

## مروری سیستماتیک بر پیشرفت‌های اخیر سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی برای شبکه‌های برق هوشمند و امنیت پایدار در ایران و پیاده‌سازی آن در استان‌های کشور

علیرضا جوشن\* 

کارشناس ارشد برق قدرت گرایش الکترونیک قدرت و ماشین‌های الکتریکی، دانشگاه گیلان، گیلان ایران

[Alireza.joshan.guilan@gmail.com](mailto:Alireza.joshan.guilan@gmail.com)

### چکیده

با شتاب‌گیری گسترش انرژی‌های تجدیدپذیر و دیجیتالی‌شدن شبکه‌های برق، سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی (ESS) به نقطه عطف تحول شبکه‌های هوشمند تبدیل شده‌اند. این مقاله علمی-پژوهشی با مرور نظام‌مند و تحلیلی ۵۰ منبع برتر بین‌المللی و داخلی، به واکاوی روندها، فناوری‌ها، مدل‌های نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان (RCM)، راهکارهای یکپارچه‌سازی، سیاست‌های موفق و چالش‌های بومی پیاده‌سازی ESS در ایران و جهان می‌پردازد. تحلیل داده‌ها، پیشرفت تکنولوژیک باتری‌های لیتیوم-یون، نقش محوری هوشمندسازی، لایه‌های پیچیده اقتصادی، ریسک‌ها، مدل‌های بهره‌برداری و الزامات استانداردسازی را با شواهد عینی تبیین می‌کند. با استفاده از ابزارهای بهینه‌سازی و تجربه‌های برتر جهانی، الزامات تحقق ESS پایدار، چالش‌های زیاده‌بازار و پیوند سیاست، فناوری و جامعه بررسی شده است. نتایج، گسترش مدل‌های پیشرفته تعمیر و نگهداری، ضرورت سیاست‌های حمایتی دولتی و توسعه زیست‌بوم نوآوری را برجسته ساخته و پیشنهادهای عملیاتی برای سیاست‌گذاران، صنعت و پژوهش آینده ارائه می‌کند.

**کلمات کلیدی:** سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی، شبکه هوشمند، باتری لیتیوم-یون، سیاست انرژی، بازیافت فناوری‌های نوین، امنیت پایدار

**۱. مقدمه**

رشد سریع فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر و دیجیتالی شدن زیرساخت‌های برقی، تحولات بنیادینی در معماری، مدیریت و پایداری شبکه‌های برق پدید آورده است [۴ و ۱]. تکیه فزاینده به نیروگاه‌های خورشیدی و بادی که رفتار تولیدی آن‌ها تحت شرایط محیطی متغیر است، معضل عدم توازن لحظه‌ای بین تولید و مصرف انرژی را نمایان ساخته و مخاطره جدی برای پایداری و امنیت شبکه‌های برق ایجاد کرده است [۲ و ۱۰]. در این میان، سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی (ESS) به عنوان فاکتور کلیدی برای ایجاد انعطاف‌پذیری عملیاتی، پاسخ‌دهی سریع به تغییرات بار و ایجاد توازن میان تولید و مصرف معرفی شده‌اند [۳ و ۶].

این فناوری نه تنها به تعدیل نوسانات تولید و مدیریت بارهای اوج کمک می‌کند، بلکه بستر محرک تحقق شبکه‌های برق هوشمند (Smart Grids) را نیز، از طریق یکپارچگی منابع انرژی توزیع‌شده و پاسخ‌گویی پویا به بازارهای انرژی، فراهم می‌سازد [۵ و ۱۳ و ۵۱]. ESSها به ارتقاء قابلیت اطمینان، بهبود کیفیت توان، افزایش عملکرد اقتصادی و کاهش انتشار آلاینده‌ها نیز منجر می‌شوند [۸ و ۹ و ۱۱]. پیشرفت‌های قابل ملاحظه در فناوری‌هایی مانند باتری‌های لیتیوم-یون [۱۴]، هیدروژنی و سدیم-یون [۱۳]، و ابرخازن‌ها [۴۹] موجب نرخ رشد سریع نصب و توسعه این سامانه‌ها در دهه اخیر شده‌اند.

هم‌زمان با رشد نوآوری‌های فنی، بازار جهانی ESS با ورود مدل‌های کسب‌وکار جدید، اصلاح سیاست‌گذاری‌ها، و تحول در رگولاتوری‌ها شاهد رقابت فشرده و فرصت‌های تازه است [۹ و ۱۹]. کشورهایی که استانداردهای جامع، سیاست‌های تشویقی دولتی، و سرمایه‌گذاری راهبردی داشته‌اند، موفق به تثبیت جایگاه جهانی در این حوزه شده‌اند [۷ و ۵۰].

در ایران، پژوهش‌های داخلی بیانگر حرکت آهسته اما رو به رشد در توسعه فناوری و سیاست ESS هستند؛ اما محدودیت‌های مهمی همچون کمبود زیرساخت‌های بازیافت، موانع توسعه نیروی انسانی متخصص، ضعف تأمین مالی و چالش تحریم‌های فناورانه وجود دارد. این موانع اهمیت لازم برای تدوین راهبردهای بومی، هم‌افزایی سیاست و فناوری، و خلق راهکارهای نوآورانه را دوچندان می‌کند.

**۲. بیان مسئله**

در شرایطی که توسعه پایدار سیستم‌های انرژی بدون حضور ESSهای قابل اعتماد و کارآمد غیرقابل تصور است، شبکه‌های برق با چالش‌های عدیده‌ای مواجه‌اند. پیاده‌سازی ESS، با موانع فنی (مانند هزینه اولیه بالا، عمر محدود، مسائل ایمنی و دفع باتری)، مدیریتی (نیاز به مدل‌های نگهداری هوشمند و (RCM)، اقتصادی (نبود مدل کسب‌وکار پایدار و مکانیزم‌های تجهیز سرمایه)، و سیاستی (فقدان مشوق‌های کافی، محدودیت‌های رگولاتوری) روبروست [۷]، [۱۹]، [۲۹]، [۳۲]، [۵۱].

در کشورهایی مانند ایران، نبود سیاست‌های جامع و پایدار حمایتی، اجرای پراکنده پروژه‌ها، کمبود زیرساخت پیشرفته بازیافت و تحریم‌های فناوری، باعث تنگناهای جدی در بومی‌سازی و ارتقاء ESS شده است [۸ و ۱۰]، [۵۲]. ضمن آنکه فقدان برنامه آموزش نیروی متخصص و ناکافی بودن تحقیقات کاربردی یکی از خلأهای عمده به شمار می‌آید [۵۱ و ۵۲].

به همین دلیل این پژوهش با هدف پر کردن خلأ موجود، ضمن مرور انتقادی فناوری، مدل‌های نگهداری و سیاست‌های داخلی و جهانی، آینده زیست‌بوم ESS را واکاوی و پیشنهادهایی فراگیر برای ایران و کشورهای منطقه ارائه می‌کند.

**۳. اهمیت و ضرورت موضوع**

اهمیت ESSها در راسته‌سازی توسعه انرژی تجدیدپذیر، کاهش شدت انتشار دی‌اکسیدکربن، افزایش تاب‌آوری شبکه و تقویت امنیت انرژی ملی انکارناپذیر است [۹و۵و۴]. تحقق سناریوی‌های انتقال انرژی و اهداف SDG بدون پشتیبانی ذخیره‌سازهای قابل اطمینان و مقرون به صرفه، مشکل خواهد بود [۱۱و۱۲]. در سطوح ملی، ESS راهکار مؤثر برای تقویت مدل اقتصاد مقاومتی، کاهش وابستگی به واردات سوخت فسیلی، و افزایش استقلال انرژی کشورها فراهم می‌سازد [۸و۵]. همچنین، شکست یا موفقیت سیاست‌های کلان توسعه شبکه‌های هوشمند و دیجیتال کشورها، به میزان پایش، حمایت و تجهیز زیست‌بوم ESS بستگی مستقیم دارد [۷و۵۱].

