا، انتقال سریع یون، عملکرد ممتاز	پایداری شیمیایی و هزینه سنتز	پایلوت تا نیمه‌صنعتی (TRL 5-7)
نسل پنجم	در حال توسعه	ابرخازن‌های حالت جامد (Solid-State)	ایمنی بالا، انعطاف‌پذیری، حذف الکتروولیت مایع	تولید انبوه و کاهش هزینه	آزمایشگاهی تا پایلوت (TRL 4-6)

جدول ۳. مقایسه مواد نانوساختار مورد استفاده در الکتروودهای ابرخازن [۱۰].

ماده نانوساختار	سطح ویژه	سطح ویژه	ظرفیت ویژه	مزیت اصلی	چالش اصلی	مهم‌ترین کاربرد
کربن فعال	بسیار زیاد	بسیار زیاد	متوسط	ارزان، فناوری بالغ	چگالی انرژی پایین	ابرخازن‌های تجاری
گرافن	بسیار زیاد	بسیار زیاد	زیاد	انتقال سریع الکترون، استحکام بالا	تجمع لایه‌ها و هزینه تولید	نسل جدید ابرخازن
نانولوله‌های کربنی (CNT)	زیاد	زیاد	زیاد	شبکه رسانای سه‌بعدی	هزینه بالا	الکتروودهای توان بالا
MXene	زیاد	زیاد	بسیار زیاد	ظرفیت ویژه بالا، انتقال سریع یون	اکسیداسیون و هزینه سنتز	نسل آینده ابرخازن
MnO ₂	متوسط	متوسط	بسیار زیاد	قیمت پایین، ظرفیت شبه‌فارادایی بالا	رسانایی پایین	شبه‌ابرخازن
RuO ₂	زیاد	زیاد	بسیار زیاد	عملکرد عالی	قیمت بسیار بالا	تحقیقات پیشرفته
NiO	متوسط	متوسط	زیاد	قیمت مناسب	رسانایی محدود	الکتروودهای هیبریدی
پلی‌آنیلین (PANI)	متوسط	متوسط	زیاد	ظرفیت بالا، سنتز آسان	کاهش پایداری سیکلی	کامپوزیت‌های رسانا
پلی‌پیرول (PPy)	متوسط	متوسط	زیاد	انعطاف‌پذیری مناسب	تخریب در سیکل‌های زیاد	ابرخازن‌های انعطاف‌پذیر

۳-۴- روند توسعه سامانه‌های هیبریدی

یکی از مهم‌ترین روندهای فناوری طی سال‌های اخیر، حرکت از سامانه‌های ذخیره‌سازی مستقل به سمت سامانه‌های هیبریدی است. در این ساختار، ابرخازن و باتری به‌صورت مکمل عمل می‌کنند؛ ابرخازن نوسانات سریع توان را جذب یا جبران می‌کند و باتری انرژی مورد نیاز در بازه‌های زمانی طولانی‌تر را تأمین می‌کند. این رویکرد علاوه بر افزایش کیفیت توان و پایداری شبکه، موجب کاهش تعداد سیکل‌های کاری باتری، کاهش نرخ تخریب و افزایش عمر مفید آن می‌شود. به همین دلیل، سامانه‌های هیبریدی در بسیاری از پروژه‌های جدید مرتبط با خودروهای برقی، نیروگاه‌های خورشیدی، ریزشبکه‌ها و ایستگاه‌های شارژ سریع مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

۳-۵- روندهای نوظهور فناوری

بررسی مقالات، ثبت اختراعات و سرمایه‌گذاری‌های صنعتی نشان می‌دهد که توسعه فناوری ابرخازن در سال‌های اخیر حول چند محور اصلی متمرکز شده است:

۱. توسعه الکترودهای مبتنی بر MXene با رسانایی و ظرفیت ویژه بالا
 ۲. استفاده از گرافن سه‌بعدی و ساختارهای متخلخل برای افزایش سطح ویژه و کاهش مقاومت داخلی
 ۳. طراحی ابرخازن‌های حالت جامد (Solid-State Supercapacitors) با ایمنی بیشتر و حذف الکترولیت‌های مایع
 ۴. توسعه ابرخازن‌های انعطاف‌پذیر و پوشیدنی برای کاربردهای الکترونیک قابل حمل
 ۵. استفاده از هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در طراحی مواد جدید، پیش‌بینی عملکرد و بهینه‌سازی ساختار الکترودها
 ۶. توسعه سامانه‌های هیبریدی باتری-ابرخازن برای شبکه‌های هوشمند و خودروهای برقی
 ۷. استفاده از مواد زیست‌پایه و کربن‌های مشتق از زیست‌توده به‌منظور کاهش هزینه و افزایش پایداری زیست‌محیطی
- تحلیل روندهای جهانی نشان می‌دهد که فناوری ابرخازن در مرحله بلوغ کاربردی قرار دارد و تمرکز توسعه از افزایش ظرفیت ذخیره انرژی به سمت بهبود عملکرد، کاهش هزینه، افزایش مقیاس‌پذیری و یکپارچه‌سازی با سامانه‌های هوشمند انرژی تغییر یافته است. در این میان، فناوری نانو همچنان مهم‌ترین عامل ارتقای عملکرد ابرخازن‌ها محسوب می‌شود و مواد مانند MXene، گرافن، نانولوله‌های کربنی و کامپوزیت‌های چندجزئی مسیر آینده این فناوری را شکل می‌دهند. از منظر کاربرد در صنعت برق، انتظار می‌رود نقش ابرخازن‌ها در ارائه خدمات جانبی شبکه، تثبیت فرکانس، مدیریت نوسانات منابع تجدیدپذیر و سامانه‌های هیبریدی ذخیره‌سازی انرژی طی سال‌های آینده به‌طور قابل توجهی افزایش یابد [۱۳، ۱۴].

جدول ۴. روندهای نوظهور فناوری ابرخازن

فناوری نوظهور	سطح بلوغ (TRL)	مزیت کلیدی	چالش اصلی	افق تجاری‌سازی
الکترودهای مبتنی بر MXene	۵-۷	ظرفیت ویژه و رسانایی بالا	هزینه و پایداری	۳ تا ۷ سال آینده
گرافن سه‌بعدی	۶-۸	افزایش سطح ویژه و کاهش مقاومت	تولید انبوه	۲ تا ۵ سال
ابرخازن‌های حالت جامد	۴-۶	ایمنی بالا، حذف الکترولیت مایع	هزینه ساخت	۵ تا ۱۰ سال

هم‌اکنون در حال توسعه صنعتی	الگوریتم‌های مدیریت انرژی	افزایش عمر باتری و پاسخ سریع	۸-۹	سامانه‌های هیبریدی باتری-ابرخازن
۳ تا ۵ سال	دوام مکانیکی	کاربرد در تجهیزات پوشیدنی	۵-۷	ابرخازن‌های انعطاف‌پذیر
میان‌مدت	نیاز به داده‌های گسترده	کاهش زمان توسعه مواد جدید	۵-۷	استفاده از هوش مصنوعی در طراحی مواد
۵ سال آینده	یکنواختی کیفیت	کاهش هزینه و پایداری زیست‌محیطی	۵-۷	الکترودهای مشتق از زیست‌توده

۴- رصد پتنت و مالکیت فکری

۴-۱- روند جهانی ثبت اختراع

بررسی روند ثبت اختراع نشان می‌دهد که نوآوری در حوزه ابرخازن‌ها طی دو دهه گذشته رشد مستمری داشته است. در سال‌های نخست، تمرکز پتنت‌ها بر بهبود ساختار سلول، الکترولیت و الکترودهای مبتنی بر کربن فعال بود. با توسعه فناوری نانو، محور ثبت اختراع به سمت استفاده از گرافن، نانولوله‌های کربنی (CNT)، MXene، اکسیدهای فلزی نانو ساختار و کامپوزیت‌های هیبریدی تغییر کرده است. در سال‌های اخیر نیز ثبت اختراعات مرتبط با مدیریت هوشمند انرژی، سامانه‌های هیبریدی باتری-ابرخازن و کاربردهای شبکه هوشمند روندی صعودی داشته است. نکته قابل توجه آن است که بخش قابل توجهی از پتنت‌های جدید دیگر صرفاً به ساخت سلول ابرخازنی محدود نیستند، بلکه طراحی الگوریتم‌های کنترل، سامانه‌های مدیریت انرژی (EMS)، مبدل‌های الکترونیک قدرت و کاربرد ابرخازن در تثبیت فرکانس شبکه نیز به موضوعات مهم ثبت اختراع تبدیل شده‌اند. به‌عنوان نمونه، در سال ۲۰۲۵ یک پتنت چینی روش بهینه‌سازی استفاده از سامانه ذخیره‌سازی مبتنی بر ابرخازن برای تنظیم فرکانس نیروگاه‌های بادی را با بهره‌گیری از پیش‌بینی هوشمند سرعت باد معرفی کرده است [۱۵].

جدول ۵. روند تحول موضوعات ثبت اختراع

دوره زمانی	محور اصلی ثبت اختراع	نمونه فناوری
۲۰۰۰-۲۰۰۸	ساختار سلول و الکترولیت	کربن فعال، الکترولیت آبی
۲۰۰۸-۲۰۱۵	نانومواد کربنی	Graphene, CNT
۲۰۱۵-۲۰۲۰	کامپوزیت‌های هیبریدی	CNT/PANI, Graphene/MnO ₂
۲۰۲۰-۲۰۲۳	مواد دوبعدی	MOF, MXene
۲۰۲۳-۲۰۲۶	سامانه‌های هوشمند ذخیره‌سازی	Grid Frequency Control, AI, EMS, Hybrid ESS

۴-۲- حوزه‌های اصلی ثبت اختراع

تحلیل پتنت‌ها نشان می‌دهد که نوآوری‌ها را می‌توان در شش محور اصلی دسته‌بندی کرد:

جدول ۶. حوزه های اصلی ثبت اختراع

حوزه فناوری	سهم نسبی از فعالیت نوآورانه	اهمیت
مواد الکترونی نانوساختار	بسیار زیاد	افزایش ظرفیت و توان
الکترولیت ها	زیاد	افزایش ولتاژ و ایمنی
طراحی سلول و بسته بندی	متوسط	افزایش دوام
سامانه های مدیریت انرژی	زیاد	کنترل عملکرد
سامانه های هیبریدی باتری-ابرخازن	بسیار زیاد	کاربرد در شبکه و خودرو
کاربردهای شبکه قدرت	رو به رشد	تثبیت فرکانس، کیفیت توان

۴-۳- کشورهای پیشرو در ثبت اختراع

تحلیل داده های جهانی نشان می دهد که چین در سال های اخیر به بازیگر غالب در ثبت اختراعات حوزه ذخیره سازی انرژی و ابرخازن تبدیل شده است. پس از آن، ایالات متحده، ژاپن، کره جنوبی و آلمان سهم قابل توجهی از فعالیت های ثبت اختراع را به خود اختصاص داده اند. این توزیع جغرافیایی، همسو با روند کلی نظام بین المللی ثبت اختراع (PCT) است که در آن چین بزرگ ترین متقاضی ثبت اختراع در سال ۲۰۲۵ بوده است [۱۶].

