

جمهوری اسلامی ایران
سازمان برنامه و بودجه کشور

راهنمای ذخیره‌سازهای انرژی

بخش ششم: مستندات و مطالعات ذخیره‌سازهای انرژی

ضابطه عمومی شماره ۶-۸۴۰

آخرین ویرایش: ۲۰-۰۳-۱۴۰۰

پژوهشگاه نیرو

معاونت فنی، امور زیربنایی و تولیدی

گروه برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت

امور نظام فنی و اجرایی، مشاورین و پیمانکاران

<https://nri.ac.ir>

nezamfanni.ir



omoorepeyman.ir

اصلاح مدارک فنی

خواننده گرامی

امور نظام فنی و اجرایی، مشاورین و پیمانکاران معاونت فنی، امور زیربنایی و تولیدی سازمان برنامه و بودجه کشور، با استفاده از نظر کارشناسان برجسته مبادرت به تهیه این ضابطه کرده و آن را برای استفاده به جامعه مهندسی کشور عرضه نموده است. با وجود تلاش فراوان، این اثر مصون از ایرادهایی نظیر غلط‌های مفهومی، فنی، ابهام، ابهام و اشکالات موضوعی نیست.

از این‌رو، از شما خواننده گرامی صمیمانه تقاضا دارد در صورت مشاهده هرگونه ایراد و اشکال فنی، مراتب را به صورت زیر گزارش فرمایید:

- ۱- در سامانه مدیریت دانش اسناد فنی و اجرایی (سما) ثبت‌نام فرمایید: sama.nezamfanni.ir
 - ۲- پس از ورود به سامانه سما و برای تماس احتمالی، نشانی خود را در بخش پروفایل کاربردی تکمیل فرمایید.
 - ۳- به بخش نظرخواهی این ضابطه مراجعه فرمایید.
 - ۴- شماره بند و صفحه موضوع مورد نظر را مشخص کنید.
 - ۵- ایراد مورد نظر را به صورت خلاصه بیان دارید.
 - ۶- در صورت امکان متن اصلاح شده را برای جایگزینی ارسال نمایید.
- کارشناسان این امور نظرهای دریافتی را به دقت مطالعه نموده و اقدام مقتضی را معمول خواهند داشت. پیشاپیش از همکاری و دقت نظر جنابعالی قدردانی می‌شود.

نشانی برای مکاتبه : تهران، میدان بهارستان، خیابان صفی‌علی‌شاه، مرکز تلفن ۳۳۲۷۱، سازمان برنامه و بودجه،

امور نظام فنی و اجرایی، مشاورین و پیمانکاران

Email: nezamfanni@mporg.ir

web: nezamfanni.ir



omoorepeyman.ir

پیشگفتار

نظام فنی اجرایی یکپارچه کشور (مصوبه شماره ۲۵۲۵۴/ت/۵۷۶۹۷ هـ مورخ ۱۴۰۰/۰۳/۰۸ هیأت وزیران) در چهارچوب ماده ۳۴ قانون احکام دائمی برنامه‌های توسعه، به‌کارگیری معیارها، استانداردها و ضوابط فنی در مراحل تهیه و اجرای طرح و نیز توجه لازم به هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری در قیمت تمام شده طرح‌ها را مورد تأکید جدی قرار داده است و این امور به استناد ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه و نظام فنی اجرایی کشور، وظیفه تهیه و تدوین ضوابط و معیارهای فنی طرح‌های توسعه‌ای کشور را به عهده دارد.

در راستای فراهم نمودن مشخصات فنی و اجرایی طراحی، ساخت و بکارگیری ذخیره‌سازهای انرژی، مجموعه ضوابط ۱-۸۴۰ تا ۶-۸۴۰ تهیه و تنظیم شده است. ضابطه اول از این مجموعه، طراحی، ساخت و بکارگیری ذخیره‌سازهای الکتریکی، ضابطه دوم ذخیره‌سازهای مکانیکی، ضابطه سوم ذخیره‌سازهای الکتروشیمیایی، ضابطه چهارم ذخیره‌سازهای حرارتی، ضابطه پنجم ذخیره‌سازهای شیمیایی و ضابطه ششم مستندات و مطالعات ذخیره‌سازهای انرژی را شامل می‌شوند. این ضابطه، ضابطه ششم از موارد صدرالذکر است.

در این ضابطه در فصل اول به بررسی ذخیره‌سازی انرژی و مفاهیم مربوطه پرداخته می‌شود. در فصل دوم به بررسی روش‌های الکتریکی ذخیره‌سازی انرژی و تکنولوژی‌های مربوطه، در فصل سوم به بررسی روش‌های مکانیکی ذخیره‌سازی انرژی و تکنولوژی‌های مربوطه، در فصل چهارم به بررسی روش الکتروشیمیایی ذخیره‌سازی انرژی و تکنولوژی‌های مربوطه، در فصل پنجم به بررسی روش‌های حرارتی ذخیره‌سازی انرژی و تکنولوژی‌های مربوطه و در فصل ششم به بررسی روش‌های شیمیایی ذخیره‌سازی انرژی و تکنولوژی‌های مربوطه پرداخته می‌شود. فصل هفتم به مقایسه روش‌های ذخیره‌سازی انرژی اختصاص دارد. در پایان نیز منابع و مراجع مورد استفاده معرفی خواهند شد.