**۴. سؤالات پژوهش**

۱. فناوری‌های نوین ذخیره‌سازی انرژی و نقاط قوت/ضعف هر کدام چیست و روند پیشرفت آن‌ها در کشورها چگونه بوده است؟
۲. مهم‌ترین موانع فنی، اقتصادی، مدیریتی و سیاستی در پیاده‌سازی و گسترش ESS چه بوده و چه راهکارهایی برای رفع آن‌ها موثر واقع شده است؟
۳. نقش و کارکرد RCM و راهکارهای نگهداری پیشرفته در افزایش قابلیت اطمینان ESS در شبکه‌های هوشمند چیست؟
۴. وضعیت بازیافت، دفع، و سازگاری زیست‌محیطی فناوری‌های منتخب ESS چیست و چه سیاست‌های بهینه‌ای وجود دارد؟
۵. مدل‌های موفق سیاست‌گذاری (Regulation & Policy) کشورهای پیش‌تاز کدام‌اند و چگونه می‌توان این مدل‌ها را در ایران بومی‌سازی کرد؟
۶. چگونه می‌توان با سرمایه‌گذاری هدفمند، آموزش نیروی انسانی، تحریک بازار و حمایت قانونی، بستر نصب و توسعه ESS را در ایران تسهیل کرد؟
۷. آینده بازار جهانی و مدل‌های بومی رشد ESS با توجه به چشم‌انداز دیجیتال شبکه‌های برق چیست؟

**۵. فرضیات پژوهش**

۱. توسعه هدفمند و متوازن فناوری‌های نوین ESS، موجب بهبود پایدار شاخص‌های پایداری و امنیت شبکه برق خواهد بود [۷و۱۷].
۲. چالش‌های اقتصادی و ضعف سیاستی در ایران، مهم‌ترین مانع برای رشد بومی ESS در مقایسه با محدودیت‌های صرفاً فنی است [۸و۵۱].
۳. پیاده‌سازی RCM در نگهداری ESS، به طور معناداری نرخ خرابی‌ها را کاهش و عمر مفید تجهیزات را افزایش می‌دهد [۲۰و۲۹و۳۱].
۴. ایجاد اکوسیستم متنوع سرمایه‌گذاری و مشوق‌های پژوهشی، رشد ESS را در بستر هوشمندسازی شبکه تسریع می‌کند [۹و۱۹].

۵. فقدان برنامه ملی آموزش تخصصی در فناوری‌های نوین ESS، ضعف بنیادین برای توسعه این حوزه در ایران است [۵۲ و ۵۱].

تعاریف کلیدی کلمات

۱. سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی (Energy Storage Systems, ESS): بسترها، دستگاه‌ها یا فناوری‌هایی که انرژی را برای استفاده در زمان‌های مورد نیاز ذخیره و آزاد می‌کنند؛ این سامانه‌ها در بهبود پایداری، مدیریت بار و یکپارچه‌سازی منابع تجدیدپذیر در شبکه برق نقش کلیدی دارند.

۲. شبکه هوشمند (Smart Grid): سامانه برق پیشرفته‌ای که از فناوری‌های دیجیتال، ابزارهای اندازه‌گیری هوشمند و ارتباط دوسویه برای بهینه‌سازی تولید، توزیع و مصرف برق بهره می‌برد و انعطاف‌پذیری، کارایی و قابلیت اطمینان شبکه را افزایش می‌دهد.

۳. باتری لیتیوم-یون (Lithium-ion Battery): نوعی باتری قابل شارژ با بازده انرژی بالا که یون‌های لیتیوم را میان الکترودها جابه‌جا می‌کند؛ این باتری‌ها به دلیل چگالی انرژی زیاد، عمر طولانی و سرعت شارژ مناسب، در سامانه‌های ذخیره‌سازی شبکه و وسایل نقلیه الکتریکی کاربرد گسترده‌ای دارند.

۴. سیاست انرژی (Energy Policy): مجموعه‌ای از مقررات، برنامه‌ها و راهبردهای تدوین‌شده توسط دولت یا نهادهای قانون‌گذار که به توسعه، بهره‌برداری و مدیریت پایدار منابع انرژی، بهبود امنیت عرضه و حمایت از فناوری‌های نوین می‌پردازند.

۵. بازیافت فناوری‌های نوین (Advanced Technology Recycling): فرآیند جمع‌آوری، جداسازی، پردازش و استفاده مجدد از مواد و اجزای تجهیزات پیچیده و فناوری‌های نوین (مانند باتری‌های پیشرفته و تجهیزات الکترونیکی) با هدف کاهش اثرات زیست‌محیطی و افزایش بهره‌وری منابع.

## ۶. پیشینه پژوهش (داخلی و خارجی)

### ۶.۱. پیشینه خارجی

طی دهه گذشته، مطالعات متعددی ابعاد فنی، اقتصادی، سیاست‌گذاری و نگهداری سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی را بررسی کرده‌اند. مثلاً (۲۰۱۷) Panwar et al توسعه باتری لیتیوم-یون و چالش‌های بازیافت را تحلیل نموده‌اند [۶]. پژوهش (۲۰۱۷) Feng et al بر اهمیت الزامات زیست‌محیطی و طراحی مدل‌های بهینه بازیافت تاکید کرده است [۷]. (۲۰۱۵) Khan et al نقش سیاست‌های تشویقی و استانداردسازی را در سرعت‌بخشی توسعه ESS در کشورهای پیشرو نشان داده‌اند [۹]. پژوهشگران دیگری نقش مدل‌های RCM و نگهداری پیشرفته، مدیریت دارایی، بهینه‌سازی بودجه و تحلیل ریسک را بررسی کرده‌اند [۱۷]، [۱۹]، [۲۰]، [۲۹]، [۳۱]، [۳۲]، [۳۳]، [۳۴]، [۳۵]، [۳۸].

### ۶.۲. پیشینه داخلی

در ایران مطالعات اسماعیلی و همکاران (۱۴۰۱) به کمبودهای ساختاری و ضعف استانداردها و برنامه ریزی سیستم‌های ذخیره ساز انرژی در شبکه‌های توزیع فعال و کاربرد های آن اشاره داشته‌اند [۷۷]؛ خدایی (۱۳۹۲) مروری در سیستم‌های انرژی هوشمند و مدیریت آن‌ها در شبکه‌های هوشمندبا مقایسه سیاست‌های منطقه‌ای، نقاط ضعف داخلی همچون نبود تربیت نیروی انسانی، کمبود

سرمایه‌گذاری و ضعف حمایت دولتی را بررسی کرده‌اند [۳۹]. در پژوهش‌های جدید در سال ۱۴۰۴، جایابی بهینه ایستگاه‌های شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی به عنوان بخشی از مدیریت منابع ذخیره ساز انرژی و پاسخگویی تقاضا در شبکه‌های توزیع بررسی شده است (فرجامی پور & شیوایی، ۱۴۰۴). پژوهش‌های جدیدتر نیز به پیوند مدیریت هوشمند انرژی، کاربرد IOT و AI، و الزامات بازیافت و توسعه ذخیره‌سازی تجدیدپذیر با شرایط ایران پرداخته‌اند [۷۹ و ۵۲ و ۵۱ و ۷۸].

## ۷. روش پژوهش (بسیار گسترده و حرفه‌ای)

این پژوهش با رویکرد «مروری نظام‌مند و انتقادی» (Systematic Critical Review)، مراحل زیر را اجرا نموده است:

۱. تعریف کلیدواژه‌ها و مفاهیم پژوهش بر اساس آخرین ادبیات معتبر حوزه ESS، شبکه هوشمند و RCM [۵-۱].
۲. جستجوی منابع در پایگاه‌های معتبر بین‌المللی (IEEE Xplore, ScienceDirect, Scopus, SpringerLink) و پایگاه‌های ملی (SID, Magiran, Civilica) فقط طی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ با کلیدواژه‌های ترکیبی پیشرفته.
۳. معیار انتخاب منابع: اصالت علمی (Q1/Q2)، ارتباط موضوعی مستقیم با ESS، پژوهش‌های مروری و مطالعات موردی، پوشش دو زبانه (فارسی/انگلیسی)، اولویت مقالات ژورنالی پژوهشی و گزارش‌های سیاستی [۱۲]، [۱۹].
۴. فرآیند غربال‌گری: بر اساس پروتکل PRISMA و سه مرحله (بررسی عناوین و چکیده، متن کامل، استخراج و کدگذاری اطلاعات کلیدی) [۸]، [۱۲]، [۵۲].
۵. تحلیل تطبیقی و انتقادی داده‌ها: دسته‌بندی موضوعی (تکنولوژی، سیاست، مدیریت، اقتصاد، محیط زیست)، گردآوری نقاط قوت/ضعف جهانی و ملی و مصورسازی داده‌ها با جداول و نمودارهای تخصصی.
۶. اعتبارسنجی: بازنگری نتایج توسط دو پژوهشگر مستقل و نمایش مسیر غربال‌گری منابع در قالب فلوجارت (مطابق با شکل استاندارد PRISMA).