جدول ۷. کشورهای پیشرو در توسعه فناوری ابرخازن

رتبه	کشور	وضعیت نوآوری
۱	چین	پیشتاز در ثبت اختراع و تولید
۲	آمریکا	توسعه مواد و سامانه های کنترل
۳	ژاپن	تولید صنعتی و الکترونیک
۴	کره جنوبی	خودروهای برقی و سامانه های هیبریدی
۵	آلمان	کاربردهای صنعتی و شبکه هوشمند

۴-۴- روند تغییر جهت پتنت ها

تحلیل فناوری نشان می دهد که تمرکز ثبت اختراع از بهبود اجزای منفرد به سمت طراحی سامانه های یکپارچه تغییر یافته است. در نسل جدید پتنت ها، الگوریتم های کنترل، هوش مصنوعی، پیش بینی تولید انرژی تجدیدپذیر، مدیریت شارژ و دشارژ، و یکپارچه سازی ابرخازن با باتری و شبکه هوشمند، بیش از گذشته مورد توجه قرار گرفته اند. این روند بیانگر بلوغ فناوری و حرکت از مرحله توسعه مواد به مرحله توسعه سامانه های کاربردی است.

۴-۵- تحلیل شکاف فناوری

بررسی پتنت های جهانی نشان می دهد که رقابت اصلی در سه حوزه زیر متمرکز است:

- مواد الکترونی نسل جدید (به ویژه MXene و کامپوزیت های دوبعدی)
- سامانه های هیبریدی باتری-ابرخازن
- الگوریتم های هوشمند مدیریت انرژی و کنترل فرکانس

در مقابل، در حوزه‌هایی مانند بومی‌سازی مازول‌های ابرخازنی برای شبکه برق، طراحی سامانه‌های مدیریت انرژی متناسب با شرایط شبکه ایران، توسعه مبدل‌های توان اختصاصی و آزمون‌های میدانی در نیروگاه‌های تجدیدپذیر هنوز فرصت مناسبی برای ورود پژوهشگران و شرکت‌های دانش‌بنیان ایرانی وجود دارد. تحلیل پتنت‌ها نشان می‌دهد که فناوری ابرخازن از مرحله توسعه مواد پایه عبور کرده و اکنون تمرکز جهانی بر سامانه‌های هوشمند، مواد نانوساختار پیشرفته و کاربردهای شبکه قدرت است. حضور پررنگ چین، آمریکا، ژاپن و کره جنوبی در ثبت اختراعات، بیانگر رقابت شدید در این حوزه است. برای ایران، مزیت رقابتی نه در رقابت مستقیم با تولیدکنندگان بزرگ سلول ابرخازنی، بلکه در توسعه سامانه‌های ذخیره‌سازی مبتنی بر ابرخازن، سامانه‌های کنترل و کاربردهای تخصصی صنعت برق نهفته است.

۶- بلوغ فناوری

۶-۱- بلوغ اجزای مختلف فناوری

فناوری مورد بررسی را می‌توان به پنج لایه اصلی تقسیم کرد:

۱. مواد اولیه و نانومواد
۲. سلول ابرخازنی
۳. مازول و بسته ذخیره‌سازی
۴. سامانه مدیریت انرژی و الکترونیک قدرت
۵. کاربرد در شبکه برق

این تفکیک نشان می‌دهد که توسعه فناوری صرفاً به ساخت سلول ابرخازنی محدود نیست و برای دستیابی به یک محصول قابل عرضه، تمامی این لایه‌ها باید به بلوغ مناسبی برسند.

جدول ۸. ارزیابی سطح بلوغ اجزای فناوری

چالش اصلی	وضعیت توسعه	سطح TRL	جزء فناوری
رقابت قیمتی	کاملاً تجاری	۹	کربن فعال
هزینه تولید	تجاری	۸-۹	نانولوله‌های کربنی (CNT)
تولید انبوه با کیفیت یکنواخت	پیش‌تجاری تا تجاری	۷-۸	گرافن
پایداری و هزینه سنتز	آزمایشگاهی تا پایلوت	۵-۷	MXene
رسانایی و دوام سیکلی	پایلوت	۶-۸	اکسیدهای فلزی نانوساختار
افزایش چگالی انرژی	تولید انبوه	۹	سلول ابرخازنی تجاری
مدیریت حرارتی	تجاری	۸-۹	ماژول ابرخازنی
بهینه‌سازی راندمان	کاملاً تجاری	۹	مبدل DC/DC دوطرفه
الگوریتم‌های هوشمند	در حال توسعه	۷-۹	سامانه مدیریت انرژی (EMS)
مدیریت انرژی و هزینه	تجاری محدود	۸-۹	سامانه هیبریدی باتری-ابرخازن
یکپارچه‌سازی با شبکه و استانداردها	پروژه‌های پایلوت و تجاری محدود	۷-۸	کاربرد در تثبیت فرکانس شبکه

۶-۲- ارزیابی بلوغ فناوری مورد نظر این گزارش

موضوع این گزارش صرفاً "ابرخازن" نیست، بلکه سامانه ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر ابرخازن برای تثبیت فرکانس منابع انرژی تجدیدپذیر است. این تمایز اهمیت زیادی دارد، زیرا اگرچه بسیاری از اجزای سامانه به بلوغ صنعتی رسیده‌اند، اما یکپارچه‌سازی آن‌ها برای ارائه خدمات جانبی شبکه همچنان در حال توسعه است. در سطح جهانی، نمونه‌های تجاری از سامانه‌های ابرخازنی برای کاربردهایی مانند مترو، تراموا، جرثقیل‌های صنعتی، UPS و بازیابی انرژی ترمز وجود دارد. همچنین پروژه‌های متعددی در زمینه استفاده از ابرخازن در نیروگاه‌های خورشیدی، بادی و ریزشبکه‌ها اجرا شده است. با این حال، استفاده گسترده از این سامانه‌ها برای تنظیم اولیه فرکانس (Primary Frequency Regulation) و پشتیبانی دینامیکی شبکه‌های با نفوذ بالای انرژی‌های تجدیدپذیر هنوز در حال گسترش است. بر این اساس، می‌توان سطح بلوغ فناوری موضوع این گزارش را در بازه TRL7 تا TRL8 ارزیابی کرد؛ بدین معنا که فناوری در محیط عملیاتی واقعی مورد آزمون قرار گرفته و نمونه‌های صنعتی آن در برخی کشورها به بهره‌برداری رسیده‌اند، اما هنوز ظرفیت قابل توجهی برای توسعه، بومی‌سازی و گسترش بازار وجود دارد [۴، ۱۷].

۶-۳- شکاف فناوری تا تجاری‌سازی در ایران

اگرچه زیرساخت‌های علمی مناسبی در کشور برای سنتز نانومواد، ساخت الکتروود و انجام آزمون‌های الکتروشیمیایی وجود دارد، اما در برخی حلقه‌های زنجیره ارزش همچنان فاصله محسوسی با سطح جهانی مشاهده می‌شود. مهم‌ترین این شکاف‌ها عبارت‌اند از:

- نبود تولید صنعتی سلول‌های ابرخازنی با ظرفیت بالا؛
 - وابستگی به واردات برخی مواد اولیه و تجهیزات ساخت؛
 - محدود بودن توان طراحی و ساخت ماژول‌های توان بالا؛
 - کمبود تجربه در توسعه سامانه‌های مدیریت انرژی ویژه خدمات جانبی شبکه؛
 - نبود پروژه‌های پایلوت در مقیاس شبکه برق کشور برای ارزیابی عملکرد در شرایط واقعی
- رفع این شکاف‌ها مستلزم همکاری میان مراکز پژوهشی، دانشگاه‌ها، شرکت‌های دانش‌بنیان، صنعت برق و نهادهای سیاست‌گذار است.

۶-۴- مسیر ارتقای فناوری در ایران

برای دستیابی به سطح TRL 9 در کشور، مسیر توسعه را می‌توان در چند گام اصلی خلاصه کرد:

۱. توسعه مواد الکتروودی با عملکرد بالا و قابلیت تولید نیمه‌صنعتی؛
۲. طراحی و ساخت سلول‌ها و ماژول‌های ابرخازنی متناسب با نیاز صنعت برق؛
۳. توسعه مبدل‌های توان و سامانه‌های مدیریت انرژی بومی؛
۴. اجرای پروژه‌های پایلوت در نیروگاه‌های خورشیدی، بادی و ریزشبکه‌ها؛
۵. تدوین استانداردهای ملی، ارزیابی عملکرد و ورود به تولید صنعتی.

جدول ۹. نقشه مسیر بلوغ فناوری در ایران

مرحله	TRL	فعالیت کلیدی	خروجی مورد انتظار
تحقیقات پایه	۳-۴	توسعه مواد و الکتروود	نمونه آزمایشگاهی
توسعه فناوری	۵-۶	ساخت سلول و ماژول	نمونه نیمه صنعتی
پایلوت	۷	نصب در نیروگاه یا ریز شبکه	ارزیابی عملکرد میدانی
پیش تجاری	۸	تولید محدود و آزمون بهره برداری	محصول قابل عرضه
تجاری	۹	تولید انبوه و استقرار در شبکه	سامانه تجاری بومی

ارزیابی سطح بلوغ فناوری نشان می دهد که سامانه ذخیره سازی انرژی مبتنی بر ابرخازن برای تثبیت فرکانس از منظر جهانی در مرحله پیش تجاری تا تجاری قرار دارد و بسیاری از اجزای آن، مانند سلول های مبتنی بر کربن فعال، مبدل های توان و سامانه های کنترل، به بلوغ صنعتی رسیده اند. در مقابل، فناوری های نوظهوری مانند الکترودهای مبتنی بر MXene و ابرخازن های حالت جامد هنوز در مراحل پایین تری از بلوغ قرار دارند، اما انتظار می رود نقش مهمی در نسل آینده این سامانه ها ایفا کنند. برای ایران، فرصت اصلی نه در رقابت مستقیم با تولید کنندگان جهانی سلول ابرخازنی، بلکه در بومی سازی سامانه های ذخیره سازی، توسعه الگوریتم های کنترل، طراحی ماژول ها و اجرای پروژه های پایلوت در شبکه برق نهفته است.

۷- بازیگران اصلی فناوری

توسعه سامانه های ذخیره سازی انرژی مبتنی بر ابرخازن حاصل تعامل میان چندین حوزه فناورانه شامل علم مواد، فناوری نانو، الکترونیک قدرت، سیستم های کنترل، شبکه های هوشمند و صنایع انرژی است. برخلاف فناوری هایی مانند باتری های لیتیوم یونی که زنجیره صنعتی آن عمدتاً حول تولید سلول متمرکز است، زنجیره ارزش ابرخازن شامل مجموعه ای از بازیگران در حوزه های مختلف است [۴]:

۱. تولید کنندگان مواد فعال و نانومواد؛
 ۲. سازندگان سلول و ماژول ابرخازنی؛
 ۳. توسعه دهندگان سامانه های ذخیره سازی انرژی؛
 ۴. شرکت های فعال در شبکه برق و انرژی های تجدید پذیر؛
 ۵. مراکز تحقیقاتی و دانشگاه های پیشرو
- تحلیل این زنجیره نشان می دهد که مزیت رقابتی آینده تنها در تولید سلول ابرخازنی نیست، بلکه در یکپارچه سازی سامانه، مدیریت انرژی و ارائه راهکارهای کاربردی برای شبکه برق شکل خواهد گرفت.