تهیه و کنترل « تهیه و تدوین راهنمای ذخیره‌سازهای انرژی »

[ضابطه شماره ۶-۸۴۰]

مجری: پژوهشگاه نیرو

مدیر پروژه: امید شاه‌حسینی پژوهشگاه نیرو کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت

اعضای گروه تهیه‌کننده:

امید شاه‌حسینی پژوهشگاه نیرو کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت
سید سعید محتوی‌پور دانشگاه گیلان دکترای مهندسی برق - قدرت

اعضای گروه تاییدکننده: (به ترتیب حروف الفبا)

مرتضی ترابی پژوهشگاه نیرو کارشناسی ارشد مهندسی مواد
نیکی مسلمی پژوهشگاه نیرو کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت
زهره مدیحی بیدگلی پژوهشگاه نیرو کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت

هدایت و راهبری (سازمان برنامه و بودجه)

فرزانه آقارمضانعلی	رئیس گروه امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران
علیرضا توتونچی	معاون امور نظام فنی و اجرایی، مشاورین و پیمانکاران
محمد رضا طلاکوب	کارشناس امور نظام فنی و اجرایی، مشاورین و پیمانکاران
سید وحیدالدین رضوانی	کارشناس امور نظام فنی و اجرایی، مشاورین و پیمانکاران
علیرضا فخرحیمی	کارشناس امور نظام فنی و اجرایی، مشاورین و پیمانکاران



فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱	مقدمه.....
۳	فصل ۱.....
۴	مقدمه.....
۴	۱-۱- ساختار و مشخصات سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی.....
۴	۱-۱-۱- ساختار و روابط انرژی حاکم بر سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی.....
۶	۱-۱-۲- مشخصات سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی.....
۶	۱-۲-۱- ظرفیت نامی.....
۶	۱-۲-۲- ظرفیت موجود.....
۷	۱-۲-۳- عمق دشارژ یا نرخ انتقال توان.....
۷	۱-۲-۴- محدوده توان (Power Rating or Power Range).....
۷	۱-۲-۵- محدوده انرژی (Energy Rating or Energy Range).....
۷	۱-۲-۶- چگالی انرژی.....
۷	۱-۲-۷- چگالی توان.....
۸	۱-۲-۸- زمان دشارژ.....
۸	۱-۲-۹- دوره ذخیره‌سازی.....
۸	۱-۲-۱۰- زمان پاسخگویی یا پاسخ‌دهی.....
۸	۱-۲-۱۱- راندمان یا بازده.....
۹	۱-۲-۱۲- تداوم.....
۱۰	۱-۲-۱۳- عدم وابستگی.....
۱۰	۱-۲-۱۴- اثر حافظه (Memory Effect).....
۱۰	۱-۲-۱۵- هزینه سرمایه‌گذاری ذخیره‌ساز.....
۱۱	۱-۲-۱۶- امکان‌سنجی و تطابق با منابع تولید.....
۱۱	۱-۲-۱۷- دشارژ اتوماتیک.....
۱۱	۱-۲-۱۸- محدودیت‌های عملیاتی.....
۱۱	۱-۲-۱۹- قابلیت اطمینان.....

۱۲	۱-۱-۲۰- سایر مشخصات ذخیره‌سازها.....
۱۲	۲-۱- انواع روش‌های ذخیره‌سازی انرژی.....
۱۲	۱-۲-۱- طبقه‌بندی انواع روش‌های ذخیره‌سازی انرژی.....
۱۶	۳-۱- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری.....
۱۷	فصل ۲.....
۱۸	مقدمه.....
۱۸	۱-۲- خازن و انواع آن.....
۱۹	۱-۱-۲- سوپر خازن‌ها.....
۲۰	۲-۱-۱-۱- اجزاء و نحوه کارکرد خازن‌های دولایه الکترواستاتیک.....
۲۱	۲-۱-۱-۲- مشخصات و ویژگی‌های خازن‌های دولایه الکترواستاتیک.....
۲۲	۳-۱-۱-۲- اجزاء و نحوه کارکرد شبه‌خازن‌ها.....
۲۴	۴-۱-۱-۲- مشخصات و ویژگی‌های شبه‌خازن‌ها.....
۲۴	۵-۱-۱-۲- اجزاء و نحوه کارکرد خازن‌های ترکیبی.....
۲۶	۶-۱-۱-۲- مشخصات و ویژگی‌های خازن‌های ترکیبی.....
۲۶	۷-۱-۱-۲- الکترولیت و سایر اجزاء سوپر خازن‌ها.....
۲۷	۸-۱-۱-۲- مقایسه انواع سوپر خازن‌ها.....
۲۹	۹-۱-۱-۲- مزایا و معایب سوپر خازن‌ها.....
۳۰	۱۰-۱-۱-۲- کاربرد سوپر خازن‌ها.....
۳۰	۱۱-۱-۱-۲- تاریخچه پیدایش و تکامل سوپر خازن‌ها.....
۳۴	۲-۲- کوپل‌های مغناطیسی ابررسانا.....
۳۴	۱-۲-۲- خاصیت ابررسانایی.....
۳۴	۲-۲-۲- انواع ابررساناها.....
۳۵	۳-۲-۲- نحوه عملکرد کوپل‌های مغناطیسی ابررسانا.....
۳۶	۴-۲-۲- مشخصات و ویژگی‌های کوپل‌های مغناطیسی ابررسانا.....
۳۷	۵-۲-۲- اجزاء تشکیل دهنده کوپل‌های مغناطیسی ابررسانا.....
۳۹	۶-۲-۲- مزایا و معایب کوپل‌های مغناطیسی ابررسانا.....
۳۹	۷-۲-۲- کاربرد کوپل‌های مغناطیسی ابررسانا.....
۴۰	۸-۲-۲- تاریخچه پیدایش و تکامل SMES ها.....
۴۰	۳-۲- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری.....