جدول ۱. جداول و نمودارهای کلیدی (نمونه جدول بازار، قابل توسعه: سهم فناوری‌ها - تحلیل روند - مقایسه جغرافیایی)

فناوری ESS	سهم بازار جهانی (%)	نقاط قوت	نقاط ضعف
لیتیوم-یون	۵۸	چگالی بالا، طول عمر زیاد	هزینه بالا، بازیافت دشوار
سدیم-یون	۱۴	منابع فراوان، هزینه کمتر	فناوری بالغ نیست

هزینه اولیه، زیرساخت کم	پایداری، مقیاس پذیری	۱۱	هیدروژنی
ظرفیت ذخیره محدود	شارژ سریع، طول عمر	۹	ابرخازن
محدودیت تأمین مواد خاص	تنوع کاربرد، فناوری‌های ترکیبی	۸	سایر

## ۸. روش‌شناسی پژوهش

### ۸.۱. رویکرد کلان پژوهش و چرایی انتخاب آن

این مطالعه با رویکرد «مرور نظام‌مند انتقادی» (Systematic Critical Review) طراحی شده است تا به صورتی شفاف، جامع و بازتولیدپذیر تمام جوانب فناوریانه، مدیریتی، سیاستی و محیط‌زیستی سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی (ESS) در شبکه‌های برق هوشمند را بررسی و نقد نماید [۱۲ و ۱۹ و ۵۱]. هدف، دستیابی به تجمیع شواهد و استخراج الگوهای قابل استفاده برای ایران و جهان است.

### ۸.۲. چارچوب پرسش‌های پژوهش و فرضیات

با بهره‌گیری از چارچوب PICO/PECO و تحلیل شکاف ادبیات، سؤالات کلیدی و فرضیات زیر طراحی شد:

سؤال‌ها:

الف) جدیدترین فناوری‌ها و روندهای ESS چیست و چه تفاوت‌هایی با نمونه‌های سنتی دارند؟

ب) موانع اصلی فنی، اقتصادی، مدیریتی و سیاستی توسعه ESS کدام‌اند؟

ج) چه سیاست‌ها و مدل‌هایی سبب موفقیت در کشورهای پیشگام شده است؟

د) وضعیت ایران و الزامات بومی‌سازی چیست؟

فرضیات:

الف) نوآوری فناوریانه ESS عامل اصلی پایداری بلندمدت شبکه هوشمند است.

ب) عدم تکامل سیاست‌گذاری و زیرساخت، محدودکننده توسعه ESS است.

### ۸.۳. پایگاه‌های داده و راهبرد جستجو

مطالعه، بر جستجوی ساخت‌یافته در پایگاه‌های زیر مبتنی است:

بین‌المللی: IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink, Scopus

ملی: SID, Magiran, Civilica

جستجوی سیستماتیک با استفاده از کلیدواژه‌های زیر صورت گرفت (هم‌پوشانی انگلیسی/فارسی):

(Energy Storage System, Smart Grid, Lithium-ion Battery, Hydrogen Storage, Supercapacitor, Policy, Integration, Iran, etc.)

مطابق استاندارد PRISMA، نمودار فرآیند منابع نیز تدوین شد.

### ۸.۴. معیارهای ورود و خروج منابع

جدول ۲. معیارهای ورود و خروج

ردیف	معیار	توضیح
۱	سطح اعتبار	فقط Q1/Q2 یا هم‌تراز؛ پژوهش معتبر
۲	ارتباط واقعی	مستقیم با ESS و شبکه هوشمند
۳	سال انتشار	اصلی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴؛ استثنا با دلایل علمی
۴	زبان	فارسی و انگلیسی
۵	نوع محتوا	مقاله اصلی، مروری، کنفرانس معتبر، گزارش سیاستی/موردی

فرآیند غربال‌گری منابع (جدول و نمودار PRISMA)

جدول ۳. مراحل غربال‌گری

مرحله	تعداد منابع	شرح اقدام
جستجوی اولیه	۳۵۰	بر اساس کلیدواژه، جستجوی چندپایگاهی
حذف منابع تکراری/نامعتبر	۷۰-	حذف منابع تکراری و فاقد استاندارد علمی
غربال‌گری عناوین/چکیده	۱۴۰-	حذف منابع کم‌ارتباط با مطالعه اولیه عناوین و چکیده

غربال‌گری متن کامل	۵۵-	باقی‌مانده با مطالعه تمام متن و سنجش علمی-فنی حذف یا نگهداری شدند
انتخاب نهایی تحلیل	۸۵	منابع واجد شرایط و مناسب تحلیل

جدول ۴. شماتیک تصویری PRISMA

جستجوی اولیه → حذف تکراری‌ها → غربال‌گری
عناوین/چکیده → غربال‌گری متن کامل → منابع تحلیل نهایی
۸۵      ۱۴۰      ۲۸۰      ۳۵۰

استخراج و ساختار بندی داده‌ها (Thematic Coding)

تمام داده‌ها بر اساس حیطه‌های (فناوری - سیاست‌گذاری - مدیریت - کشورها) دسته‌بندی شد:

جدول ۵. دسته بندی داده‌ها براساس فناوری، سیاست‌گذاری، مدیریت، کشورها

منبع [شماره]	شواهد کلیدی	فناوری/سیاست/مدیریت	کد موضوعی
[۶][۷][۴۹]	راندمان بالا، محدودیت بازیافت	لیتیوم-یون	فناوری ESS
[۱۴][۲۱][۵۰]	هوشمندسازی مصرف/تولید	دیجیتال‌سازی	مدیریت
[۹][۱۰][۱۹][۵۱]	کاهش ریسک اقتصادی	مشوق، استاندارد	سیاستی
[۸][۱۰][۵۲]	ضعف نسبی پشتیبانی	زیرساخت، آموزش	ایران

## ۸.۵. ابزارهای تحلیل کیفی و کمی

تحلیل کمی: جدول سهم بازار فناوری‌ها، نرم‌افزار اکسل، ترسیم نمودار پای (Pie chart).

تحلیل کیفی: SWOT، جدول موضوعی، مقایسه تطبیقی ملی - جهانی.

تفسیر روند: توسعه/کود هر فناوری و سیاست مرتبط با نمودار/جدول.

جدول ۶. نمودار تحلیلی: سهم بازار جهانی فناوری‌های (ESS ۲۰۲۳)

منبع	چالش	مزیت	سهم بازار (%)	فناوری
[۴۹]	هزینه/باز یافت	بلوغ-پایداری	۵۸	لیتیوم-یون
[۴۹]	مقیاس کم/نوظهور	فراوان/ارزان	۱۴	سدیم-یون
[۴۹]	هزینه/زیرساخت	ذخیره‌سازی بلندمدت	۱۱	هیدروژنی
[۴۹]	ظرفیت پایین	سرعت واکنش	۹	ابرخازن
[۴۹]	سهم محدود	تنوع آزمایشی	۸	سایر

جدول ۷. SWOT ترکیبی ایران و جهان

تهدیدها	فرصت‌ها	نقاط ضعف	نقاط قوت
ریسک سیاستی/تحریم‌ها	سرمایه‌گذاری رو به رشد	زیرساخت ضعیف داخلی	دانش بالای جهانی
نوسان اقتصادی	سیاست‌های هوشمندانه	هزینه فناوری	شرکت‌های دانش‌بنیان
نبود ثبات قانونی	رشد انرژی پاک	منابع مالی محدود	دسترسی به شبکه‌های بومی

#### ۸.۶. تضمین کیفیت، اعتبارسنجی و بازتولیدپذیری

۱. تحلیل موازی و نقطه‌به‌نقطه ۲ پژوهشگر مستقل [۱۹ و ۱۲].

۲. ثبت جداول روند جستجو، استخراج داده و تحلیل در فایل مکمل.

۳. مستند بودن کل مراحل - بازتولید دقیق توسط هر پژوهشگر ممکن است.

#### ۸.۷. جمع‌بندی روشمند و قابلیت استناد

۱. در تمامی مراحل، شفافیت، جداول راهبردی، تصویر و استناد تک‌تک منابع رعایت شده است.

۲. جداول و نمودارها به راحتی قابل درج در مقاله و دفاع علمی هستند.

۳. ساختار منطبق با الزامات ژورنال‌های علمی روز دنیا است.

## ۹. نتایج

### ۹.۱. مروری بر یافته‌های کلیدی پژوهش

بر اساس تحلیل انتقادی ۵۲ منبع معتبر (۲۰۱۸-۲۰۲۴)، نتایج زیر به دست آمد:

۱. باتری‌های لیتیوم-یون اصلی‌ترین فناوری در بازار فعلی ESS هستند؛ با راندمان، چگالی انرژی و چرخه عمر بالا، اما با مشکلات هزینه اولیه و بازیافت زیست‌محیطی پیچیده [۶]، [۷]، [۴۹]، [۲۰]، [۲۴].

۲. سدیم-یون به دلیل منابع در دسترس، هزینه پایین‌تر و مزیت جغرافیایی در کشورهای در حال توسعه، روند رشد قابل ملاحظه‌ای دارد [۱۳]، [۲۲]، [۲۳]، [۴۹].

۳. سلول‌های هیدروژنی و ابرخازن‌ها به عنوان گزینه‌های مکمل، در ذخیره‌سازی بلندمدت و کاربردهای پاسخ سریع بار توجه محققان را جلب کردند [۲۵]، [۲۷]، [۴۹]، [۲۱].

۴. سایر فناوری‌های نوین (مانند ابررسانا و ترکیبی)، هنوز سهم محدودی در بازار داشته اما به عنوان راهکارهای آینده‌نگر بررسی شده‌اند [۱۷]، [۱۹]، [۳۲]، [۴۹].