۷-۱- شرکت های پیشرو در تولید ابرخازن

جدول ۱۰. مهم ترین شرکت های فعال در حوزه ابرخازن [۱۸، ۱۹]

شرکت	کشور	حوزه فعالیت	فناوری/محصول شاخص
Skeleton Technologies	استونی/آلمان	تولید ابرخازن صنعتی	فناوری Curved Graphene، ماژول های توان بالا

سلول‌های EDLC و کاربردهای خودرو و شبکه	ابرخازن‌های صنعتی	آمریکا	Maxwell Technologies (Tesla)
ابرخازن برای UPS، شبکه و صنایع	تجهیزات مدیریت انرژی	آمریکا	Eaton
کاربردهای الکترونیک و IoT	ابرخازن‌های کوچک و مسطح	استرالیا/انگلستان	CAP-XX
ماژول‌های ذخیره توان	تولید ابرخازن	کره جنوبی/کانادا	Nesscap Energy
حمل و نقل و تجهیزات سنگین	ابرخازن صنعتی	کره جنوبی	LS Mtron
ابرخازن‌های تجاری	قطعات الکترونیکی	ژاپن	Nichicon
سلول‌های ابرخازنی و هیبریدی	تجهیزات ذخیره انرژی	ژاپن	Panasonic
ابرخازن صنعتی	ذخیره‌سازی انرژی	کره جنوبی	Taejin Technology

۷-۲- بازیگران کلیدی، مراکز تحقیقاتی و دانشگاه‌های پیشرو در کاربردهای شبکه برق در کاربرد تثبیت فرکانس، تنها تولیدکننده سلول اهمیت ندارد؛ بلکه شرکت‌هایی که توانایی طراحی سامانه کامل ذخیره‌سازی انرژی را دارند، نقش مهم‌تری ایفا می‌کنند.

جدول ۱۱. بازیگران سامانه‌های ذخیره‌سازی مبتنی بر ابرخازن

بازیگر	حوزه تخصص	نقش در فناوری
Skeleton Technologies	ابرخازن گرافنی	توسعه ماژول‌های توان بالا
Eaton	مدیریت انرژی	یکپارچه‌سازی با شبکه
ABB	تجهیزات قدرت	مبدل‌ها، کنترل و شبکه هوشمند
Siemens	زیرساخت انرژی	سامانه‌های ذخیره‌سازی و اتوماسیون شبکه
Schneider Electric	مدیریت انرژی	راهکارهای شبکه هوشمند
Hitachi Energy	شبکه برق	ذخیره‌سازی و خدمات جانبی شبکه

جدول ۱۲. مراکز علمی پیشرو در توسعه فناوری ابرخازن [۲۰]

مرکز تحقیقاتی	کشور	حوزه فعالیت
Massachusetts Institute of Technology (MIT)	آمریکا	مواد پیشرفته و ذخیره انرژی
Stanford University	آمریکا	گرافن و مواد دوبعدی
National University of Singapore (NUS)	سنگاپور	MXene و الکترودهای نانو ساختار
Tsinghua University	چین	مواد ذخیره‌سازی انرژی
Chinese Academy of Sciences	چین	توسعه مواد و سلول‌های پیشرفته
Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)	کره جنوبی	ابرخازن‌های هیبریدی
University of Manchester	انگلستان	گرافن و مواد دوبعدی

۷-۳- فرصت نقش آفرینی ایران در زنجیره فناوری

با توجه به وضعیت جهانی، ورود ایران به این حوزه از چند مسیر امکان پذیرتر است:

مسیر اول: توسعه مواد نانوساختار

با توجه به ظرفیت پژوهشی کشور در حوزه نانو، امکان توسعه:

- کربن‌های متخلخل پیشرفته
- کامپوزیت‌های گرافنی
- اکسیدهای فلزی نانوساختار
- مواد هیبریدی

وجود دارد.

مسیر دوم: توسعه سامانه‌های کاربردی

با توجه به نیاز صنعت برق کشور، فرصت اصلی می‌تواند توسعه:

- ماژول‌های ابرخازنی برای نیروگاه‌های تجدیدپذیر
- سامانه کنترل تثبیت فرکانس
- EMS بومی
- پروژه‌های پایلوت در نیروگاه‌های خورشیدی

باشد.

مسیر سوم: بومی‌سازی زنجیره یکپارچه

در کوتاه‌مدت، تولید سلول ابرخازنی در مقیاس بزرگ ممکن است اقتصادی نباشد؛ اما توسعه سامانه‌های کاربردی با استفاده از سلول‌های موجود جهانی، می‌تواند مسیر کم‌ریسک‌تری برای ورود شرکت‌های دانش‌بنیان ایرانی باشد. تحلیل بازیگران جهانی نشان می‌دهد که فناوری ابرخازن در مرحله‌ای قرار دارد که رقابت اصلی از تولید صرف سلول به سمت توسعه راهکارهای یکپارچه ذخیره‌سازی انرژی منتقل شده است. کشورهای پیشرو با سرمایه‌گذاری همزمان در مواد پیشرفته، تولید صنعتی و کاربردهای شبکه، زنجیره ارزش این فناوری را توسعه داده‌اند. برای ایران، با توجه به ظرفیت علمی حوزه نانو و نیاز روزافزون صنعت برق به مدیریت نوسانات منابع تجدیدپذیر، مناسب‌ترین راهبرد، تمرکز بر توسعه سامانه‌های ذخیره‌سازی مبتنی بر ابرخازن، کنترل هوشمند انرژی و کاربردهای تثبیت فرکانس است.

۸- جغرافیای فناوری و فرصت ایران

توسعه فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی به‌ویژه ابرخازن‌ها، تحت تأثیر عواملی همچون ظرفیت صنعتی کشورها، دسترسی به مواد اولیه، زیرساخت‌های تحقیق و توسعه، سیاست‌های انرژی، سرمایه‌گذاری خطرپذیر و نیازهای بازار شکل گرفته است. بررسی جغرافیای فناوری نشان می‌دهد که فعالیت‌های نوآورانه در حوزه ابرخازن به‌صورت یکنواخت در جهان توزیع نشده و چند قطب اصلی در آسیا، آمریکای شمالی و اروپا شکل گرفته‌اند.

در حال حاضر، سه منطقه اصلی در زنجیره ارزش جهانی ابرخازن‌ها نقش آفرینی می‌کنند:

۱. شرق آسیا (چین، ژاپن و کره جنوبی): قطب تولید صنعتی و توسعه مواد
۲. آمریکای شمالی: قطب تحقیق و توسعه مواد پیشرفته، نرم‌افزارهای کنترل و کاربردهای نوآورانه

۳. اروپا: قطب توسعه سامانه‌های ذخیره‌سازی پایدار، حمل‌ونقل پاک و شبکه‌های هوشمند

۸-۱- قطب‌های جغرافیایی توسعه فناوری

۸-۱-۱- چین؛ رهبر توسعه صنعتی و ثبت اختراع

چین در سال‌های اخیر به یکی از مهم‌ترین بازیگران زنجیره ارزش ذخیره‌سازی انرژی تبدیل شده است. مزیت اصلی این کشور شامل [۲۱]:

- حجم بالای تولید تجهیزات الکترونیکی؛
 - دسترسی گسترده به زنجیره تأمین مواد اولیه؛
 - سرمایه‌گذاری دولتی در فناوری‌های انرژی پاک؛
 - تعداد بالای پتنت‌ها و مقالات علمی
- تمرکز چین در حوزه ابرخازن شامل موارد زیر است:
- توسعه مواد کربنی پیشرفته؛
 - تولید MXene و مواد دوبعدی؛
 - ساخت سلول و ماژول‌های صنعتی؛
 - استفاده از ابرخازن در حمل‌ونقل ریلی و شبکه‌های هوشمند
- دانشگاه‌ها و شرکت‌های چینی علاوه بر توسعه مواد، به سمت کاربردهای مقیاس بزرگ مانند ذخیره‌سازی شبکه و سیستم‌های هیبریدی حرکت کرده‌اند.

۸-۱-۲- ژاپن؛ پیشگام تولید صنعتی و کیفیت بالا

ژاپن از نخستین کشورهایی است که فناوری ابرخازن را به محصولات صنعتی تبدیل کرد. تمرکز این کشور بیشتر بر [۲۱]:

- افزایش قابلیت اطمینان؛
 - کاهش نرخ تخریب؛
 - کاربردهای صنعتی و خودرویی؛
 - تولید سلول‌های با کیفیت بالا
- شرکت‌های ژاپنی به دلیل سابقه طولانی در صنایع الکترونیک، مواد پیشرفته و تجهیزات قدرت، جایگاه مهمی در بازار جهانی دارند.

۸-۱-۳- کره جنوبی؛ تمرکز بر خودرو و سامانه‌های هیبریدی

کره جنوبی با تکیه بر صنایع باتری، خودرو و الکترونیک قدرت، توسعه ابرخازن را عمدتاً در کاربردهای زیر دنبال می‌کند [۲۱]:

- خودروهای برقی و هیبریدی؛
- سیستم‌های بازیابی انرژی ترمز؛
- سامانه‌های ذخیره توان سریع؛
- ترکیب باتری و ابرخازن

مزیت اصلی کره جنوبی، توانایی یکپارچه‌سازی فناوری ذخیره‌سازی با صنایع بزرگ مصرف‌کننده است.

۸-۱-۴- آمریکا؛ تمرکز بر فناوری‌های پیشرفته و نوآوری

ایالات متحده تمرکز بیشتری بر توسعه فناوری‌های نسل آینده دارد [۲۱]:

- گرافن و مواد دوبعدی؛
 - طراحی مواد با کمک هوش مصنوعی؛
 - الکترودهای پیشرفته؛
 - سامانه‌های مدیریت انرژی هوشمند.
- همچنین بسیاری از استارت‌آپ‌های حوزه ذخیره‌سازی انرژی و دانشگاه‌های پیشرو در این کشور فعالیت می‌کنند.

۸-۱-۵- اروپا؛ تمرکز بر پایداری و شبکه هوشمند

اتحادیه اروپا توسعه ذخیره‌سازی انرژی را در چارچوب گذار انرژی و کاهش انتشار کربن دنبال می‌کند. محورهای اصلی اروپا عبارت‌اند از [۲۱]:

- ذخیره‌سازی برای انرژی‌های تجدیدپذیر؛
 - شبکه‌های هوشمند؛
 - حمل‌ونقل پاک؛
 - کاهش وابستگی به مواد بحرانی.
- اروپا همچنین توجه ویژه‌ای به فناوری‌های پایدار، بازیافت مواد و کاهش اثرات زیست‌محیطی دارد.

جدول ۱۳. مقایسه قطب‌های جهانی فناوری ابرخازن

منطقه	مزیت اصلی	حوزه تمرکز	نقاط قوت	چالش
چین	تولید صنعتی و مقیاس	مواد، سلول، تولید	ظرفیت تولید بالا، پتنت زیاد	رقابت شدید
ژاپن	کیفیت و دوام	سلول صنعتی	تجربه طولانی	هزینه بالا
کره جنوبی	یکپارچه‌سازی صنعتی	خودرو و هیبرید	صنعت باتری قوی	وابستگی به مواد
آمریکا	نوآوری فناورانه	مواد پیشرفته و AI	دانشگاه و سرمایه‌گذاری	هزینه تولید
اروپا	انرژی پاک	شبکه هوشمند	سیاست حمایتی	هزینه انرژی و تولید

۸-۲- وضعیت ایران در زنجیره جهانی فناوری

ایران در حوزه فناوری ابرخازن دارای برخی مزیت‌های علمی و زیرساختی است، اما هنوز در بخش‌های صنعتی و تجاری زنجیره ارزش فاصله قابل توجهی با کشورهای پیشرو دارد. نقاط قوت ایران عبارتند از:

۱. ظرفیت علمی در حوزه فناوری نانو

ایران طی دو دهه گذشته در حوزه‌هایی مانند:

- نانومواد کربنی؛
- اکسیدهای فلزی نانو ساختار؛

- کامپوزیت‌های پیشرفته؛
 - مواد متخلخل؛
- فعالیت‌های پژوهشی گسترده‌ای داشته است. این ظرفیت می‌تواند پایه توسعه مواد الکترونی نسل جدید باشد.