فصل ۳.....	۴۱
مقدمه.....	۴۲
۳-۱- سیستم‌های هوای فشرده.....	۴۲
۳-۱-۱- اجزاء و نحوه عملکرد سیستم‌های هوای فشرده.....	۴۲
۳-۱-۲- انواع سیستم‌های ذخیره‌ساز هوای فشرده.....	۴۴
۳-۱-۲-۱- کلاسه‌بندی سیستم‌های ذخیره‌ساز هوای فشرده بر اساس نوع مخزن.....	۴۴
۳-۱-۲-۲- کلاسه‌بندی سیستم‌های ذخیره‌ساز هوای فشرده بر اساس فرآیندهای ترمودینامیکی.....	۴۵
۳-۱-۳- مشخصات و ویژگی‌های سیستم‌های ذخیره‌سازی هوای فشرده.....	۴۷
۳-۱-۳-۱- مشخصات و ویژگی‌های سیستم‌های ذخیره‌سازی هوای فشرده مجهز به مخازن زیرزمینی.....	۴۸
۳-۱-۳-۲- مشخصات و ویژگی‌های سیستم‌های ذخیره‌سازی هوای فشرده مجهز به مخازن روزمینی.....	۴۸
۳-۱-۴- کاربرد سیستم‌های ذخیره‌ساز هوای فشرده.....	۵۰
۳-۱-۵- تاریخچه پیدایش و تکامل سیستم‌های ذخیره‌ساز هوای فشرده.....	۵۰
۳-۲- سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای.....	۵۱
۳-۲-۱- اجزاء و نحوه عملکرد سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای.....	۵۱
۳-۲-۲- کلاسه‌بندی انواع نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای.....	۵۲
۳-۲-۳- ترکیب نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای با سایر منابع تولید برق.....	۵۲
۳-۲-۴- مشخصات و ویژگی‌های نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای.....	۵۳
۳-۲-۵- تاریخچه پیدایش و تکامل سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای.....	۵۴
۳-۳- چرخ طیار یا فلاپیول.....	۵۶
۳-۳-۱- نحوه عملکرد چرخ طیار.....	۵۶
۳-۳-۲- اجزاء چرخ طیار.....	۵۶
۳-۳-۳- انواع چرخ طیار یا فلاپیول.....	۵۷
۳-۳-۴- مشخصات و ویژگی‌های چرخ طیار.....	۵۷
۳-۳-۵- کاربردهای چرخ طیار.....	۵۸
۳-۳-۶- تاریخچه پیدایش و تکامل چرخ طیار.....	۵۹
۳-۴- سیستم‌های مبتنی بر پتانسیل گرانشی.....	۶۰
۳-۴-۱- اجزاء و نحوه عملکرد سیستم‌های مبتنی بر پتانسیل گرانشی.....	۶۰
۳-۴-۲- ویژگی‌ها و مشخصات سیستم‌های مبتنی بر پتانسیل گرانشی.....	۶۱