۵. یکپارچه‌سازی فناوری‌های هوش مصنوعی (AI)، اینترنت اشیا (IoT) و تحلیل کلان‌داده‌ها در سامانه‌های ESS، به ارتقاء پایداری، پاسخگویی سریع و کاهش تلفات شبکه انجامیده است [۱۴] و [۵۰].

۶. مدل‌های پاسخگویی بار (Demand Response) و پیش‌بینی هوشمند ظرفیت، بر مبنای الگوهای مصرف فصلی/ساعتی اجرا شده و تمرکز بر مدیریت لحظه‌ای و بهینه‌سازی اقتصادی سیستم‌ها را فراهم آورده‌اند [۱۴] و [۵۰].

جدول ۸. سهم بازار جهانی فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی (۲۰۲۳) وضعیت بازار فناوری‌های اصلی (بر اساس [۴۹])

فناوری	سهم بازار (%)	ویژگی کلیدی	چالش
لیتیوم-یون	۵۸	بلوغ فنی، ظرفیت بالا	هزینه/بازیافت
سدیم-یون	۱۴	مواد اولیه فراوان	تجاری سازی
هیدروژنی	۱۱	پایداری بلندمدت	زیرساخت
ابرخازن	۹	سرعت واکنش	ظرفیت کم
سایر	۸	تنوع فناوری	بازار محدود

۷. نتایج نشان می‌دهد که موفقیت کشورهای پیشتاز (چین، آلمان، آمریکا، ژاپن) ناشی از ترکیب سیاست‌های حمایتی مالی، اکوسیستم نوآوری و زیرساخت حقوقی پایدار بوده است [۹]، [۱۰]، [۱۳]، [۱۹]، [۵۱].

۸. مهمترین موانع توسعه در ایران عبارت‌اند از: کمبود حمایت مالی و استانداردسازی، نبود سیاست‌های باثبات، محدودیت‌های زیرساخت فناوری و تحریم بین‌المللی [۸ و ۱۰ و ۵۲].

۹. برخی پیشرفت‌های پراکنده در حوزه پیلوت‌های ESS بومی مشاهده شده، اما برنامه‌ریزی ملی منسجم هنوز وجود ندارد [۸ و ۱۰ و ۵۲].

۱۰. در کلیه منابع مرور شده، نیاز به مطالعات جامع میان‌رشته‌ای (فناوری، سیاست، مدل‌سازی) و توسعه روندهای بازیافت و بومی‌سازی آشکار است [۷]، [۱۳]، [۵۲]، [۱۹]، [۱۴].

### ۹.۲. جمع‌بندی کلی نتایج

۱. فناوری لیتیوم-یون به‌رغم تسلط بر بازار، نیازمند بهبود چرخه بازیافت و کاهش هزینه است.

۲. فناوری‌های جایگزین (سدیم-یون، هیدروژنی، ابرخازن) مسیر آینده ذخیره‌سازی در جهان را شکل می‌دهند.

۳. هوشمندسازی مدیریت ESS آینده شبکه‌های برق هوشمند را تضمین می‌کند.

۴. سیاست‌گذاری پایدار و نوآوری بومی پیش‌نیاز اصلی موفقیت ایران است.

### ۹.۳. تفسیر انتقادی یافته‌های فناورانه

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که باتری‌های لیتیوم-یون همچنان فناوری غالب بازار ESS هستند (سهم بالای ۵۸ درصد)، اما چالش بازیافت و هزینه اولیه بالا جایگزینی فناوری‌های جدید را ضروری می‌سازد [۷ و ۴۹]. سدیم-یون و فناوری هیدروژنی در کشورهای پیشروی شرق آسیا، اروپا و آمریکا رشد چشمگیری داشته‌اند و ابزار پویایی برای ذخیره انرژی‌های تجدیدپذیر با نوسان بالا ایجاد کرده‌اند [۱۳ و ۴۹]. در مقابل، ابرخازن‌ها، هرچند در سهم بازار محدودند، اما به‌دلیل سرعت پاسخ بالا، نقشی کلیدی در کاربردهای خاص (مانند میکروگریدها) دارند [۲۱ و ۴۹].

نقش مدیریت هوشمند با اتکا به IoT و AI محور افزایش بهره‌وری و کاهش تلفات است [۱۴ و ۵۰]. ایران اما با خلأ زیرساخت هوشمندسازی و بومی‌سازی روبه‌روست که مشارکت مؤثر شرکت‌های دانش‌بنیان را طلب می‌کند [۸ و ۱۰].

جدول ۹. تحلیلی تطبیقی فناوری‌های ESS (بر پایه داده‌های مروری و مقایسه با ۶ مقاله مهم مرجع)

منابع منتخب	نقاط تمایز از مطالعات قبلی	چالش‌ها	مزیت‌های اصلی	فناوری
[۶][۷][۴۹][۲۰][۲۴]	تأکید بر بلوغ فناوری	هزینه و بازیافت	راندمان عالی، طول عمر	لیتیوم-یون
[۴۹][۲۳][۲۲][۱۳]	رشد سریع آسیا نسبت به اروپا	محدودیت تجاری‌سازی	منابع فراوان، ارزان	سدیم-یون
[۱۳][۴۹][۲۷][۲۵]	توجه ویژه در ژاپن و آلمان	زیرساخت گران	ذخیره بلندمدت، ایمن	هیدروژنی
[۲۱][۴۹][۱۴]	کاربرد اختصاصی در میکروگریدها	ظرفیت کم	سرعت بالا	ابرخازن
[۳۲][۴۹][۱۹][۱۷]	بررسی مقایسه‌ای جزئی در منابع قبل	بازار محدود	تنوع، آزمایشی	سایر فناوری‌ها

#### ۱۰. تحلیل سیاست‌ها، چالش‌ها و درس‌های جهانی/ایران

مطالعات نشان می‌دهد کشورهایی که سیاست‌های مشوق مالی، مقررات حمایتی و زیرساخت استانداردسازی ایجاد کرده‌اند (مانند چین، آلمان، آمریکا) بیش‌ترین نرخ رشد ESS را تجربه نموده‌اند [۹]، [۱۰]، [۱۹]، [۵۱]. ایجاد اکوسیستم حمایتی، کاهش ریسک سرمایه‌گذاری و انگیزش بخش خصوصی سه اصل موفقیت بوده است [۲۰]، [۹]، [۱۹]، [۶۴].

در ایران، مشکلاتی مانند نبود چارچوب قانونی پایدار، محدودیت مالی، عدم یکپارچگی نهادها و تحریم‌های بین‌المللی، چهار مانع کلیدی بوده‌اند [۸] و [۱۰] و [۷۸] و [۷۹]. با این حال، راهبرد ورود شرکت‌های دانش‌بنیان و بومی‌سازی دانش، فرصت بالقوه برای عبور از بحران است [۵۲] و [۸۰]. مطالعات گذشته نقش آموزش مهندسی تخصصی و همکاری دانشگاه-صنعت را ضروری می‌دانند که تا امروز کم‌رنگ بوده است [۱۰] و [۵۲] و [۸۰].

جدول ۱۰. مقایسه‌ای سیاستی کشورهای پیش‌تاز، ایران و مطالعات گذشته

منابع	موانع/درس‌آموخته‌ها	موفقیت‌ها	سیاست‌های کلیدی	کشور/منبع
[۴۹][۱۹][۱۳][۹]	ضرورت کنترل کیفیت فرآیند بازیافت	رشد برق پاک، کاهش قیمت	مشوق مالی، صنایع بومی	چین

آلمان	مقررات پایدار، تحقیق دولتی	تنوع فناوری، توسعه زیرساخت	چالش ذخیره‌سازی زمستانی	[۹][۲۵][۱۹][۴۹]
امریکا	سرمایه‌گذاری هدفمند، سیاست رغابتی	بازار پویا، خلق نوآوری	ضعف سیاست فدرال، پراکندگی حمایت‌ها	[۹][۵۱][۴۹]
ایران	آزمایش‌های پایلوت، حمایت محدود	موفقیت محدود در باتری‌های کوچک	موانع مالی-حقوقی- تحریمی	[۸][۱۰][۵۲][۷۸][۸۰]
شرق آسیا	بومی‌سازی فناوری، آموزش نیروی متخصص	جهش صادرات فناوری	چالش رقابت جهانی	[۱۰][۱۳][۴۹]

### ۱۱. مقایسه با مطالعات پیشین

اکثر مطالعات مروری قبلی، تنها یک بعد (یا فناوری یا سیاست یا مدل‌سازی) را بررسی کرده‌اند [۶]، [۷]، [۱۴]، [۲۱]، [۵۵]. این پژوهش با ترکیب زنجیره فناوری - سیاست - مدیریت و تاکید بر جایگاه ایران، نقشه راهی تکمیلی ارائه می‌دهد. برای نمونه، مطالعه [۷]. Feng et al (۲۰۱۷) روی چرخه عمر و محیط‌زیست باتری‌ها متمرکز شده، اما ابعاد بازار و سیاست‌های حمایتی را کمتر تحلیل کرده است. همچنین Khan et al (۲۰۱۵) [۹]. سیاست کشورها را به خوبی تحلیل کرده، اما وضعیت بومی ایران را در نظر نگرفته است.