۲. نیاز واقعی صنعت برق

افزایش ظرفیت نیروگاه‌های خورشیدی و بادی در کشور، نیاز به فناوری‌هایی برای:

- تثبیت فرکانس؛
- کاهش نوسانات تولید؛
- افزایش پایداری شبکه؛
- توسعه شبکه هوشمند؛

را افزایش خواهد داد.

این نیاز داخلی می‌تواند به‌عنوان محرک اصلی توسعه فناوری عمل کند.

۳. وجود شرکت‌های دانش‌بنیان

زیست‌بوم شرکت‌های دانش‌بنیان ایران در حوزه:

- مواد پیشرفته؛
 - تجهیزات الکترونیک قدرت؛
 - سامانه‌های کنترل؛
 - انرژی‌های تجدیدپذیر؛
- ظرفیت ورود به بخش‌هایی از زنجیره ارزش را دارد.

۸-۳- فرصت‌های راهبردی ایران

با توجه به شرایط موجود، ورود ایران به فناوری ابرخازن بهتر است به‌صورت مرحله‌ای انجام شود.

مرحله اول: توسعه سامانه کاربردی (کوتاه‌مدت)

تمرکز بر:

- طراحی سامانه تثبیت فرکانس؛
- توسعه EMS بومی؛
- استفاده از سلول‌های موجود جهانی؛
- اجرای پایلوت در نیروگاه خورشیدی.

سطح ریسک: پایین

مرحله دوم: توسعه ماژول و زیرسامانه‌ها (میان‌مدت)

تمرکز بر:

- طراحی بسته‌های ابرخازنی؛
- سیستم مدیریت حرارتی؛
- مبدل‌های قدرت؛
- کنترل هوشمند.

سطح ریسک: متوسط

مرحله سوم: توسعه مواد و سلول بومی (بلندمدت)

تمرکز بر:

- الکترودهای نانوساختار؛
- مواد کربنی پیشرفته؛
- کامپوزیت‌های MXene و گرافنی؛
- تولید سلول داخلی.

سطح ریسک: بالا اما دارای ارزش افزوده بیشتر

با توجه به شرایط کشور، بالاترین احتمال موفقیت در دو حلقه پایانی زنجیره یعنی "ساخت سامانه ذخیره‌سازی" و "کاربرد شبکه‌ای" قرار دارد؛ زیرا این بخش‌ها مستقیماً با نیاز صنعت برق کشور مرتبط هستند و نیازمند سرمایه‌گذاری اولیه کمتر نسبت به تولید سلول هستند. به طور خلاصه، تحلیل جغرافیای فناوری نشان می‌دهد که توسعه ابرخازن‌ها در جهان به سمت ایجاد زنجیره‌های کامل شامل مواد، سلول، ماژول و سامانه‌های هوشمند حرکت کرده است. چین، ژاپن، کره جنوبی، آمریکا و اروپا مهم‌ترین قطب‌های این فناوری محسوب می‌شوند. برای ایران، با توجه به ظرفیت علمی فناوری نانو، نیاز شبکه برق به مدیریت نوسانات منابع تجدیدپذیر و وجود شرکت‌های دانش‌بنیان، فرصت اصلی در توسعه سامانه‌های ذخیره‌سازی مبتنی بر ابرخازن برای کاربردهای شبکه، کنترل هوشمند انرژی و تثبیت فرکانس قرار دارد.

۹- تحلیل بازار و منطق کسب‌وکار

افزایش سهم منابع انرژی تجدیدپذیر در سبد تولید برق، توسعه شبکه‌های هوشمند و افزایش نیاز به انعطاف‌پذیری شبکه، موجب شده است بازار سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی در سال‌های اخیر رشد قابل توجهی داشته باشد. در این میان، اگرچه بخش عمده سرمایه‌گذاری جهانی در حوزه ذخیره‌سازی انرژی به باتری‌های لیتیومی اختصاص یافته است، اما فناوری‌هایی با قابلیت پاسخ سریع مانند ابرخازن‌ها، به دلیل نقش حیاتی در خدمات جانبی شبکه، تثبیت فرکانس و بهبود کیفیت توان، جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده‌اند. بازار هدف سامانه‌های ابرخازنی را می‌توان به دو بخش اصلی تقسیم کرد [۲۲]:

۱. بازار عمومی ذخیره‌سازی انرژی (Energy Storage Market)

۲. بازار خدمات توان سریع و تثبیت شبکه (Fast Power Services Market)

موضوع این گزارش عمدتاً در بخش دوم قرار می‌گیرد؛ یعنی کاربردهایی که نیازمند توان بالا، پاسخ سریع و تعداد چرخه کاری زیاد هستند.

۹-۱- روند رشد بازار جهانی ذخیره‌سازی انرژی

بازار جهانی ذخیره‌سازی انرژی در دهه اخیر رشد چشمگیری داشته است. عوامل اصلی این رشد عبارت‌اند از:

- افزایش ظرفیت نصب‌شده انرژی خورشیدی و بادی؛
- کاهش هزینه فناوری‌های ذخیره‌سازی؛
- توسعه شبکه‌های هوشمند؛
- افزایش نیاز به انعطاف‌پذیری شبکه؛
- سیاست‌های حمایتی برای کاهش انتشار کربن .

در میان فناوری‌های ذخیره‌سازی، باتری‌های لیتیوم‌یونی بیشترین سهم بازار را دارند؛ با این حال، محدودیت‌هایی مانند کاهش عمر در سیکل‌های زیاد، حساسیت حرارتی و زمان پاسخ محدود، باعث شده است فناوری‌هایی مانند ابرخازن‌ها در کاربردهای خاص رشد کنند. برخلاف باتری‌ها که برای ذخیره انرژی طولانی‌مدت طراحی شده‌اند، ارزش اقتصادی ابرخازن بیشتر از طریق ارائه خدمات شبکه ایجاد می‌شود. مهم‌ترین بازارهای کاربردی عبارت‌اند از:

۱. تثبیت فرکانس شبکه (Frequency Regulation)

این کاربرد مهم‌ترین بازار هدف فناوری مورد بررسی است. با افزایش منابع تجدیدپذیر، تغییرات لحظه‌ای توان تولیدی افزایش یافته و اپراتورهای شبکه نیازمند منابعی هستند که بتوانند در مدت کوتاه:

- توان تزریق کنند؛
 - توان اضافی جذب کنند؛
 - نوسانات فرکانس را کاهش دهند.
- ابرخازن‌ها به دلیل زمان پاسخ بسیار کوتاه، گزینه مناسبی برای این بازار هستند.

۲. نیروگاه‌های خورشیدی و بادی

در نیروگاه‌های تجدیدپذیر، ابرخازن می‌تواند:

- نوسانات سریع تولید را کاهش دهد؛
- خروجی نیروگاه را هموار کند؛
- قابلیت اتصال به شبکه را افزایش دهد

۳. ریزشبکه‌ها (Microgrids)

با توسعه تولید پراکنده، نیاز به ذخیره‌سازی سریع در ریزشبکه‌ها افزایش یافته است. کاربردها:

- تثبیت ولتاژ؛
- مدیریت بار؛
- افزایش تاب‌آوری انرژی

۴. صنایع با بارهای پالسی

صنایعی مانند:

- فولاد؛
- جرثقیل‌های صنعتی؛
- راه‌آهن برقی؛
- تجهیزات با جریان هجومی بالا؛

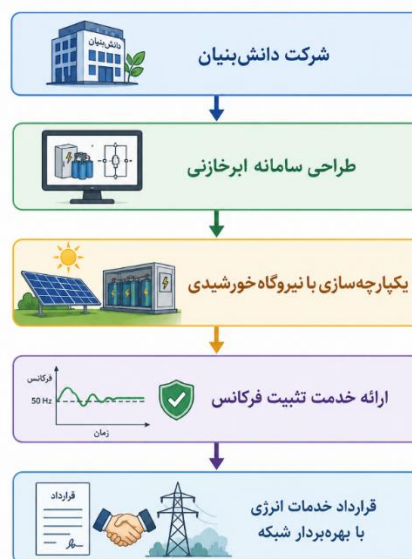
نیازمند توان سریع هستند که ابرخازن می‌تواند تأمین کند.

۹-۲- مدل کسب‌وکار پیشنهادی برای ایران

برای توسعه این فناوری در ایران، مدل کسب‌وکار صرفاً فروش یک تجهیز ذخیره‌سازی نیست، بلکه باید به سمت ارائه راهکار انرژی (Energy Solution) حرکت کند. مدل پیشنهادی و مشتریان بالقوه سامانه در شکل ۲ و جدول ۱۴ نشان داده شده است.

جدول ۱۴. مشتریان بالقوه سامانه ابرخازنی

مشتری	نیاز اصلی	کاربرد
نیروگاه‌های خورشیدی بزرگ	کاهش نوسانات تولید	تثبیت توان خروجی
شرکت مدیریت شبکه برق ایران	حفظ فرکانس	خدمات جانبی شبکه
نیروگاه‌های بادی	جبران تغییرات سریع توان	کنترل فرکانس
شهرک‌های صنعتی	کیفیت توان	کاهش نوسانات بار
ریز شبکه‌ها	افزایش تاب‌آوری	مدیریت انرژی
صنایع ریلی	توان لحظه‌ای	بازیابی انرژی



شکل ۲. مدل کسب‌وکار پیشنهادی برای ایران

۹-۳- عوامل مؤثر بر توجیه اقتصادی

مزایای اقتصادی ابرخازن عبارتند از:

۱. کاهش هزینه‌های ناشی از ناپایداری شبکه

نوسانات فرکانس می‌تواند باعث:

- قطع تجهیزات حساس؛
- کاهش راندمان تولید؛
- خاموشی‌های ناخواسته؛

شود. استفاده از ذخیره‌ساز سریع می‌تواند این هزینه‌ها را کاهش دهد.

۲. افزایش ارزش نیروگاه‌های تجدیدپذیر

ذخیره‌ساز می‌تواند موجب:

- افزایش قابلیت پیش‌بینی تولید؛
- کاهش محدودیت اتصال به شبکه؛
- افزایش ارزش اقتصادی برق تولیدی؛

شود.

۳. کاهش استهلاک باتری در سامانه‌های هیبریدی

در سامانه‌های ترکیبی:

- ابرخازن = پاسخ سریع
- باتری = تأمین انرژی طولانی

این ترکیب موجب افزایش عمر باتری و کاهش هزینه بهره‌برداری می‌شود.