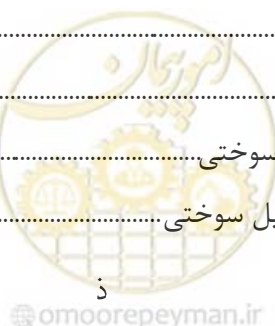
۶۱	۳-۴-۳- تاریخچه پیدایش و تکامل سیستم‌های مبتنی بر پتانسیل گرانشی.....
۶۲	۵-۳- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری.....
۶۳	فصل ۴.....
۶۴	مقدمه.....
۶۴	۱-۴- باتری‌های قابل شارژ.....
۶۵	۲-۴- باتری‌های لیتیم-یونی.....
۶۵	۱-۲-۴- اجزاء و نحوه کارکرد باتری‌های لیتیم-یونی.....
۶۶	۲-۲-۴- انواع باتری‌های لیتیم-یونی.....
۶۷	۳-۲-۴- مشخصات و ویژگی‌های باتری‌های لیتیم-یونی.....
۶۹	۴-۲-۴- مزایا و معایب باتری‌های لیتیم-یونی.....
۷۰	۵-۲-۴- کاربرد باتری‌های لیتیم-یونی.....
۷۰	۶-۲-۴- تاریخچه پیدایش و تکامل باتری‌های لیتیم-یونی.....
۷۲	۳-۴- باتری‌های سرب-اسیدی.....
۷۲	۱-۳-۴- اجزاء و نحوه کارکرد باتری‌های سرب-اسیدی.....
۷۵	۲-۳-۴- انواع باتری‌های سرب-اسیدی.....
۷۷	۳-۳-۴- مشخصات و ویژگی‌های باتری‌های سرب-اسیدی.....
۷۸	۴-۳-۴- کاربرد باتری‌های سرب-اسیدی.....
۷۸	۵-۳-۴- تاریخچه پیدایش و تکامل باتری‌های سرب-اسیدی.....
۸۰	۴-۴- باتری جریان‌ی.....
۸۰	۱-۴-۴- اجزاء و نحوه کارکرد باتری‌های جریان‌ی.....
۸۱	۲-۴-۴- انواع باتری‌های جریان‌ی.....
۸۲	۱-۲-۴-۴- باتری‌های اکسایشی-کاهش‌ی و انادیومی.....
۸۲	۱-۱-۲-۴-۴- اجزاء و نحوه کارکرد باتری‌های اکسایشی-کاهش‌ی و انادیومی.....
۸۳	۲-۱-۲-۴-۴- مشخصات و ویژگی‌های باتری‌های اکسایشی-کاهش‌ی و انادیومی.....
۸۴	۳-۱-۲-۴-۴- مزایا و معایب باتری‌های اکسایشی-کاهش‌ی و انادیومی.....
۸۴	۴-۱-۲-۴-۴- کاربرد باتری‌های اکسایشی-کاهش‌ی و انادیومی.....
۸۵	۲-۲-۴-۴- باتری‌های هیبریدی روی-بروم.....
۸۵	۱-۲-۲-۴-۴- اجزاء و نحوه کارکرد باتری‌های هیبریدی روی-بروم.....
۸۶	۲-۲-۲-۴-۴- مشخصات و ویژگی‌های باتری‌های هیبریدی روی-بروم.....

۸۷	۴-۲-۳-مزایا و معایب باتری‌های هیبریدی روی- بروم.....
۸۷	۴-۳-تاریخچه پیدایش و تکامل باتری‌های جریانی.....
۸۸	۴-۵-باتری‌های مبتنی بر نیکل یا پایه نیکل.....
۸۸	۴-۵-۱-انواع باتری‌های مبتنی بر نیکل یا پایه نیکل.....
۸۸	۴-۵-۲-باتری‌های نیکل-کادمیم.....
۸۸	۴-۵-۲-۱-اجزاء و نحوه عملکرد باتری‌های نیکل-کادمیم.....
۸۹	۴-۵-۲-۲-مشخصات و ویژگی‌های باتری‌های نیکل-کادمیم.....
۹۰	۴-۵-۲-۳-کاربرد باتری‌های نیکل-کادمیم.....
۹۱	۴-۵-۲-۴-تاریخچه پیدایش و تکامل باتری‌های نیکل-کادمیم.....
۹۱	۴-۵-۳-باتری‌های نیکل-هیدرید فلز.....
۹۱	۴-۵-۳-۱-اجزاء و نحوه عملکرد باتری‌های نیکل-هیدرید فلز.....
۹۳	۴-۵-۳-۲-مشخصات و ویژگی‌های باتری‌های نیکل-هیدرید فلز.....
۹۴	۴-۵-۳-۳-کاربرد باتری‌های نیکل-هیدرید فلز.....
۹۴	۴-۵-۳-۴-تاریخچه پیدایش و تکامل باتری‌های نیکل-هیدرید فلز.....
۹۵	۴-۵-۴-باتری‌های دما بالا یا باتری‌های بتا سدیم.....
۹۶	۴-۵-۴-۱-اجزاء و نحوه عملکرد باتری‌های سدیم-سولفور.....
۹۸	۴-۵-۴-۲-مشخصات و ویژگی‌های باتری‌های سدیم-سولفور.....
۹۹	۴-۵-۴-۳-کاربردهای باتری‌های سدیم-سولفور.....
۹۹	۴-۵-۴-۴-تاریخچه پیدایش و تکامل باتری‌های سدیم-سولفور.....
۱۰۱	۴-۵-۴-۵-اجزاء و نحوه عملکرد باتری‌های سدیم-فلز-کلرید.....
۱۰۲	۴-۵-۴-۶-مشخصات و ویژگی‌های باتری‌های سدیم-فلز-کلرید.....
۱۰۴	۴-۵-۴-۷-کاربرد باتری‌های سدیم-فلز-کلرید.....
۱۰۴	۴-۵-۴-۸-تاریخچه پیدایش و تکامل باتری‌های سدیم-فلز-کلرید.....
۱۰۵	۴-۶-مقایسه انواع باتری‌ها.....
۱۰۹	۴-۷-جمع‌بندی و نتیجه‌گیری.....
۱۱۰	فصل ۵.....
۱۱۱	مقدمه.....
۱۱۱	۵-۱-ذخیره‌سازی انرژی حرارتی.....