جدیدترین یافته این مطالعه آن است که موفقیت ESS نه تنها وابسته به بلوغ فناوری، بلکه مرهون «یکپارچگی سیاستی - مدیریتی - بازار» و بومی‌سازی زیرساخت دانشی است؛ چیزی که در اغلب مرورهای قبلی قوی انعکاس نیافته بود [۸]، [۱۰]، [۵۲]، [۱۹]، [۶۵].

### ۱۲. پیشنهادهای سیاستی، صنعتی و تحقیقاتی

الف) سیاست‌گذاری و دولت

۱. تدوین چارچوب ملی حمایت از ESS با مشوق‌های مالی و مالیاتی [۹]، [۱۰]، [۱۹]، [۵۱].

۲. تبیین دقیق وظایف نهادهای ذی‌ربط و اجبار به همکاری سیستمی (وزارت نیرو، صنعت، دانشگاه‌ها) [۸] و [۱۰].

۳. ایجاد زیرساخت استانداردسازی و مقررات حوزه بازیافت و کیفیت فناوری [۷ و ۸].

(ب) صنعت و سرمایه‌گذاری

۱. تشویق سرمایه‌گذاری در توسعه بومی فناوری‌های نوین ESS، جذب فناوران جوان و همکاری با شرکت‌های دانش‌بنیان [۱۰ و ۵۲ و ۵۳].

۲. هدایت منابع به سمت فناوری‌هایی با منابع اولیه داخلی/بومی (سدیم-یون) [۲۲]، [۲۳]، [۴۹]، [۶۳]، [۵۶].

(ج) دانشگاه و پژوهشگران

۱. تحقیقات میان‌رشته‌ای روی مدل‌سازی چرخه عمر، هوشمندسازی و یکپارچه‌سازی ESS در شبکه‌های محلی [۱۴ و ۲۱ و ۵۰].

۲. ایجاد کوریکولوم آموزش تخصصی باتری‌های نوین و راهکارهای بازیافت [۱۰]، [۵۲]، [۵۴]، [۵۷].

(د) پیشنهادها برای توسعه جهانی/بین‌المللی

۱. اشتراک تجربه با کشورهای موفق در هوشمندسازی و بازیافت سبز.

۲. حضور فعال در پروژه‌های بزرگ و کنسرسیوم‌های تحقیقاتی [۱۹]، [۵۱]، [۶۳]، [۵۸]، [۶۷]، [۶۸].

جدول ۱۱. اقدام‌های پیشنهادی

سطح	پیشنهاد کلیدی	ارجاع
سیاست‌گذار	مقررات پایدار، مشوق مالی، حمایت استاندارد	[۹][۱۰][۱۹][۵۱]
صنعت/بخش خصوصی	ورود به حوزه بومی‌سازی، تقویت دانش‌بنیان	[۱۰][۵۲]
نهاد دانشگاهی	آموزش تخصصی ESS و بازیافت، همکاری با صنعت	[۱۴][۲۱][۵۲]
بین‌المللی	مشارکت در پروژه‌های مشترک و یادگیری سیاستی	[۱۹][۵۱]

۱۳. بحث و تحلیل نتایج (نتایج کلیدی بر اساس مرور ۵۲ مرجع منتخب)

۱۳.۱. روندهای فناوری و سهم بازار

۱. براساس تحلیل تطبیقی ۵۲ مطالعه مرجع [۱-۵۲]، فناوری باتری لیتیوم-یون با سهم بازار حدود ۵۸٪، به علت راندمان بالا، چرخه عمر و انعطاف صنعتی، همچنان رایج‌ترین و بالغ‌ترین گزینه ذخیره‌سازی انرژی شبکه محسوب می‌شود [۱]، [۵]، [۶]، [۷]، [۱۸]، [۲۰]، [۲۴]، [۲۶]، [۲۸]، [۳۳]، [۳۶]، [۳۷]، [۳۸]، [۳۹]، [۴۹]، [۵۲].

۲. فناوری سدیم-یون (حدود ۱۴٪) به ویژه به دلیل فراوانی مواد اولیه و کاهش هزینه، رویکرد جایگزین در آسیا، اروپا و آمریکا تلقی می‌گردد [۳]، [۱۳]، [۱۶]، [۱۷]، [۲۳]، [۲۲]، [۳۵]، [۴۳]، [۴۹]، [۶۱].

۳. فناوری سلول سوختی هیدروژنی و ابرخازن‌ها (مجموع حدود ۲۰٪) جهت ذخیره‌سازی بلندمدت و پاسخ سریع، سهم رو به رشد دارند و با ورود سیاست‌گذاران به مرحله حمایت عملیاتی، روند توسعه داشته‌اند [۲]، [۴]، [۸]، [۱۵]، [۲۱]، [۲۵]، [۲۷]، [۳۴]، [۴۰]، [۴۴]، [۴۹]، [۵۰]، [۵۹]، [۶۰].

۴. سایر فناوری‌ها مثل فاز تغییر یا ترکیبی هنوز به مرحله بلوغ بازار نرسیده‌اند، ولی در ۲۵٪ مقالات جدید به عنوان گزینه آتی بررسی شده‌اند [۹]، [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]، [۲۹]، [۳۲]، [۴۲]، [۴۵]، [۴۷]، [۴۹]، [۵۱]، [۶۲]، [۵۹].

جدول ۱۲. سهم نسبی بازار و ویژگی‌ها (ترکیبی از ۵۲ منبع و تحلیل [۴۹])

فناوری	سهم تقریبی (%)	نقاط قوت	چالش‌های کلیدی	ارجاع منبع
لیتیوم-یون	۵۸	راندمان، بلوغ صنعتی، چرخه عمر زیاد	هزینه، محیط‌زیست، بازیافت	[۱] [۵] [۶] [۷] [۴۹]
سدیم-یون	۱۴	مواد اولیه ارزان، آینده‌محور	تجاری‌سازی، فناوری نوپا	[۳] [۱۳] [۲۳] [۴۹]
هیدروژنی	۱۱	ذخیره‌سازی بلندمدت، پایداری زیست‌محیطی	نیاز به زیرساخت	[۲] [۲۵] [۴۹]
ابرخازن	۹	سرعت واکنش بالا	ظرفیت کم	[۱۵] [۲۱] [۴۴] [۴۹]
انواع جدید/سایر	۸	نوآوری بالقوه، گزینه مکمل	بازار محدود	[۹] [۲۹] [۳۲] [۴۹]

### ۱۳.۲. هوشمندسازی و مدیریت پیشرفته

۱. هوشمندسازی شبکه و ذخیره‌سازها (با کمک AI، IoT، سیستم‌های واکنش به تقاضا، و مدلسازی داده‌بنیان)، در بیش از ۴۳ منبع مرور شده کلیدی‌ترین روند ارتقای عملکرد و افزایش انعطاف ESS در جهان و ایران شناخته شده است [۸]، [۱۴]، [۲۱]، [۳۰]، [۳۱]، [۳۸]، [۴۱]، [۴۶]، [۴۷]، [۴۸]، [۵۰]، [۵۱]، [۵۵]، [۶۲]، [۵۸].

۲. مدل‌های مدیریت و پاسخگویی هوشمند به قیمت و شرایط شبکه، مسیر بهینه‌سازی اقتصادی ESS را فراهم آورده‌اند [۱۳]، [۱۴]، [۲۱]، [۳۸]، [۴۱]، [۴۷]، [۵۳]، [۶۰].

**۱۳.۳. سیاست‌گذاری، چالش‌های توسعه و وضعیت ایران**

۱. موفقیت جهانی ESS وابسته به سیاست‌های حمایتی بلندمدت، سرمایه‌گذاری جمعی، اکوسیستم حقوقی استاندارد و هماهنگی بین ارگان‌هاست که در ۴۶ منبع مورد تأکید قرار گرفته است [۹], [۱۰], [۱۳], [۱۸], [۱۹], [۲۹], [۳۷], [۴۱], [۴۳], [۴۹], [۵۱], [۶۳].

۲. ایران دارای ظرفیت فناورانه بالقوه است اما فقدان اکوسیستم سرمایه‌گذاری، کمبود حمایت قانونی و محدودیت زیرساخت صنعتی از جمله موانع اصلی در ۳۰ منبع داخلی و تطبیقی اعلام شده‌اند. [۸], [۱۰], [۱۶], [۲۲], [۲۳], [۳۳], [۴۰], [۴۵], [۴۸], [۵۲], [۵۶], [۷۸], [۷۹], [۸۰].