چالش‌های اقتصادی توسعه فناوری در جدول ۱۵ نشان داده شده است:

جدول ۱۵. چالش‌های توسعه فناوریانه ابرخازن

چالش	اثر
هزینه اولیه بالاتر نسبت به باتری	کاهش جذابیت سرمایه‌گذاری اولیه
نبود بازار خدمات جانبی در ایران	عدم شکل‌گیری مدل درآمدی
وابستگی مواد اولیه پیشرفته	افزایش هزینه تولید
نبود پروژه پایلوت	افزایش ریسک سرمایه‌گذاری

با توجه به برنامه توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر کشور، افزایش ظرفیت نیروگاه‌های خورشیدی و نیاز به افزایش انعطاف‌پذیری شبکه، انتظار می‌رود تقاضا برای سامانه‌های ذخیره‌سازی سریع در سال‌های آینده افزایش یابد. در شرایط فعلی، مناسب‌ترین بازار اولیه برای شرکت‌های ایرانی عبارت است از:

۱. نیروگاه‌های خورشیدی متوسط و بزرگ؛

۲. ریزشک‌های صنعتی؛

۳. کاربردهای کیفیت توان؛

۴. پروژه‌های تحقیقاتی-نمایشی صنعت برق

تحلیل بازار نشان می‌دهد که ابرخازن‌ها اگرچه از نظر چگالی انرژی توان رقابت مستقیم با باتری‌ها ندارند، اما در بازارهایی که سرعت پاسخ، تعداد سیکل زیاد و قابلیت اطمینان بالا اهمیت دارد، مزیت اقتصادی قابل توجهی دارند. برای ایران، توسعه این فناوری باید با تمرکز بر کاربردهای شبکه برق، تثبیت فرکانس منابع تجدیدپذیر و ارائه راهکارهای یکپارچه ذخیره‌سازی انرژی دنبال شود. در کوتاه‌مدت، توسعه سامانه‌های کاربردی و ماژول‌های بومی نسبت به تولید کامل سلول، مسیر اقتصادی‌تر و کم‌ریسک‌تری خواهد بود.

۱۰- تحلیل محیط کلان توسعه فناوری بر اساس چارچوب PESTEL

توسعه فناوری‌های نوین ذخیره‌سازی انرژی، به‌ویژه سامانه‌های مبتنی بر ابرخازن، در تعامل مستقیم با شرایط محیطی، اقتصادی و سیاست‌گذاری هر کشور قرار دارد. برخلاف بسیاری از فناوری‌های صرفاً صنعتی، ذخیره‌سازی انرژی به دلیل ارتباط مستقیم با امنیت انرژی، پایداری شبکه برق، توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر و کاهش انتشار آلاینده‌ها، تحت تأثیر عوامل کلان متعددی است. چارچوب PESTEL یکی از ابزارهای متداول تحلیل محیط کلان است که عوامل مؤثر بر توسعه فناوری را در شش دسته زیر بررسی می‌کند [۲۳]:

- P (Political): عوامل سیاسی و سیاست‌گذاری
- E (Economic): عوامل اقتصادی
- S (Social): عوامل اجتماعی
- T (Technological): عوامل فناورانه
- E (Environmental): عوامل زیست‌محیطی
- L (Legal): عوامل قانونی و مقرراتی

۱۰-۱- تحلیل عوامل سیاسی (Political)

سیاست‌های انرژی و برنامه‌های توسعه شبکه برق، مهم‌ترین عامل سیاسی مؤثر بر توسعه فناوری ذخیره‌سازی هستند. عوامل مؤثر شامل موارد ذیل است [۴]:

۱. سیاست توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر

افزایش ظرفیت نیروگاه‌های خورشیدی و بادی، نیاز به فناوری‌هایی برای مدیریت نوسانات تولید ایجاد می‌کند. در کشورهایی که توسعه تجدیدپذیرها با سرعت بالا انجام شده است، بازار ذخیره‌سازی انرژی نیز رشد قابل توجهی داشته است.

۲. سیاست‌های افزایش تاب‌آوری شبکه برق

وابستگی روزافزون جوامع به برق پایدار، موجب شده است دولت‌ها سرمایه‌گذاری در فناوری‌های:

- ذخیره‌سازی انرژی؛
- شبکه هوشمند؛

- مدیریت بار؛

را در اولویت قرار دهند.

۳. حمایت از فناوری‌های راهبردی

بسیاری از کشورها توسعه فناوری ذخیره‌سازی را به‌عنوان یک فناوری راهبردی در حوزه امنیت انرژی دنبال می‌کنند.

۱۰-۲- تحلیل عوامل اقتصادی (Economic)

عامل اقتصادی مهم‌ترین تعیین‌کننده تجاری‌سازی فناوری است. فرصت‌های اقتصادی شامل موارد ذیل است [۴]:

۱. رشد بازار ذخیره‌سازی انرژی

افزایش سهم منابع متغیر مانند خورشیدی و بادی، بازار جهانی ذخیره‌سازی را توسعه داده است.

۲. کاهش هزینه فناوری

پیشرفت در:

- مواد کربنی؛
- روش‌های ساخت الکتروود؛
- تولید انبوه؛

باعث کاهش تدریجی هزینه ابرخازن‌ها شده است.

۳. ارزش اقتصادی خدمات شبکه

در بسیاری از کشورها، اپراتورهای شبکه برای خدماتی مانند:

- تنظیم فرکانس؛
- کنترل توان لحظه‌ای؛
- پشتیبانی شبکه؛

بازار مالی ایجاد کرده‌اند.

۱۰-۳- تحلیل عوامل اجتماعی (Social)

اگرچه فناوری ابرخازن یک فناوری صنعتی است، اما روندهای اجتماعی نیز بر توسعه آن اثرگذارند. عوامل مهم شامل موارد ذیل است [۴]:

۱. افزایش حساسیت جامعه نسبت به امنیت انرژی

قطعی برق و کاهش کیفیت توان، اهمیت فناوری‌های افزایش‌دهنده پایداری شبکه را افزایش داده است.

۲. پذیرش انرژی‌های پاک

افزایش توجه عمومی به کاهش آلاینده‌ها و انرژی پاک، توسعه منابع تجدیدپذیر و در نتیجه نیاز به ذخیره‌سازی را تقویت می‌کند.

۳. توسعه صنایع دیجیتال

گسترش مراکز داده، تجهیزات هوشمند و صنایع حساس، نیاز به برق با کیفیت بالا را افزایش داده است.

۱۰-۴- تحلیل عوامل فناورانه (Technological)

این بخش مهم‌ترین عامل در توسعه ابرخازن‌ها است. روندهای فناورانه مؤثر عبارتند از [۴]:

۱. توسعه نانومواد

مهم‌ترین مسیرهای تحقیقاتی:

- گرافن؛
- CNT؛
- MXene؛
- اکسیدهای فلزی نانوساختار؛
- کامپوزیت‌های هیبریدی

هدف این تحقیقات افزایش ظرفیت ویژه، کاهش مقاومت داخلی، و افزایش طول عمر است.

۲. توسعه سامانه‌های هیبریدی

ترکیب باتری + ابرخازن باعث ایجاد تعادل بین:

- چگالی انرژی بالا؛
- توان خروجی بالا؛
- عمر طولانی؛

می‌شود.

۳. هوشمندسازی سامانه‌های ذخیره‌سازی

استفاده از:

- هوش مصنوعی؛
- الگوریتم‌های پیش‌بینی؛
- مدیریت انرژی هوشمند؛

نسل آینده سیستم‌های ذخیره‌سازی را شکل خواهد داد.

۱۰-۵- تحلیل عوامل زیست‌محیطی (Environmental)

فشارهای زیست‌محیطی یکی از محرک‌های اصلی توسعه ذخیره‌سازی انرژی هستند. اثرات مثبت فناوری ابرخازن عبارتند از [۴]:

- افزایش بهره‌وری شبکه برق؛
- تسهیل توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر؛
- کاهش نیاز به نیروگاه‌های پشتیبان فسیلی؛
- کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای .

۱۰-۶- تحلیل عوامل قانونی (Legal)

چارچوب قانونی نقش تعیین کننده‌ای در ایجاد بازار دارد. مهم‌ترین عوامل عبارتند از [۴]:

۱. استانداردهای ذخیره‌سازی انرژی

نیاز به استانداردهای مشخص در زمینه:

- ایمنی؛
- عملکرد؛
- اتصال به شبکه؛
- آزمون‌های دوام؛

وجود دارد.

۲. قوانین بازار برق

ایجاد بازار خدمات جانبی مانند:

- تنظیم فرکانس؛
- رزرو چرخان؛
- پشتیبانی ولتاژ؛

برای اقتصادی شدن پروژه‌ها ضروری است.

۳. مالکیت فکری

در حوزه‌هایی مانند:

- مواد نانوساختار؛
- طراحی سلول؛
- کنترل هوشمند؛

حفاظت از دانش فنی اهمیت زیادی دارد.

جمع‌بندی تحلیل PESTEL در جدول ۱۶ آمده است. تحلیل PESTEL نشان می‌دهد که توسعه فناوری ابرخازن تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل هم‌افزا قرار دارد. مهم‌ترین محرک جهانی این فناوری، افزایش نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر و نیاز به شبکه‌های برق انعطاف‌پذیر است. در ایران نیز توسعه این فناوری بیش از هر چیز به سیاست‌های توسعه تجدیدپذیرها، ایجاد بازار خدمات جانبی شبکه، حمایت از شرکت‌های دانش‌بنیان و اجرای پروژه‌های پایلوت صنعتی وابسته خواهد بود.

جدول ۱۶. خلاصه تحلیل محیط کلان توسعه فناوری

عامل	فرصت	تهدید
سیاسی	حمایت از انرژی پاک و شبکه هوشمند	عدم ثبات سیاست‌ها
اقتصادی	رشد بازار ذخیره‌سازی	هزینه اولیه بالا
اجتماعی	نیاز به برق پایدار	نبود آگاهی کافی
فناورانه	پیشرفت نانومواد و AI	فاصله فناوری داخلی

زیست‌محیطی	کاهش آلاینده‌گی	چالش بازیافت
قانونی	امکان ایجاد بازار خدمات شبکه	نبود مقررات مشخص

۱۱- ظرفیت زیست‌بوم فناوری نانو ایران، فرصت شرکت‌های دانش‌بنیان و پیشنهادهای اجرایی

توسعه فناوری‌های پیشرفته ذخیره‌سازی انرژی نیازمند یک زنجیره ارزش چندلایه شامل توسعه مواد، ساخت اجزای ذخیره‌ساز، طراحی سامانه‌های کنترل و در نهایت استقرار در کاربردهای صنعتی است. ایران طی سال‌های اخیر با ایجاد زیرساخت‌های علمی و صنعتی در حوزه فناوری نانو، توسعه شرکت‌های دانش‌بنیان و شکل‌گیری مراکز تحقیقاتی تخصصی، ظرفیت مناسبی برای ورود به برخی حلقه‌های این زنجیره ایجاد کرده است. با این حال، تجربه کشورهای پیشرو نشان می‌دهد که موفقیت در حوزه ذخیره‌سازی انرژی صرفاً با تولید مقالات علمی یا توسعه مواد آزمایشگاهی حاصل نمی‌شود، بلکه نیازمند حرکت هماهنگ از دانش، نمونه آزمایشگاهی، محصول و کاربرد صنعتی است. با توجه به نیاز صنعت برق کشور به افزایش انعطاف‌پذیری شبکه و مدیریت نوسانات منابع تجدیدپذیر، فناوری ابرخازن می‌تواند یکی از حوزه‌های دارای اولویت برای اتصال ظرفیت‌های فناوری نانو به نیازهای واقعی صنعت برق باشد [۴].

۱-۱۱- ظرفیت‌های علمی و فناورانه ایران در حوزه نانو و ذخیره‌سازی انرژی

۱- توانمندی در توسعه نانومواد

یکی از مهم‌ترین مزیت‌های ایران، سابقه فعالیت گسترده در حوزه مواد پیشرفته و فناوری نانو است. ظرفیت‌های موجود شامل:

- سنتز نانو ساختارهای کربنی؛
- تولید نانوذرات اکسیدهای فلزی؛
- توسعه کامپوزیت‌های نانویی؛
- اصلاح سطح و مهندسی مواد؛
- ساخت مواد متخلخل با سطح ویژه بالا

این توانمندی‌ها می‌تواند برای توسعه الکترودهای نسل جدید ابرخازن مورد استفاده قرار گیرد.