- ۵-۲- ذخیره‌سازی گرمای محسوس..... ۱۱۲
- ۵-۲-۱- مواد ذخیره گرمای محسوس..... ۱۱۲
- ۵-۲-۱-۱- جامدات مورد استفاده در روش ذخیره‌سازی گرمای محسوس..... ۱۱۲
- ۵-۲-۱-۲- مایعات مورد استفاده در روش ذخیره‌سازی گرمای محسوس..... ۱۱۴
- ۵-۲-۲- فناوری‌های مورد استفاده در روش ذخیره‌سازی گرمای محسوس..... ۱۱۵
- ۵-۲-۲-۱- مخازن ذخیره‌سازی حرارتی با استفاده از آب..... ۱۱۵
- ۵-۲-۲-۲- ذخیره‌ساز حرارتی با بستر سنگی..... ۱۱۶
- ۵-۲-۲-۳- دریاچه یا حوضچه خورشیدی..... ۱۱۷
- ۵-۲-۲-۴- ذخیره‌سازی حرارتی در مصالح ساختمانی..... ۱۱۹
- ۵-۲-۲-۴-۱- ذخیره‌سازی حرارتی در صفحات مورد استفاده در کف و سقف ساختمان..... ۱۲۰
- ۵-۲-۲-۴-۲- ذخیره‌سازی حرارتی در صفحات توخالی مورد استفاده در سقف..... ۱۲۰
- ۵-۲-۲-۴-۳- ذخیره‌سازی حرارتی با استفاده از کویل‌های قرار داده شده در اجزای ساختمان..... ۱۲۲
- ۵-۲-۲-۴-۴- ذخیره‌سازی گرمای محسوس با استفاده از سیستم گرمایش برقی..... ۱۲۲
- ۵-۲-۲-۵- ذخیره‌ساز حرارتی خورشیدی پسیو (غیرفعال)..... ۱۲۲
- ۵-۲-۲-۶- ذخیره‌ساز حرارتی خورشیدی اکتیو (فعال)..... ۱۲۳
- ۵-۲-۳- ذخیره‌سازی گرمای محسوس در دماهای بالا..... ۱۲۴
- ۵-۳- ذخیره‌سازی گرمای نهان..... ۱۲۵
- ۵-۳-۱- انواع روش‌های ذخیره‌سازی گرمای نهان..... ۱۲۷
- ۵-۳-۲- مواد مورد استفاده در سیستم‌های ذخیره‌سازی گرمای نهان و ویژگی‌های آنها..... ۱۲۷
- ۵-۳-۲-۱- انواع مواد تغییر فازدهنده و ویژگی‌های آنها..... ۱۲۸
- ۵-۳-۲-۱-۱- مواد تغییر فازدهنده ارگانیک..... ۱۲۹
- ۵-۳-۲-۱-۲- مواد تغییر فازدهنده غیرارگانیک..... ۱۳۰
- ۵-۳-۲-۱-۳- مواد تغییر فازدهنده زود ذوب شونده..... ۱۳۰
- ۵-۳-۲-۲- فرم‌های گوناگون مواد تغییر فازدهنده..... ۱۳۰
- ۵-۳-۳- سیستم‌های ذخیره‌سازی گرمای نهان پسیو (غیرفعال)..... ۱۳۱
- ۵-۳-۳-۱- سیستم‌های ذخیره‌سازی گرمای نهان پسیو با استفاده از PCM‌های بارگذاری شده در مصالح ساختمانی..... ۱۳۱
- ۵-۳-۳-۲- سیستم‌های ذخیره‌سازی گرمای نهان پسیو با استفاده از PCM‌ها به عنوان مصالح ساختمانی..... ۱۳۲
- ۵-۳-۴- سیستم‌های ذخیره‌سازی گرمای نهان اکتیو (فعال)..... ۱۳۴