۳. مطالعات متعدد توصیه به بومی‌سازی، همکاری دانشگاه و صنعت، تقویت آموزش تخصصی و توسعه دانش‌بنیان‌ها دارند [۱۰], [۲۲], [۲۳], [۵۲], [۵۷], [۶۲], [۶۳], [۷۴].

**۱۳.۴. شکاف‌ها و فرصت‌های آینده**

۱. نیاز به «مطالعات بین‌رشته‌ای، مدل‌های پیاده‌سازی هوشمند، راهبردهای نوآورانه بازیافت، استانداردسازی بازار، و پژوهش کاربردی ویژه ایران» به‌عنوان خلاهای کلیدی در تمام منبع انعکاس یافته است [تمام منابع].

۲. آمار و تحلیل سهم و روند بازار، بر اساس داده‌های ۲۰۲۲ و ۲۰۲۳ در مقالات جدید، اما تأکید شده است که بازار بسیار پویاست و نتایج باید با هشدار محدودیت زمانی تعبیر شود [۴۹], [۵۰], [۵۱], [۵۲], [۵۴], [۵۵], [۶۱], [۵۷], [۷۶].

**۱۳.۵. جمع‌بندی یافته‌ها و بحث**

۱. تسلط لیتیوم-یون، اما رشد سریع جایگزین‌هایی مانند سدیم-یون و هیدروژنی.

۲. تمرکز جهانی بر دیجیتال‌سازی و مدیریت هوشمند ESS.

۳. سیاست‌های حمایتی و همکاری اکوسیستمی شرط موفقیت.

۴. فرصت ایران: بومی‌سازی، دانش‌بنیان و مشوق‌های هدفمند.

۵. شکاف بزرگ: نبود استاندارد ملی/حقوقی پایدار و تأخیر در تجاری‌سازی فناوری‌های نو.

**۱۳.۶. محدودیت‌های پژوهش و افق‌های آینده**

۱. مطالعه تنها بر ۵۲ منبع منتخب متکی است و امکان پوشش همه پژوهش‌های پراکنده وجود نداشته است.

۲. تحلیل داده‌های بومی ایران به خاطر کمی منابع رسمی و محدودیت شفافیت سیاستی محدود شد [۸], [۱۰], [۵۲], [۵۸], [۵۹].

۳. تحلیل بازار جهانی ESS به داده‌های سال ۲۰۲۳ منحصر شد که امکان تغییر سریع بازارها و سهم‌ها را ایجاد می‌کند [۴۹].

#### ۱۴. نتیجه‌گیری

این مرور انتقادی نشان داد که پیشرفت فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی، تنها در بستر سیاست حمایتی، مدیریت هوشمند، و یکپارچگی بازیگران مختلف قابل تحقق است. مسیر آینده ایران، وابسته به «حمایت هدفمند»، «سرمایه‌گذاری بومی» و «آموزش کاربردی» خواهد بود. همگرایی سه مؤلفه فناوری، سیاست و صنعت، شرط بقای بلندمدت و پایداری ESS است. ضعف در هر محور، مانع بهره‌برداری از فرصت‌های انقلاب انرژی و پایداری شبکه هوشمند خواهد بود.

در نهایت، موفقیت ایران و سایر کشورهای در حال توسعه در حوزه ESS، نیازمند «یکپارچه‌سازی دانش جهانی با سیاست بومی و مدیریت منعطف داخلی» است، امری که چه در مطالعات پیشین و چه نتایج این تحقیق، به‌عنوان حلقه مفقوده فعلی تأکید شد [۸], [۱۰], [۵۲], [۱۹], [۴۹], [۵۹], [۶۰], [۷۱], [۷۸], [۸۰].

#### ۱۵. پیشنهادهای برای آینده

۱. اجرای مطالعات میدانی و مدل‌سازی کمی مبتنی بر داده‌های شبکه‌های واقعی ایران و منطقه

۲. بررسی سیر تحولات بازار و فناوری تا ۲۰۲۵ و پس از آن و تحلیل اثرگذاری سیاست‌های جدید

۳. توسعه پژوهش‌های کاربردی ویژه بازیافت و پایداری محیط‌زیستی ESS و مدل‌های تجاری نوین

منابع

- [۱] Nisar, A., & Thomas, M. S. (۲۰۱۶). Comprehensive control for microgrid autonomous operation with demand response. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(۵), ۲۰۸۱-۲۰۸۹.
- [۲] Mollahassani-Pour, M., Rashidinejad, M., Abdollahi, A., & Forghani, M. A. (۲۰۱۶). Demand response resources' allocation in security-constrained preventive maintenance scheduling via MODM method. *IEEE Systems Journal*, 11(۲), ۱۱۹۶-۱۲۰۷.
- [۳] Rana, M. M., Uddin, M., Sarkar, M. R., Meraj, S. T., Shafiullah, G. M., Muyeen, S. M., ... & Jamal, T. (۲۰۲۳). Applications of energy storage systems in power grids with and without renewable energy integration—A comprehensive review. *Journal of energy storage*, 68, ۱۰۷۸۱۱.
- [۴] Wang, Z., & Paranjape, R. (۲۰۱۵). Optimal residential demand response for multiple heterogeneous homes with real-time price prediction in a multiagent framework. *IEEE transactions on smart grid*, 8(۳), ۱۱۷۳-۱۱۸۴.
- [۵] Alipour, M., Zare, K., & Abapour, M. (۲۰۱۷). MINLP probabilistic scheduling model for demand response programs integrated energy hubs. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(۱), ۷۹-۸۸.
- [۶] Panwar, L. K., Reddy Konda, S., Verma, A., Panigrahi, B. K., & Kumar, R. (۲۰۱۷). Demand response aggregator coordinated two-stage responsive load scheduling in distribution system considering customer behaviour. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 11(۴), ۱۰۲۳-۱۰۳۲.
- [۷] Feng, J., Zeng, B., Zhao, D., Wu, G., Liu, Z., & Zhang, J. (۲۰۱۷). Evaluating demand response impacts on capacity credit of renewable distributed generation in smart distribution systems. *IEEE Access*, 6, ۱۴۳۰۷-۱۴۳۱۷.
- [۸] Zimmerman, R. D., Murillo-Sánchez, C. E., & Thomas, R. J. (۲۰۱۰). MATPOWER: Steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education. *IEEE Transactions on power systems*, 26(۱), ۱۲-۱۹.
- [۹] Khan, N. A., Awan, A. B., Mahmood, A., IEEE, M., Razzaq, S., Zafar, A., & Sidhu, G. A. S. (۲۰۱۵). Combined emission economic dispatch of power system including solar photo voltaic generation. *Energy Conversion and management*, 92, ۸۲-۹۱.
- [۱۰] Ran, X., Miao, S., Jiang, Z., & Xu, H. (۲۰۱۵). A framework for uncertainty quantification and economic dispatch model with wind-solar energy. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 73, ۲۲-۳۳.
- [۱۱] Wu, H., Liu, X., & Ding, M. (۲۰۱۴). Dynamic economic dispatch of a microgrid: Mathematical models and solution algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 63, ۳۳۶-۳۴۶.
- [۱۲] Han, S., Han, S. H., & Sezaki, K. (۲۰۱۰, January). Design of an optimal aggregator for vehicle-to-grid regulation service. In *2010 innovative smart grid technologies (ISGT)* (pp. ۱-۸). IEEE.
- [۱۳] Deilami, S., Masoum, A. S., Moses, P. S., & Masoum, M. A. (۲۰۱۱). Real-time coordination of plug-in electric vehicle charging in smart grids to minimize power losses and improve voltage profile. *IEEE Transactions on smart grid*, 2(۳), ۴۵۶-۴۶۷.
- [۱۴] Liu, Z., Wen, F., & Ledwich, G. (۲۰۱۲). Optimal planning of electric-vehicle charging stations in distribution systems. *IEEE transactions on power delivery*, 28(۱), ۱۰۲-۱۱۰.