۲- ظرفیت دانشگاهی و پژوهشی

دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی کشور در حوزه‌های زیر دارای فعالیت علمی هستند:

- الکتروشیمی و ذخیره‌سازی انرژی؛
- مواد کربنی پیشرفته؛
- نانوکامپوزیت‌ها؛
- باتری‌ها و ابرخازن‌ها؛
- مدل‌سازی و شبیه‌سازی سامانه‌های انرژی

این ظرفیت علمی می‌تواند به‌عنوان پایه توسعه فناوری مورد استفاده قرار گیرد.

۳- ظرفیت صنعت برق و زیرساخت‌های آزمایشی

وجود زیرساخت‌های صنعت برق کشور، شامل:

- نیروگاه‌های خورشیدی و بادی؛
- مراکز تحقیقاتی صنعت برق؛
- آزمایشگاه‌های قدرت؛
- شبکه‌های توزیع و انتقال؛

یک مزیت مهم برای اجرای پروژه‌های پایلوت و ارزیابی عملکرد سامانه‌های ذخیره‌سازی محسوب می‌شود.

۱۱-۲- جایگاه ایران در زنجیره ارزش فناوری ابرخازن

زنجیره ارزش فناوری را می‌توان به پنج بخش اصلی تقسیم کرد:

جدول ۱۷- زنجیره ارزش فناوری ابرخازن

حلقه زنجیره ارزش	وضعیت ایران	فرصت توسعه
مواد اولیه و نانومواد	مناسب	بالا
ساخت الکترو	متوسط	بالا
تولید سلول ابرخازنی	محدود	متوسط تا بلندمدت
ساخت ماژول و سامانه ذخیره‌سازی	قابل دستیابی	بسیار بالا
کاربرد شبکه‌ای و EMS	نیازمند توسعه	بسیار بالا

بررسی وضعیت کشور نشان می‌دهد که ورود مستقیم به تولید انبوه سلول ابرخازنی در کوتاه‌مدت با چالش‌هایی مانند:

- سرمایه‌گذاری بالا؛
- تجهیزات تخصصی؛
- رقابت با تولیدکنندگان آسیایی؛
- دسترسی به زنجیره تأمین؛

مواجهه است. در مقابل، توسعه سامانه‌های کاربردی مبتنی بر سلول‌های موجود جهانی می‌تواند مسیر سریع‌تر و اقتصادی‌تری برای ایجاد محصول داخلی باشد.

۱۱-۳- فرصت‌های پیش‌روی شرکت‌های دانش‌بنیان

فرصت اول: توسعه سامانه ذخیره‌سازی سریع برای نیروگاه‌های تجدیدپذیر

محصول پیشنهادی:

سامانه ابرخازنی تثبیت فرکانس و هموارسازی توان خروجی نیروگاه خورشیدی

مشتری:

- نیروگاه‌های خورشیدی بزرگ؛
- شرکت‌های بهره‌بردار انرژی تجدیدپذیر؛

- شرکت مدیریت شبکه برق

مزیت:

ورود به یک نیاز واقعی صنعت بدون وابستگی به تولید سلول.

فرصت دوم: توسعه ماژول‌های ابرخازنی بومی

شرکت‌های داخلی می‌توانند روی:

- طراحی پک ابرخازنی؛
- سیستم مدیریت باتری/ابرخازن (BMS/EMS)؛
- مدیریت حرارتی؛
- حفاظت الکتریکی؛

تمرکز کنند.

این بخش دارای ارزش افزوده بالاتر و ریسک کمتر نسبت به ساخت سلول است.

فرصت سوم: توسعه مواد الکترودی نانوساختار

شرکت‌های فعال حوزه نانو می‌توانند روی:

- کربن‌های فعال اصلاح‌شده؛
 - گرافن و کامپوزیت‌های گرافنی؛
 - MXene؛
 - مواد هیبریدی کربن-اکسید فلزی؛
- فعالیت کنند. هدف اصلی باید حرکت از مقیاس آزمایشگاهی به تولید نیمه‌صنعتی باشد.

فرصت چهارم: توسعه نرم‌افزار مدیریت انرژی

با توجه به رشد شبکه‌های هوشمند، حوزه نرم‌افزاری نیز فرصت مهمی است:

- پیش‌بینی نوسانات تولید خورشیدی؛
- الگوریتم کنترل شارژ و دشارژ؛
- بهینه‌سازی عملکرد ذخیره‌ساز؛
- اتصال به سیستم مدیریت نیروگاه

۱۱-۵- پیشنهاد مدل همکاری میان صنعت، دانشگاه و شرکت دانش‌بنیان

مدل پیشنهادی توسعه فناوری در شکل ۳ خلاصه شده است.



شکل ۳. مدل همکاری میان صنعت، دانشگاه و شرکت دانش بنیان

۱۱-۶- پیشنهادها برای توسعه فناوری در ایران

پیشنهاد ۱: تعریف پروژه ملی پایلوت

اجرای یک پروژه نمونه: "طراحی و توسعه سامانه ذخیره‌سازی مبتنی بر ابرخازن برای تثبیت فرکانس نیروگاه خورشیدی"
اهداف:

- ارزیابی عملکرد واقعی؛
- ایجاد دانش طراحی سیستم؛
- کاهش ریسک تجاری‌سازی

پیشنهاد ۲: ایجاد زنجیره تأمین داخلی

حمایت از شرکت‌ها در حوزه:

- مواد فعال؛
- الکترونیک؛
- ماژول؛
- الکترونیک قدرت؛
- کنترل هوشمند.

پیشنهاد ۳: ایجاد آزمایشگاه ارزیابی عملکرد

تجهیز آزمایشگاه برای آزمون:

- ظرفیت و انرژی ذخیره‌شده؛
- توان لحظه‌ای؛
- عمر سیکلی؛
- رفتار حرارتی؛
- عملکرد در شرایط شبکه

پیشنهاد ۴: اتصال به برنامه توسعه تجدیدپذیر کشور

سامانه‌های ذخیره‌سازی باید به‌عنوان یکی از اجزای مکمل توسعه نیروگاه‌های خورشیدی و بادی در نظر گرفته شوند. ایران در حوزه فناوری ابرخازن دارای ظرفیت علمی مناسب، به‌ویژه در زمینه فناوری نانو و مواد پیشرفته، است؛ اما فاصله اصلی کشور با کشورهای پیشرو در بخش‌های صنعتی مانند تولید سلول، طراحی مازول و استقرار سامانه‌های تجاری قرار دارد. با توجه به نیاز صنعت برق کشور، بهترین راهبرد کوتاه‌مدت برای شرکت‌های دانش‌بنیان، تمرکز بر توسعه سامانه‌های ذخیره‌سازی، کنترل هوشمند انرژی و کاربردهای شبکه‌ای است. در میان‌مدت نیز می‌توان با تقویت زنجیره مواد و ساخت الکترو، به سمت توسعه بخش‌های عمیق‌تر فناوری حرکت کرد.

۱۲- تحلیل SWOT فناوری سامانه ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر ابرخازن برای تثبیت فرکانس منابع

انرژی تجدیدپذیر

تحلیل SWOT یکی از ابزارهای راهبردی برای ارزیابی موقعیت یک فناوری در مسیر توسعه و تجاری‌سازی است. این روش با بررسی چهار مؤلفه اصلی شامل [۲۴]:

- نقاط قوت (Strengths)
- نقاط ضعف (Weaknesses)
- فرصت‌ها (Opportunities)
- تهدیدها (Threats)

امکان تدوین راهبرد مناسب برای توسعه فناوری را فراهم می‌کند. در فناوری سامانه‌های ذخیره‌سازی مبتنی بر ابرخازن، تحلیل SWOT باید علاوه بر ویژگی‌های ذاتی فناوری، شرایط بومی کشور، وضعیت صنعت برق، ظرفیت شرکت‌های دانش‌بنیان و روندهای جهانی بازار را نیز در نظر بگیرد [۲۴]. هر چهار مؤلفه در جداول ۱۸ تا ۲۱ خلاصه شده است.

جدول ۱۸. نقاط قوت فناوری ابرخازن

ردیف	نقطه قوت	توضیح
۱	پاسخ‌دهی بسیار سریع	قابلیت تأمین یا جذب توان در بازه میلی‌ثانیه تا ثانیه، مناسب برای کنترل فرکانس
۲	طول عمر سیکلی بالا	قابلیت انجام صدها هزار تا میلیون‌ها چرخه شارژ و دشارژ
۳	راندمان بالا	تلفات پایین در فرآیند شارژ و دشارژ

۴	توان ویژه بالا	مناسب برای کاربردهای توان لحظه‌ای و خدمات جانبی شبکه
۵	عملکرد پایدار در دماهای مختلف	نسبت به بسیاری از باتری‌ها حساسیت کمتر به سیکل‌های سریع دارد
۶	قابلیت ترکیب با باتری‌ها	امکان ایجاد سامانه هیبریدی برای افزایش عمر باتری
۷	سازگاری با انرژی‌های تجدیدپذیر	مناسب برای جبران نوسانات سریع خورشیدی و بادی
۸	ظرفیت علمی داخلی در فناوری نانو	امکان توسعه مواد الکترونی پیشرفته در کشور

جدول ۱۹. نقاط ضعف فناوری

ردیف	ضعف	توضیح	ضعف
۱	چگالی انرژی پایین‌تر نسبت به باتری	مناسب نبودن برای ذخیره‌سازی طولانی‌مدت	چگالی انرژی پایین‌تر نسبت به باتری
۲	هزینه اولیه بالا	هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بیشتر نسبت به برخی گزینه‌ها	هزینه اولیه بالا
۳	وابستگی به مواد پیشرفته	برخی مواد مانند MXene و گرافن هنوز هزینه تولید بالایی دارند	وابستگی به مواد پیشرفته
۴	محدودیت تولید داخلی سلول	نبود زنجیره صنعتی کامل در کشور	محدودیت تولید داخلی سلول
۵	نبود تجربه کافی در کاربرد شبکه‌ای	کمبود پروژه‌های پایلوت در مقیاس واقعی	نبود تجربه کافی در کاربرد شبکه‌ای
۶	نبود مدل اقتصادی مشخص	نبود بازار رسمی خدمات جانبی شبکه در ایران	نبود مدل اقتصادی مشخص

جدول ۲۰. فرصت‌های توسعه فناوری

ردیف	فرصت	تحلیل
۱	رشد سریع نیروگاه‌های خورشیدی و بادی	افزایش نیاز به مدیریت نوسانات تولید
۲	توسعه شبکه هوشمند	ایجاد بازار جدید برای ذخیره‌سازی سریع
۳	نیاز صنعت برق به افزایش تاب‌آوری	افزایش تقاضا برای فناوری‌های انعطاف‌پذیر
۴	ظرفیت بالای فناوری نانو ایران	امکان توسعه مواد الکترونی بومی
۵	فعالیت شرکت‌های دانش‌بنیان	امکان توسعه محصول و تجاری‌سازی
۶	امکان استفاده در صنایع مختلف	کاربرد در حمل‌ونقل، صنایع و ریزشبکه‌ها
۷	کاهش هزینه فناوری در آینده	افزایش رقابت‌پذیری اقتصادی

جدول ۲۱. تهدیدهای توسعه فناوری

ردیف	تهدید	تحلیل
۱	رقابت شدید با باتری‌های لیتیومی	بخش بزرگی از سرمایه‌گذاری جهانی به باتری اختصاص یافته است
۲	سلطه شرکت‌های آسیایی	چین، ژاپن و کره جنوبی زنجیره صنعتی قدرتمندی دارند
۳	وابستگی به واردات تجهیزات	محدودیت در تأمین برخی مواد و تجهیزات
۴	نبود بازار داخلی ذخیره‌سازی	کاهش انگیزه سرمایه‌گذاری بخش خصوصی
۵	سرعت بالای توسعه فناوری‌های جایگزین	احتمال تغییر مسیر بازار
۶	ریسک تجاری‌سازی مواد جدید	فاصله بین آزمایشگاه و تولید صنعتی

بر اساس تحلیل SWOT، موقعیت فعلی ایران را می‌توان در ناحیه زیر تعریف کرد:

"فناوری دارای فرصت رشد بالا، اما نیازمند توسعه زنجیره صنعتی و ایجاد بازار اولیه". به بیان دیگر، ایران نباید در کوتاه‌مدت هدف خود را رقابت با تولیدکنندگان بزرگ جهانی در ساخت سلول ابرخازنی قرار دهد، بلکه باید بر بخش‌هایی تمرکز کند که دارای مزیت نسبی هستند:

- توسعه سامانه ذخیره‌سازی انرژی؛
- طراحی کنترل و مدیریت انرژی؛
- کاربرد در شبکه برق؛
- توسعه مواد نانوساختار با ارزش افزوده بالا.