۱۳۵.....	۱-۴-۳-۵- سیستم‌های سرمایش آزاد مبتنی بر PCM
۱۳۶.....	۲-۴-۳-۵- سیستم‌های سرمایش آسایشی مبتنی بر PCM
۱۳۷.....	۳-۴-۳-۵- سیستم‌های ذخیره‌سازی یخ.....
۱۳۷.....	۱-۳-۴-۳-۵- سیستم ذخیره‌ساز ذوب از خارج یخ روی کویل یخ.....
۱۳۸.....	۲-۳-۴-۳-۵- سیستم ذخیره‌ساز ذوب از داخل یخ روی کویل.....
۱۳۹.....	۳-۳-۴-۳-۵- سیستم ذخیره‌سازی یخ از نوع مزرعه.....
۱۴۰.....	۴-۳-۴-۳-۵- سیستم ذخیره‌ساز پالوده یخ.....
۱۴۱.....	۵-۳-۴-۳-۵- سیستم یخ کپسول شده.....
۱۴۲.....	۴-۴-۳-۵- سیستم ذخیره‌ساز آب سرد مبتنی بر مواد تغییر فازدهنده.....
۱۴۴.....	۴-۵- ذخیره‌سازی انرژی ترموشیمیایی.....
۱۴۴.....	۱-۴-۵- مواد مورد استفاده در ذخیره‌سازی انرژی ترموشیمیایی.....
۱۴۶.....	۲-۴-۵- انواع روش‌های ذخیره‌سازی انرژی ترموشیمیایی.....
۱۴۶.....	۱-۲-۴-۵- سیستم جاذب سطحی باز.....
۱۴۸.....	۲-۲-۴-۵- سیستم جاذب سطحی بسته.....
۱۴۹.....	۳-۲-۴-۵- سیستم جاذب کامل بسته.....
۱۵۰.....	۴-۲-۴-۵- ذخیره‌ساز ترموشیمیایی جامد/ گاز.....
۱۵۱.....	۵-۲-۴-۵- انباشتگر ترموشیمیایی.....
۱۵۳.....	۶-۲-۴-۵- سیستم گرمایش از کف با ذخیره‌ساز ترموشیمیایی.....
۱۵۴.....	۷-۲-۴-۵- سیستم گرمایش ساختمان زمینی- خورشیدی با استفاده از ذخیره‌ساز ترموشیمیایی.....
۱۵۵.....	۵-۵- مقایسه انواع روش‌های ذخیره‌سازی حرارتی.....
۱۵۶.....	۶-۵- مشخصات و ویژگی‌های ذخیره‌سازهای حرارتی.....
۱۵۸.....	۷-۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری.....
۱۵۹.....	فصل ۶.....
۱۶۰.....	مقدمه.....
۱۶۰.....	۱-۶- الکترولیز آب.....
۱۶۱.....	۲-۶- اصول پیل سوختی.....
۱۶۲.....	۱-۲-۶- فرآوری سوخت مورد نیاز پیل سوختی.....
۱۶۲.....	۲-۲-۶- الکترودهای مورد استفاده در پیل سوختی.....



۱۶۲	۱-۲-۲-۶- الکتروود آند.....
۱۶۳	۲-۲-۲-۶- الکتروود کاتد.....
۱۶۳	۳-۲-۶- الکتروولیت.....
۱۶۳	۴-۲-۶- استک پیل سوختی.....
۱۶۳	۵-۲-۶- تجهیزات مبدل توان.....
۱۶۳	۳-۶- انواع پیل سوختی و کاربردهای آن.....
۱۶۴	۱-۳-۶- کاربرد پیل سوختی پلیمری.....
۱۶۵	۲-۳-۶- کاربرد پیل سوختی اسید فسفریک.....
۱۶۵	۳-۳-۶- کاربرد پیل سوختی اکسید جامد.....
۱۶۵	۴-۳-۶- کاربرد پیل سوختی کربنات مذاب.....
۱۶۶	۴-۶- مزایا و معایب پیل‌های سوختی.....
۱۶۶	۵-۶- مشخصات و ویژگی‌های پیل سوختی به عنوان ذخیره‌ساز انرژی.....
۱۶۷	۶-۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری.....
۱۶۸	فصل ۷.....
۱۶۹	مقدمه.....
۱۶۹	۱-۷- ظرفیت نصب شده از ذخیره‌سازها در کشورهای مختلف جهان.....
۱۷۱	۲-۷- مقایسه انواع ذخیره‌سازها.....
۱۷۱	۱-۲-۷- مقایسه ذخیره‌سازها از لحاظ مشخصات فنی و اقتصادی.....
۱۷۷	۲-۲-۷- مقایسه ذخیره‌سازها از لحاظ کاربرد.....
۱۷۷	۱-۲-۲-۷- خدمات مرتبط با کلاس مقیاس شبکه از ذخیره‌سازها.....
۱۷۹	۲-۲-۲-۷- خدمات مرتبط با کلاس پشت اندازه‌گیر از ذخیره‌سازها.....
۱۸۰	۳-۲-۲-۷- خدمات مرتبط با کلاس خارج از شبکه.....
۱۸۱	۴-۲-۲-۷- خدمات مرتبط با حمل و نقل.....
۱۸۱	۵-۲-۲-۷- خدمات مرتبط با کلاس حرارتی.....
۱۸۳	۳-۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری.....
۱۸۴	مراجع.....