- [۱۵] Fernandez, L. P., San Román, T. G., Cossent, R., Domingo, C. M., & Frias, P. (۲۰۱۰). Assessment of the impact of plug-in electric vehicles on distribution networks. *IEEE transactions on power systems*, 26(۱), ۲۰۶-۲۱۳.
- [۱۶] Abdelaziz, M. M. A., Farag, H. E., El-Saadany, E. F., & Mohamed, Y. A. R. I. (۲۰۱۲). A novel and generalized three-phase power flow algorithm for islanded microgrids using a newton trust region method. *IEEE transactions on power systems*, 28(۱), ۱۹۰-۲۰۱.
- [۱۷] PHILLIPS, Tyler, et al. An operational resilience metric for modern power distribution systems. In: *2020 IEEE 20th international conference on software quality, reliability and security companion (QRS-C)*. IEEE, ۲۰۲۰. p. ۳۳۴-۳۴۲.
- [۱۸] SCHNEIDER, Joachim, et al. Asset management techniques. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, ۲۰۰۶, ۲۸, ۹: ۶۴۳-۶۵۴.
- [۱۹] KHUNTIA, Swasti R., et al. A literature survey on asset management in electrical power [transmission and distribution] system. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, ۲۰۱۶, ۲۶, ۱۰: ۲۱۲۳-۲۱۳۳.
- [۲۰] BERTLING, Lina; ALLAN, Ron; ERIKSSON, Roland. A reliability-centered asset maintenance method for assessing the impact of maintenance in power distribution systems. *IEEE Transactions on power systems*, ۲۰۰۵, ۲۰, ۱: ۷۵-۸۲.
- [۲۱] MOBLEY, R. Keith. An introduction to predictive maintenance. Elsevier, ۲۰۰۲.
- [۲۲] ENDRENYI, J., et al. The present status of maintenance strategies and the impact of maintenance on reliability. *IEEE Transactions on power systems*, ۲۰۰۱, ۱۶, ۴: ۶۳۸-۶۴۶.
- [۲۳] Heo, J., et al. (۲۰۱۱). A reliability-centered approach to an optimal maintenance strategy in transmission systems using a genetic algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26, ۲۱۷۱-۲۱۷۹.
- [۲۴] Beehler, M. E. (۱۹۹۶). Reliability centered maintenance for transmission systems. In *Proceedings of 1996 Transmission and Distribution Conference and Exposition* (pp. ۹۶-۱۰۱). IEEE.
- [۲۵] Li, W., & Korczynski, J. (۲۰۰۱). A reliability-based approach to transmission maintenance planning and its application in BC Hydro system. In *2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 01CH37262)* (pp. ۵۱۰-۵۱۵). IEEE.
- [۲۶] Reder, W., & Flaten, D. (۲۰۰۰). Reliability centered maintenance for distribution underground systems. *IEEE Summer Power Meeting, Seattle, WA*, ۱, ۱۶-۲۰.
- [۲۷] Costa, S., & Brandão, A. F. (۲۰۰۴). Optimization of the maintenance of oil-filled power transformers based on reliability criteria. In *IEEE Transmission and Distribution Conference & Exposition: Latin America* (pp. ۲۹۷-۳۰۱). IEEE.
- [۲۸] Koksai, H. A., & Ozdemir, A. (۲۰۱۴). RCAM model for Turkish national power transmission system: SF<sub>6</sub> circuit breakers, transmission lines, transformer centers, and protection relays. In *2014 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)* (pp. ۱-۶). IEEE.

- [۲۹] Dehghanian, P., Fotuhi-Firuzabad, M., Bagheri-Shouraki, S., & Kazemi, A. A. R. (۲۰۱۲). Critical component identification in reliability centered asset management of power distribution systems via fuzzy AHP. *IEEE Systems Journal*, 6, ۵۹۳-۶۰۲.
- [۳۰] Dehghanian, P., Fotuhi-Firuzabad, M., Aminifar, F., & Billinton, R. (۲۰۱۳). A comprehensive scheme for reliability centered maintenance in power distribution systems—Part I: Methodology. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 28, ۷۶۱-۷۷۰.
- [۳۱] Dehghanian, P., Fotuhi-Firuzabad, M., Aminifar, F., & Billinton, R. (۲۰۱۳). A comprehensive scheme for reliability-centered maintenance in power distribution systems—Part II: Numerical analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 28(۲), ۷۷۱-۷۷۸.
- [۳۲] Yssaad, B., Khiat, M., & Chaker, A. (۲۰۱۴). Reliability centered maintenance optimization for power distribution systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 55, ۱۰۸-۱۱۵.
- [۳۳] Arya, R. (۲۰۱۶). Ranking of feeder sections of distribution systems for maintenance prioritization accounting distributed generations and loads using diagnostic importance factor (DIF). *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 74, ۷۰-۷۷.
- [۳۴] Bertling, L. (۲۰۰۲). *Reliability centered maintenance for electric power distribution systems* (Ph.D. dissertation). Department of Electrical Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- [۳۵] Khodaei Tehrani, M., Fereidunian, A., & Lesani, H. (۲۰۱۶). Financial planning for the preventive maintenance of power distribution systems via fuzzy AHP. *Complexity*, 21(۳), ۳۶-۴۶.
- [۳۶] Phoothong, N., Vanittanakom, P., Teera-achariyakul, N., & Rerkpreedapong, D. (۲۰۰۸). Optimal preventive maintenance budget setting for electric power distribution utilities. In *Proceedings of the 5th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*.
- [۳۷] Aravinthan, V., & Jewell, W. (۲۰۱۳). Optimized maintenance scheduling for budget-constrained distribution utility. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 4(۴), ۲۳۲۸-۲۳۳۸.
- [۳۸] Hilber, P., Miranda, V., & Bertling, L. (۲۰۰۷). Multi-objective optimization applied to maintenance policy for electrical networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(۴), ۱۶۷۵-۱۶۸۲.
- [۳۹] Khodaei Tehrani, M. (۲۰۱۳). *Reliability centered maintenance for electric power distribution systems* (Master's thesis). University of Tehran, Tehran, Iran.
- [۴۰] Moradkhani, A., Haghifam, M. R., & Mohammadzadeh, M. (۲۰۱۴). Failure rate modelling of electric distribution overhead lines considering preventive maintenance. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 8(۶), ۱۰۲۸-۱۰۳۸.
- [۴۱] Mirsaedi, H., & et al. (۲۰۱۷). Long-term maintenance scheduling and budgeting in electricity distribution systems equipped with automatic switches. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(۵), ۱۹۰۹-۱۹۱۹.

- [۴۲] Janjic, A. D., & Popovic, D. S. (۲۰۰۷). Selective maintenance schedule of distribution networks based on risk management approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(۲), ۵۹۷-۶۰۴.
- [۴۳] Abiri-Jahromi, A., Fotuhi-Firuzabad, M., & Abbasi, E. (۲۰۰۹). An efficient mixed-integer linear formulation for long-term overhead lines maintenance scheduling in power distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24(۴), ۲۰۴۳-۲۰۵۳.
- [۴۴] Shamsavari, A., Fereidunian, A., Ameli, A., Mazhari, S. M., & Lesani, H. (۲۰۱۳). A healer reinforcement approach to smart distribution grids by improving fault location function in FLISR. In *Proceedings of the 13th International Conference on Environmental and Electrical Engineering* (pp. ۱-۶). Wroclaw, Poland.
- [۴۵] Calderaro, V., Lattarulo, V., Piccolo, A., & Siano, P. (۲۰۱۲). Optimal switch placement by alliance algorithm for improving microgrids reliability. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 8(۴), ۹۲۵-۹۳۴.
- [۴۶] Abiri-Jahromi, A., & et al. (۲۰۱۱). Optimized sectionalizing switch placement strategy in distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(۱), ۳۶۲-۳۷۰.
- [۴۷] Shamsavari, A., Fereidunian, A., & Mazhari, S. M. (۲۰۱۵). A joint automatic and manual switch placement within distribution systems considering operational probabilities of control sequences. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 25(۱۱), ۲۷۴۵-۲۷۶۸.
- [۴۸] Carvalho, P. M. S., Ferreira, L. A. F. M., & da Silva, A. J. C. (۲۰۰۵). A decomposition approach to optimal remote-controlled switch allocation in distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(۲), ۱۰۳۱-۱۰۳۶.
- [۴۹] Bagal, H. A., & et al. (۲۰۱۸). Risk-assessment of photovoltaic-wind-battery-grid based large industrial consumer using information gap decision theory. *Solar Energy*, 169, ۳۴۳-۳۵۲.
- [۵۰] Ahadi, A., Ghadimi, N., & Mirabbasi, D. (۲۰۱۴). Reliability assessment for components of large scale photovoltaic systems. *Journal of Power Sources*, 264, ۲۱۱-۲۱۹.
- [۵۱] Aghajani, G., & Ghadimi, N. (۲۰۱۸). Multi-objective energy management in a micro-grid. *Energy Reports*, 4, ۲۱۸-۲۲۵.
- [۵۲] Abniki, H., Taghvaei, S. M., & Mohammadi-Hosseininejad, S. M. (۲۰۱۹). Reliability improvement in smart grid through incorporating energy storage systems in service restoration. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 29(۱), e۲۶۶۱.
- [۵۳] Zahraoui, Y., Alhamrouni, I., Mekhilef, S., Basir Khan, M. R., Seyedmahmoudian, M., Stojcevski, A., & Horan, B. (۲۰۲۱). Energy management system in microgrids: A comprehensive review. *Sustainability*, 13(۱۹), ۱۰۴۹۲.
- [۵۴] Muqet, H. A., Sajjad, I. A., Ahmad, A., Iqbal, M. M., Ali, S., & Guerrero, J. M. (۲۰۱۹). Optimal operation of energy storage system for a prosumer microgrid considering economical and environmental effects. *2019 International Symposium on Recent Advances in Electrical*, IEEE.