۱۳- نقشه راه پیشنهادی برای توسعه فناوری در ایران

توسعه سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر ابرخازن برای تثبیت فرکانس منابع انرژی تجدیدپذیر، نیازمند یک رویکرد مرحله‌ای و هدفمند است. بررسی روندهای جهانی نشان می‌دهد که کشورهای پیشرو، توسعه این فناوری را نه صرفاً از طریق تولید یک جزء خاص، بلکه از طریق ایجاد یک زنجیره ارزش کامل شامل:

- توسعه مواد پیشرفته؛
- ساخت اجزای ذخیره‌سازی؛
- طراحی سامانه مدیریت انرژی؛
- اجرای پروژه‌های پایلوت؛
- ایجاد بازار خدمات شبکه؛

دنبال کرده‌اند. با توجه به شرایط ایران، راهبرد پیشنهادی باید بر توسعه تدریجی فناوری، کاهش ریسک سرمایه‌گذاری و تمرکز بر حوزه‌هایی که دارای مزیت داخلی هستند، استوار باشد. بر اساس تحلیل‌های انجام‌شده، پنج اصل کلیدی برای توسعه فناوری پیشنهاد می‌شود:

اصل اول: حرکت از کاربرد به فناوری

برخلاف رویکرد صرفاً پژوهش‌محور، توسعه باید از یک نیاز واقعی صنعت برق آغاز شود. مسیر پیشنهادی در شکل ۴ آمده است.

اصل دوم: تمرکز بر سامانه به جای رقابت مستقیم در تولید سلول

با توجه به رقابت شدید جهانی در تولید سلول ابرخازنی، ورود مستقیم به این حوزه در کوتاه‌مدت دارای ریسک بالایی است. اولویت ایران باید:

- طراحی ماژول؛
- سیستم مدیریت انرژی؛
- مبدل‌های قدرت؛
- کنترل هوشمند؛
- یکپارچه‌سازی با نیروگاه؛

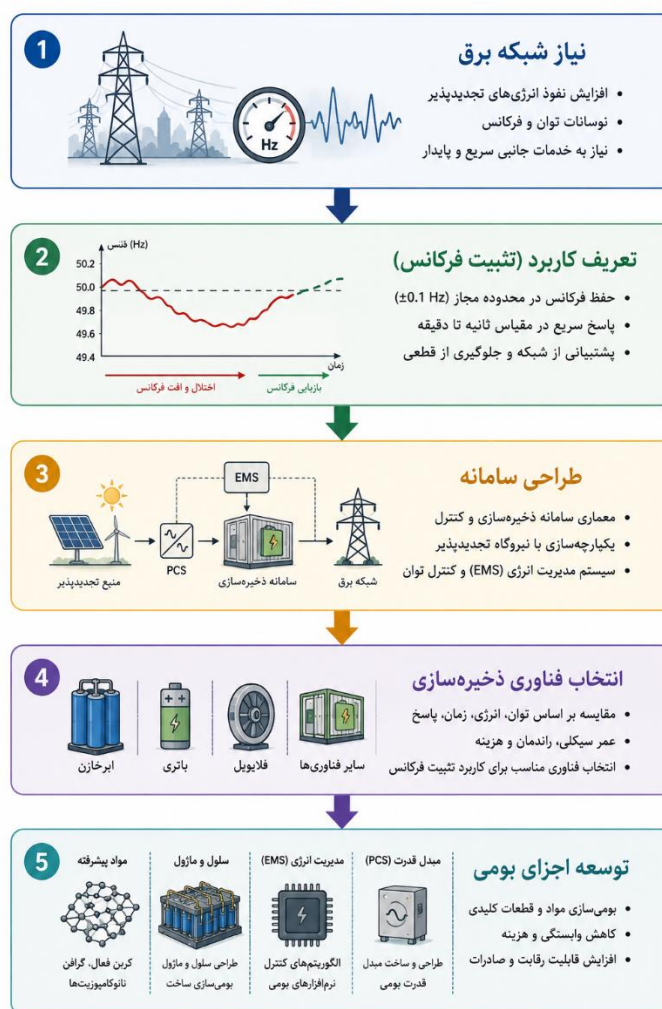
باشد.

اصل سوم: استفاده از ظرفیت فناوری نانو برای توسعه مواد نسل آینده

در میان مدت، کشور می تواند در حوزه هایی مانند:

- کربن های متخلخل پیشرفته؛
- کامپوزیت های گرافنی؛
- مواد هیبریدی؛
- الکترودهای نانو ساختار؛

مزیت ایجاد کند.



شکل ۴. مدل پیشنهادی حرکت از کاربرد به فناوری

نقشه راه زمانی توسعه فناوری و نقش پیشنهادی بازیگران در جدول ۲۲ و ۲۳ آمده است.

جدول ۲۲. برنامه زمان‌بندی توسعه فناوری

بازه زمانی	محور فعالیت	خروجی
سال ۱	مطالعات طراحی و انتخاب فناوری	معماری سامانه
سال ۲	ساخت نمونه اولیه	نمونه آزمایشگاهی/مهندسی
سال ۳	اجرای پایلوت شبکه‌ای	ارزیابی عملکرد واقعی
سال ۴-۵	توسعه محصول	سامانه نیمه‌صنعتی
سال ۵-۱۰	تجاری‌سازی کامل	محصول صنعتی

جدول ۲۳. تقسیم نقش پیشنهادی

بازیگر	نقش پیشنهادی
پژوهشگاه نیرو	تعریف نیاز صنعت، اجرای پایلوت، ارزیابی عملکرد
مرکز تخصصی نوآوری و توسعه فناوری نانو	توسعه فناوری‌های نانویی و حمایت فناورانه
دانشگاه‌ها	تحقیقات مواد و مدل‌سازی
شرکت‌های دانش‌بنیان	ساخت محصول و تجاری‌سازی
وزارت نیرو	ایجاد بازار و سیاست حمایتی
شرکت مدیریت شبکه برق	تعریف الزامات فنی و بهره‌برداری

نقشه راه پیشنهادی نشان می‌دهد که توسعه فناوری ابرخازن در ایران باید به‌صورت مرحله‌ای و با تمرکز بر کاربردهای شبکه برق دنبال شود. در کوتاه‌مدت، ایجاد سامانه‌های کاربردی و اجرای پروژه‌های پایلوت، کم‌ریسک‌ترین مسیر توسعه است. در میان‌مدت، توسعه ماژول‌ها، کنترل هوشمند و اجزای کلیدی امکان ایجاد محصول داخلی را فراهم می‌کند. در بلندمدت نیز می‌توان با بهره‌گیری از ظرفیت فناوری نانو، به سمت توسعه مواد و سلول‌های پیشرفته حرکت کرد. راهبرد اصلی پیشنهادی برای ایران "حرکت از توسعه سامانه کاربردی به سمت مالکیت فناوری و تولید زنجیره ارزش داخلی" است.

۱۴- تحلیل اقتصادی و ارزش‌آفرینی

سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر ابرخازن، اگرچه در مقایسه با باتری‌ها ظرفیت ذخیره انرژی کمتری دارند، اما به دلیل ویژگی‌هایی مانند توان خروجی بالا، زمان پاسخ بسیار کوتاه، عمر سیکلی طولانی و قابلیت عملکرد در شرایط کاری سخت، در کاربردهای خاص شبکه برق دارای ارزش اقتصادی قابل توجهی هستند. ارزش اقتصادی این فناوری عمدتاً از طریق ارائه خدمات توان سریع ایجاد می‌شود، نه صرفاً فروش انرژی ذخیره‌شده. به عبارت دیگر، ابرخازن‌ها یک فناوری "ذخیره انرژی برای مصرف طولانی‌مدت" نیستند، بلکه یک فناوری "افزایش انعطاف‌پذیری و پایداری شبکه" محسوب می‌شوند.

۱۴-۱- منطق اقتصادی استفاده از ابرخازن در شبکه برق

در شبکه‌های سنتی، نیروگاه‌های فسیلی وظیفه مهمی در تنظیم فرکانس و جبران تغییرات لحظه‌ای بار بر عهده دارند. با افزایش سهم نیروگاه‌های خورشیدی و بادی، به دلیل ماهیت متغیر این منابع، نیاز به منابع سریع پاسخ افزایش می‌یابد. ابرخازن‌ها می‌توانند با پاسخ سریع خود، بخشی از این وظیفه را بر عهده گرفته و مزایای اقتصادی زیر را ایجاد کنند:

- کاهش نوسانات فرکانس؛
- کاهش استهلاک تجهیزات نیروگاهی؛
- افزایش قابلیت جذب انرژی تجدیدپذیر؛
- کاهش محدودیت تولید نیروگاه‌های خورشیدی و بادی؛
- افزایش پایداری شبکه.

۱۴-۲- مدل ارزش‌آفرینی برای صنعت برق

ارزش اقتصادی سامانه ابرخازنی را می‌توان در چهار سطح بررسی کرد [۲۵]:

سطح اول: ارزش فنی

دستاوردها:

- بهبود کیفیت توان؛
- کاهش انحراف فرکانس؛
- افزایش پایداری شبکه .

سطح دوم: ارزش اقتصادی مستقیم

کاهش هزینه‌ها:

- کاهش خاموشی‌های ناشی از ناپایداری؛
- کاهش خسارت تجهیزات حساس؛
- کاهش نیاز به نیروگاه‌های رزرو سریع.

سطح سوم: ارزش توسعه انرژی تجدیدپذیر

وجود ذخیره‌ساز سریع باعث می‌شود:

- ظرفیت بیشتری از انرژی خورشیدی و بادی قابل اتصال به شبکه باشد؛
- محدودیت‌های بهره‌برداری کاهش یابد؛
- سرمایه‌گذاری در تجدیدپذیرها جذاب‌تر شود.

سطح چهارم: ارزش فناوریانه و صنعتی

توسعه این فناوری موجب ایجاد:

- شرکت‌های دانش‌بنیان جدید؛
- اشتغال تخصصی؛
- مالکیت فکری؛
- توان صادرات فناوری؛

خواهد شد.