فهرست شکل‌ها

عنوان

صفحه

- شکل ۱-۱: شماتیک تعادل انرژی در سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی..... ۴
- شکل ۲-۱: تغییرات ظرفیت، دشارژ اتوماتیک و مقاومت داخلی یک نمونه باطری نیکل-هیدرید فلز با افزایش تعداد دفعات شارژ و دشارژ [۱]..... ۶
- شکل ۳-۱: تغییرات راندمان یک انباشتگر الکتروشیمیایی بر حسب جریان و زمان دشارژ..... ۸
- شکل ۴-۱: بازده توان (شارژ و دشارژ) یک باتری سربی-اسیدی (۴۸ ولت - ۳۱۰ آمپر ساعت) بر حسب حالت شارژ و توان [۱]..... ۹
- شکل ۵-۱: تداوم یک باتری سربی-اسیدی بر حسب عمق شارژ [۱]..... ۱۰
- شکل ۶-۱: کاربرد ذخیره‌سازها با توجه به توان، انرژی ذخیره شده و عامل زمان..... ۱۲
- شکل ۷-۱: تقسیم‌بندی روش‌های ذخیره‌سازی انرژی بر اساس خروجی و قابلیت حرکت [۳]..... ۱۳
- شکل ۸-۱: تقسیم‌بندی روش‌های ذخیره‌سازی انرژی بر اساس انرژی ذخیره شده و بازه زمانی مورد استفاده..... ۱۴
- شکل ۹-۱: تقسیم‌بندی روش‌های ذخیره‌سازی انرژی با محوریت انرژی الکتریکی..... ۱۴
- شکل ۱۰-۱: تقسیم‌بندی روش‌های ذخیره‌سازی انرژی با محوریت انرژی الکتریکی به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم..... ۱۵
- شکل ۱۱-۱: یک نمونه تقسیم‌بندی از روش‌های ذخیره‌سازی انرژی..... ۱۵
- شکل ۱۲-۱: تقسیم‌بندی مرجع روش‌های ذخیره‌سازی انرژی..... ۱۶
- شکل ۱-۲: انواع سوپرکازن‌ها..... ۱۹
- شکل ۲-۲: شماتیک بروز پدیده ظرفیت دولایه در الکتروود منفی از یک خازن دولایه الکترواستاتیک..... ۲۰
- شکل ۳-۲: ساختار و نحوه عملکرد یک خازن دولایه الکترواستاتیک ایده‌آل در دو حالت شارژ و دشارژ..... ۲۱
- شکل ۴-۲: شماتیک فرایندهای شیمیایی مرتبط با شبه‌خازن‌ها به همراه معادلات هر یک از آنها..... ۲۴
- شکل ۵-۲: شماتیک انواع مختلف خازن‌های ترکیبی..... ۲۶
- شکل ۶-۲: روند توسعه و پیشرفت سوپرکازن‌ها از ابتدا تاکنون [۲۱]..... ۳۳
- شکل ۷-۲: شماتیک یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر کوئل مغناطیسی ابررسانا..... ۳۸
- شکل ۱-۳: شماتیک یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر هوای فشرده..... ۴۲
- شکل ۲-۳: شماتیک بهره‌برداری از سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده..... ۴۳
- شکل ۳-۳: مقایسه سیستم‌های ذخیره‌ساز هوای فشرده آدیاباتیک با سیستم‌های دیاباتیک..... ۴۶
- شکل ۴-۳: شماتیک سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده ایزوترمال (همدم)..... ۴۷
- شکل ۵-۳: شماتیک فشرده‌سازی و انبساط هوا در کنار آب در یک سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده نزدیک ایزوترمال..... ۴۷

- شکل ۳-۶: نحوه عملکرد نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای ۵۲
- شکل ۳-۷: مدل مفهومی نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای بادی ۵۳
- شکل ۳-۸: شماتیک چرخ طیار به همراه اجزای آن ۵۷
- شکل ۳-۹: شماتیک کارکرد مازول قدرت گرانشی به همراه اجزای آن ۶۰
- شکل ۴-۱: شماتیک نحوه کارکرد یک باتری قابل شارژ در دو مد شارژ و دشارژ ۶۵
- شکل ۴-۲: شماتیک نحوه کارکرد یک باتری لیتیم-یونی در دو مد شارژ و دشارژ ۶۶
- شکل ۴-۳: مقایسه انواع باتری‌های لیتیم-یونی مورد استفاده در خودروهای برقی با در نظر گرفتن معیارهای گوناگون ۶۸
- شکل ۴-۴: شماتیک سلول نمونه از باتری لیتیم-یونی ساخته شده توسط Yoshino ژاپنی در سال ۱۹۸۷ به همراه اجزای آن ۷۱
- شکل ۴-۵: شماتیک فرایندهای شارژ و دشارژ در یک باتری سرب-اسیدی ۷۴
- شکل ۴-۶: شماتیک یک باتری سرب-اسیدی تر به همراه اجزای آن ۷۵
- شکل ۴-۷: شماتیک یک باتری سرب-اسیدی خشک سیلندری به همراه اجزای آن ۷۶
- شکل ۴-۸: شماتیک یک پیل الکتروشیمیایی در نقش پیل سوختی یا باتری جریان به همراه اجزای آن ۸۱
- شکل ۴-۹: شماتیک یک باتری جریانی وانادیومی به همراه فرایندهای شارژ و دشارژ آن و اجزای مربوطه ۸۳
- شکل ۴-۱۰: شماتیک یک باتری روی-بروم نمونه به همراه اجزای آن ۸۶
- شکل ۴-۱۱: شماتیک باتری نیکل-کادمیم به همراه اجزای آن ۸۹
- شکل ۴-۱۲: شماتیک باتری نیکل-هیدرید فلز و نحوه دشارژ و شارژ آن ۹۳
- شکل ۴-۱۳: شماتیک فرایندهای شیمیایی مربوط به باتری سدیم-سولفور در دو حالت شارژ و دشارژ ۹۶
- شکل ۴-۱۴: شماتیک باتری سدیم-سولفور به تفکیک اجزاء به همراه مجموعه مربوطه جهت استفاده ۹۷
- شکل ۴-۱۵: روند توسعه و پیشرفت باتری‌های سدیم-سولفور به همراه کاربرد و ظرفیت‌های ساخته شده از آن طی سال‌های ۱۹۶۷ تا ۲۰۱۶ ۱۰۱
- شکل ۴-۱۶: شماتیک یک نمونه باتری ZEBRA به همراه اجزای آن ۱۰۳
- شکل ۴-۱۷: نمودار راگونی برای انواع باتری‌ها ۱۰۶
- شکل ۴-۱۸: تداوم و بازده انواع باتری‌ها ۱۰۷
- شکل ۴-۱۹: هزینه سرمایه‌گذاری به تفکیک توان و انرژی برای انواع باتری‌ها ۱۰۸
- شکل ۵-۱: شماتیک سیستم تامین انرژی در حضور ذخیره‌ساز حرارتی و نحوه کارکرد آن ۱۱۱
- شکل ۵-۲: شماتیک سیستم‌های مختلف مخازن ذخیره‌سازی حرارتی با استفاده از آب به عنوان محیط ذخیره گرما ۱۱۵
- شکل ۵-۳: شماتیک سیستم ذخیره‌ساز حرارتی با بستر سنگی و اجزای آن ۱۱۷
- شکل ۵-۴: شماتیک یک دریاچه خورشیدی به همراه لایه‌های آن ۱۱۸