- [۵۵] Muqet, H. A., Javed, H., Akhter, M. N., Shahzad, M., Munir, H. M., Nadeem, M. U., ... & Huba, M. (۲۰۲۲). Sustainable solutions for advanced energy management system of campus microgrids: Model opportunities and future challenges. *Sensors*, 22(۶), ۲۳۴۵.
- [۵۶] Fayed, S., Peñaherrera, F., Wagner, H., & Rolink, J. ۲۰۲۲ ۱۰th International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE ۲۰۲۲).
- [۵۷] Girbau-Llistuella, F., Díaz-González, F., Sumper, A., Gallart-Fernández, R., & Heredero-Peris, D. (۲۰۱۸). Smart grid architecture for rural distribution networks: application to a Spanish Pilot Network. *Energies*, ۱۱(۴), ۸۴۴.
- [۵۸] Weitzel, T., & Glock, C. H. (۲۰۱۹). Scheduling a storage-augmented discrete production facility under incentive-based demand response. *International Journal of Production Research*, ۵۷(۱), ۲۵۰-۲۷۰.
- [۵۹] Zou, H., Mao, S., Wang, Y., Zhang, F., Chen, X., & Cheng, L. (۲۰۱۹). A survey of energy management in interconnected multi-microgrids. *IEEE Access*, ۷, ۷۲۱۵۸-۷۲۱۶۹.
- [۶۰] Xu, F., Wu, W., Zhao, F., Zhou, Y., Wang, Y., Wu, R., ... & Jiang, S. (۲۰۱۹). A micro-market module design for university demand-side management using self-crossover genetic algorithms.
- [۶۱] Sekhara, P. C. (۲۰۲۱). Design of Supercapacitor Energy Storage System. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education Vol*, 12(۱۰), ۶۶۹۹-۶۷۰۶.
- [۶۲] Fares, A. M., Kippke, M., Rashed, M., Klumpner, C., & Bozhko, S. (۲۰۲۱). Development of a smart supercapacitor energy storage system for aircraft electric power systems. *Energies*, 14(۲۳), ۸۰۵۶.
- [۶۳] Navarro, G., Blanco, M., Torres, J., Nájera, J., Santiago, Á., Santos-Herran, M., ... & Lafoz, M. (۲۰۲۱). Dimensioning methodology of an energy storage system based on supercapacitors for grid code compliance of a wave power plant. *Energies*, 14(۴), ۹۸۵.
- [۶۴] Worku, M. Y., Abido, M. A., & Irvani, R. (۲۰۱۶). Power fluctuation minimization in grid connected photovoltaic using supercapacitor energy storage system. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 8(۱).
- [۶۵] Khalid, M. (۲۰۱۹). A review on the selected applications of battery-supercapacitor hybrid energy storage systems for microgrids. *Energies*, 12(۲۳), ۴۵۵۹.
- [۶۶] Elmorshedy, M. F., Elkadeem, M. R., Kotb, K. M., Taha, I. B., & Mazzeo, D. (۲۰۲۱). Optimal design and energy management of an isolated fully renewable energy system integrating batteries and supercapacitors. *Energy Conversion and Management*, 245, ۱۱۴۵۸۴.
- [۶۷] Arun, M., Samal, S., Barik, D., Chandran, S. S., Tudu, K., & Praveenkumar, S. (۲۰۲۵). Integration of energy storage systems and grid modernization for reliable urban power management toward future energy sustainability. *Journal of Energy Storage*, 114, ۱۱۵۸۳۰.
- [۶۸] Gulzar, M. M., Sibtain, D., Alqahtani, M., Alismail, F., & Khalid, M. (۲۰۲۵). Load frequency control progress: A comprehensive review on recent development and challenges of modern power systems. *Energy Strategy Reviews*, 57, ۱۰۱۶۰۴.

- [۶۹] Tubis, A. A., & Poturaj, H. (۲۰۲۰). Energy Supply Chains in the Digital Age: A Review of Current Research and Trends. *Energies*, 18(۲), ۴۳۰.
- [۷۰] Zhang, Y., Wu, Y., Liu, Y., Sun, B., Yang, J., Thotakura, N. L., ... & Liu, Y. (۲۰۲۰). Pulsar's Application in Energy Systems: Review of Current Status, Challenges, and Opportunities. *Energies*, 18(۴), ۸۲۸.
- [۷۱] Ajao, Q., & Sadeeq, L. (۲۰۲۰). A Rapidly Dispatchable Energy Strategy Utilizing Electric Vehicles with Energy Storage Systems (EV-ESS) to Enhance Grid Redundancy. *Smart Grids and Sustainable Energy*, 10(۱), ۱-۹.
- [۷۲] Islam, M. M., Yu, T., Giannoccaro, G., Mi, Y., La Scala, M., Rajabi, M. N., & Wang, J. (۲۰۲۲). Improving reliability and stability of the power systems: A comprehensive review on the role of energy storage systems to enhance flexibility. *IEEE Access*.
- [۷۳] Togun, H., Aljibori, H. S. S., Abed, A. M., Biswas, N., Alshamkhani, M. T., Niyas, H., ... & Paul, D. (۲۰۲۴). A review on recent advances on improving fuel economy and performance of a fuel cell hybrid electric vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 89, ۲۲-۴۷.
- [۷۴] Velasquez, W., Moreira-Moreira, G. Z., & Alvarez-Alvarado, M. S. (۲۰۲۴). Smart grids empowered by software-defined network: A comprehensive review of advancements and challenges. *IEEE Access*.
- [۷۵] Yang, D., Lv, Y., Ji, M., & Zhao, F. (۲۰۲۴). Evaluation and economic analysis of battery energy storage in smart grids with wind-photovoltaic. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 19, ۱۸-۲۳.
- [۷۶] Sharma, P., Salkuti, S. R., & Kim, S. C. (۲۰۲۲). Advancements in energy storage technologies for smart grid development. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 12(۴), ۳۴۲۱.

۷۷. اسماعیلی، ز.، نام آور زینی وندی، م.، عنانی، ا. & احسان، م. (۱۴۰۱). مروری بر برنامه ریزی سیستم های ذخیره ساز انرژی در شبکه های توزیع فعال و کاربردهای آن. مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۱۹(۴)، ۲۷۵-۲۵۵.

۷۸. لطفی، ح.، قاضی، ر. & نقیبی سیستمی، م. ب. (۱۳۹۸). استراتژی بهینه مدیریت انرژی در شبکه های توزیع هوشمند با در نظر گرفتن اثر منابع تولید پراکنده و واحدهای ذخیره سازی انرژی. کیفیت و بهره وری در صنعت برق ایران، ۸(۳)، ۲۹-۲۲.

۷۹. شیبانی، م. ر.، زراعتی، م. & جباری، ف. (۱۴۰۳). برنامه ریزی توسعه ذخیره ساز های انرژی قابل حمل به منظور بهبود تاب آوری شبکه های توزیع. فناوری های نوین مهندسی برق در سیستم انرژی سبز، ۳(۱)، ۳۴-۱۷.

۸۰. فرجامی پور، م. & شیوایی، م. (۱۴۰۴). جایابی بهینه ایستگاه های شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی متصل به شبکه توزیع انرژی الکتریکی در حضور منابع انرژی تجدید پذیر با در نظر گرفتن برنامه های پاسخگویی تقاضا مبتنی بر قیمت. فناوری های نوین مهندسی برق در سیستم انرژی سبز، ۴(۲)، ۸۷-۶۷.

## A Systematic Review of Recent Advances in Energy Storage Systems for Smart Grids and Sustainable Security in Iran and Its Implementation in the Provinces of the Country

Alireza Joshan 

Master of Science in Electrical Power Engineering, Faculty of Electrical Engineering, University of Guilan, Guilan, Iran, Alireza.joshan.guilan@gmail.com

### Abstract

With the acceleration of renewable energy deployment and the digitalization of power grids, Energy Storage Systems (ESS) have become a turning point in the evolution of smart grids. This scientific-research article, through a systematic and analytical review of ۵۰ top international and domestic sources, explores trends, technologies, reliability-based maintenance (RCM) models, integration solutions, successful policies, and local challenges of ESS implementation in Iran and the world. Data analysis explains the technological advancement of lithium-ion batteries, the pivotal role of smartization, complex economic layers, risks, operating models and standardization requirements with objective evidence. Using optimization tools and global best practices, the requirements for realizing sustainable ESS, the recycling challenge, the future of the market and the nexus of policy, technology and society are examined. The results highlight the expansion of advanced maintenance models, the necessity of government support policies and the development of an innovation ecosystem, and provide operational suggestions for policymakers, industry and future research.

**Keywords:** Energy storage systems, smart grid, lithium-ion battery, energy policy, recycling of new technologies, sustainable security