۱۴-۳- مدل کسب و کار پیشنهادی برای شرکت های دانش بنیان

یکی از نکات مهم در تجاری سازی این فناوری، انتخاب مدل درآمدی مناسب است [۲۶].

مدل اول: فروش تجهیزات

شرکت دانش بنیان سامانه ابرخازنی را طراحی و تولید می کند و به نیروگاه یا صنعت می فروشد که درآمد اولیه بالا داشته، ولی نیاز به سرمایه گذاری و بازاریابی دارد.

مدل دوم: ارائه خدمات انرژی (Energy as a Service)

در این مدل شرکت: سامانه را نصب می کند؛ خدمات تثبیت فرکانس ارائه می دهد؛ و بر اساس عملکرد یا صرفه جویی درآمد کسب می کند. مزیت این مدل کاهش هزینه اولیه مشتری و مدل رایج در بازارهای پیشرفته است.

مدل سوم: قرارداد توسعه فناوری با صنعت

این مدل مناسب برای مرحله اولیه شامل اجرای پایلوت؛ دریافت حمایت صنعتی و توسعه محصول است.

۱۴-۴- تحلیل جذابیت سرمایه گذاری فناوری

بر اساس معیارهای زیر می توان جذابیت فناوری را ارزیابی کرد:

جدول ۲۴- ارزیابی جذابیت سرمایه گذاری

معیار	ارزیابی
نیاز بازار	بالا
رشد جهانی فناوری	بالا
پیچیدگی فنی	متوسط تا بالا
ریسک تجاری	متوسط
امکان ورود ایران	مناسب
ارزش افزوده	بالا

۱۴-۵- ارزش آفرینی ویژه برای ایران

با توجه به شرایط کشور، توسعه این فناوری می تواند ارزش های زیر را ایجاد کند:

۱. افزایش تاب آوری شبکه برق

با توجه به افزایش بار شبکه و توسعه منابع تجدیدپذیر، ذخیره سازی سریع می تواند نقش مهمی در پایداری شبکه داشته باشد.

۲. توسعه اقتصاد دانش بنیان

این فناوری بستری برای فعالیت شرکت ها در حوزه:

- مواد پیشرفته؛
- الکترونیک قدرت؛
- نرم افزار انرژی؛
- تجهیزات شبکه؛

ایجاد می‌کند.

۳. ایجاد بازار منطقه‌ای

کشورهای منطقه نیز با رشد انرژی خورشیدی و بادی، به فناوری‌های ذخیره‌سازی سریع نیاز خواهند داشت. تحلیل اقتصادی نشان می‌دهد که ارزش اصلی سامانه‌های ابرخازنی در کاربردهای شبکه برق، ناشی از توانایی ارائه پاسخ سریع و افزایش انعطاف‌پذیری شبکه است، نه ذخیره حجم زیاد انرژی. برای ایران، توسعه این فناوری از منظر اقتصادی زمانی بیشترین توجه را خواهد داشت که با تمرکز بر:

- تثبیت فرکانس منابع تجدیدپذیر؛
- سامانه‌های هیبریدی باتری-ابرخازن؛
- توسعه EMS و کنترل هوشمند؛
- اجرای پروژه‌های پایلوت صنعتی؛

دنبال شود. راهبرد اقتصادی پیشنهادی "توسعه سامانه‌های کاربردی و خدمات انرژی در کوتاه‌مدت، و حرکت تدریجی به سمت مالکیت فناوری سلول و مواد پیشرفته در بلندمدت" است.

۱۵- پیشنهادهای اجرایی

پیشنهاد ۱: تعریف پروژه پایلوت ملی

عنوان پیشنهادی: "طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر ابرخازن برای تثبیت فرکانس نیروگاه‌های تجدیدپذیر"
اهداف:

- ارزیابی عملکرد واقعی فناوری؛
- ایجاد دانش طراحی سامانه؛
- بررسی مدل اقتصادی؛
- کاهش ریسک تجاری‌سازی.

پیشنهاد ۲: ایجاد کنسرسیوم توسعه فناوری

تشکیل یک کنسرسیوم شامل:

- پژوهشگاه نیرو؛
- مرکز تخصصی نوآوری و توسعه فناوری نانو؛
- دانشگاه‌ها؛
- شرکت‌های دانش‌بنیان؛
- بهره‌برداران نیروگاه‌های تجدیدپذیر.

هدف: ایجاد زنجیره کامل از تحقیق تا محصول.

پیشنهاد ۳: تمرکز حمایت‌های فناورانه بر حلقه‌های دارای مزیت داخلی

اولویت حمایت:

اولویت بسیار بالا:

- سیستم مدیریت انرژی (EMS)؛
- طراحی سامانه ذخیره سازی؛
- یکپارچه سازی با شبکه.

اولویت بالا:

- مازول ابرخازنی؛
- الکترونیک قدرت؛
- مدیریت حرارتی.

اولویت بلندمدت:

- مواد الکترونی پیشرفته؛
- تولید سلول داخلی.

پیشنهاد ۴: توسعه استانداردها و زیرساخت ارزیابی

ضروری است زیرساخت های لازم برای آزمون:

- ظرفیت ذخیره انرژی؛
- توان لحظه ای؛
- عمر سیکلی؛
- عملکرد حرارتی؛
- رفتار در شرایط شبکه؛

ایجاد شود.

پیشنهاد ۵: ایجاد بازار اولیه داخلی

برای کاهش ریسک تجاری سازی پیشنهاد می شود:

- استفاده از پروژه های تجدیدپذیر دولتی به عنوان بازار اولیه؛
- تعریف مشوق برای استفاده از ذخیره سازها؛
- ایجاد چارچوب پرداخت خدمات جانبی شبکه.

۱۶- جمع بندی

فناوری سامانه های ذخیره سازی انرژی مبتنی بر ابرخازن، یکی از فناوری های کلیدی برای گذار به شبکه برق آینده و افزایش سهم منابع تجدیدپذیر محسوب می شود. ویژگی های منحصر به فرد این فناوری، به ویژه پاسخ سریع و عمر طولانی، آن را به گزینه ای مناسب برای تثبیت فرکانس و بهبود کیفیت توان تبدیل کرده است. رصد فناوری انجام شده نشان می دهد که اگرچه تولید سلول ابرخازنی در مقیاس جهانی در اختیار کشورهای پیشرو قرار دارد، اما ایران می تواند با تمرکز بر طراحی سامانه،

کنترل هوشمند، کاربردهای شبکه‌ای و بهره‌گیری از ظرفیت فناوری نانو، جایگاه مناسبی در این حوزه ایجاد کند. بنابراین پیشنهاد می‌شود توسعه این فناوری در کشور با رویکرد "کاربردمحوری، توسعه تدریجی زنجیره ارزش، حمایت از شرکت‌های دانش‌بنیان و اجرای پروژه‌های پایلوت صنعتی" پیگیری شود.

۱۷- منابع و مراجع

- [1] Y. Zhu, D. Raimi, E. Joiner, B. Holmes, B.C. Prest, Global energy outlook 2025: Headwinds and tailwinds in the energy transition, Resources for the Future: Washington, DC, USA, (2025).
- [2] U. Akram, M. Nadarajah, R. Shah, F. Milano, A review on rapid responsive energy storage technologies for frequency regulation in modern power systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 120 (2020) 109626.
- [3] D.G. Photovoltaics, E. Storage, IEEE standard for interconnection and interoperability of distributed energy resources with associated electric power systems interfaces, IEEE std, 1547 (2018) 2018.
- [4] X. Luo, J. Wang, M. Dooner, J. Clarke, Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation, Applied energy, 137 (2015) 511–536.
- [5] H. Chen, T.N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, Y. Ding, Progress in electrical energy storage system: A critical review, Progress in natural science, 19 (2009) 291–312.
- [6] P. Simon, Y. Gogotsi, Materials for electrochemical capacitors, Nature materials, 7 (2008) 845–854.
- [7] B. Conway, Electrochemical supercapacitors: Scientific fundamentals and technological applications, New York, NY: Kluwer Academic/Plenum Press, 1999.
- [8] H. Mohamadi, A. Saeedi, Z. Firoozi, S.S. Zangabadi, S. Veisi, Assessment of wind energy potential and economic evaluation of four wind turbine models for the east of Iran, Heliyon, 7 (2021).
- [9] M. Lu, Supercapacitors: materials, systems, and applications, John Wiley & Sons 2013.
- [10] C. BE, Electrochemical Supercapacitors: Scientific fundamentals and technological applications, Kluwer Academic/Plenum Publishers: New York, 1999.
- [11] J. Cao, A. Emadi, A new battery/ultracapacitor hybrid energy storage system for electric, hybrid, and plug-in hybrid electric vehicles, IEEE Transactions on power electronics, 27 (2011) 122–132.
- [12] C. Liu, Z. Yu, D. Neff, A. Zhamu, B.Z. Jang, Graphene-based supercapacitor with an ultrahigh energy density, Nano letters, 10 (2010) 4863–4868.
- [13] F. Schwierz, M. Ziegler, Six decades of research on 2D materials: Progress, dead ends, and new horizons, IEEE Journal of the Electron Devices Society, 10 (2022) 443–451.
- [14] G.R. Bhimanapati, Z. Lin, V. Meunier, Y. Jung, J. Cha, S. Das, D. Xiao, Y. Son, M.S. Strano, V.R. Cooper, Recent advances in two-dimensional materials beyond graphene, ACS nano, 9 (2015) 11509–11539.
- [15] A. Berrueta, A. Ursua, I. San Martin, A. Eftekhari, P. Sanchis, Supercapacitors: electrical characteristics, modeling, applications, and future trends, Ieee Access, 7 (2019) 50869–50896.
- [16] J.K. Emmanuel, F.J. Ngabala, Global energy demand and the role of technological innovation towards renewable energy generation for economic growth and a cleaner environment: A review, Sustainable Environment, 12 (2026) 2633481.
- [17] P.J. Grbovic, Ultra-Capacitors in Power Conversion Systems: applications, analysis, and design from theory to practice, John Wiley & Sons 2013.
- [18] G. Newswire, Tesla completes acquisition of Maxwell Technologies, 2019.
- [19] L. Liu, Y. Feng, W. Wu, Recent progress in printed flexible solid-state supercapacitors for portable and wearable energy storage, Journal of Power Sources, 410 (2019) 69–77.
- [20] S. Chu, A. Majumdar, Opportunities and challenges for a sustainable energy future, nature, 488 (2012) 294–303.
- [21] A.F. Pales, S. Bennett, Energy technology perspectives 2020, International Energy Agency, (2020) 1–400.
- [22] P. Ralon, M. Taylor, A. Ilas, H. Diaz-Bone, K. Kairies, Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030, International Renewable Energy Agency: Abu Dhabi, United Arab Emirates, 164 (2017) 154.
- [23] I. Yüksel, Developing a multi-criteria decision making model for PESTEL analysis, International journal of Business and Management, 7 (2012) 52.
- [24] J. Terrados, G. Almonacid, L. Hontoria, Regional energy planning through SWOT analysis and strategic planning tools.: Impact on renewables development, Renewable and sustainable energy reviews, 11 (2007) 1275–1287.
- [25] M. Beaudin, H. Zareipour, A. Schellenbergglabe, W. Rosehart, Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review, Energy for sustainable development, 14 (2010) 302–314.
- [26] R. Sioshansi, P. Denholm, T. Jenkin, J. Weiss, Estimating the value of electricity storage in PJM: Arbitrage and some welfare effects, Energy economics, 31 (2009) 269–277.