- شکل ۵-۵: شماتیک یک صفحه توخالی مورد استفاده در سقف و گردش هوا در آن..... ۱۲۱
- شکل ۵-۶: شماتیک یک ذخیره‌ساز حرارتی خورشیدی پسیو..... ۱۲۳
- شکل ۵-۷: شماتیک یک ذخیره‌ساز حرارتی خورشیدی اکتیو..... ۱۲۴
- شکل ۵-۸: تغییرات دمایی ماده تغییر فازدهنده هنگام ذخیره‌سازی و آزادسازی انرژی حرارتی..... ۱۲۶
- شکل ۵-۹: رابطه بین آنتالپی و دمای ذوب PCM ها در گروه‌های مختلف..... ۱۲۹
- شکل ۵-۱۰: نمونه‌هایی از مواد تغییر فازدهنده به صورت میکروکپسول (a) و ماکروکپسول (b)..... ۱۳۱
- شکل ۵-۱۱: شماتیک استفاده از مواد تغییر فازدهنده در جداره و پوشش ساختمان..... ۱۳۲
- شکل ۵-۱۲: شماتیک استفاده از PCM ها در سقف و آجرهای حفره‌دار..... ۱۳۳
- شکل ۵-۱۳: استفاده از مواد تغییر فازدهنده در فضای بین شیشه‌های یک ساختمان..... ۱۳۴
- شکل ۵-۱۴: شماتیک نحوه کار سیستم‌های سرمایش آزاد مبتنی بر PCM با قرار گرفتن PCM ها در سقف ساختمان..... ۱۳۵
- شکل ۵-۱۵: شماتیک نحوه کار یک سیستم سرمایش آسایشی مبتنی بر PCM با استفاده از ماده تغییر فازدهنده آبکی..... ۱۳۶
- شکل ۵-۱۶: شماتیک شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز ذوب از خارج یخ روی کویل به همراه تصویری از یک نمونه موجود..... ۱۳۸
- شکل ۵-۱۷: ساختارهای متفاوت از سیستم ذخیره‌ساز ذوب از خارج یخ روی کویل ارائه شده توسط شرکت‌های سازنده..... ۱۳۸
- شکل ۵-۱۸: شماتیک شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز ذوب از داخل یخ روی کویل..... ۱۳۹
- شکل ۵-۱۹: شماتیک سیستم ذخیره‌سازی یخ از نوع مزرعه و نحوه کارکرد آن..... ۱۴۰
- شکل ۵-۲۰: شماتیک سیستم ذخیره‌ساز پالوده یخ از نوع مزرعه و نحوه کارکرد آن..... ۱۴۱
- شکل ۵-۲۱: نمونه‌هایی از کپسول‌های یخ مورد استفاده در سیستم‌های ذخیره‌سازی یخ کپسول شده..... ۱۴۲
- شکل ۵-۲۲: شماتیک فرایندهای شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌سازی یخ کپسول شده..... ۱۴۲
- شکل ۵-۲۳: شماتیک سیستم ذخیره‌ساز آب سرد مبتنی بر مواد تغییر فازدهنده به همراه فرایندهای شارژ و دشارژ مربوطه..... ۱۴۳
- شکل ۵-۲۴: شماتیک فرایند جذب (Sorption) با دو بستر جامد و مایع..... ۱۴۴
- شکل ۵-۲۵: طبقه‌بندی انواع روش‌های ذخیره‌سازی انرژی ترموشیمیایی..... ۱۴۶
- شکل ۵-۲۶: شماتیک فرایندهای شارژ و دشارژ در یک سیستم جاذب سطحی باز..... ۱۴۷
- شکل ۵-۲۷: شماتیک شارژ و دشارژ در سیستم جاذب سطحی باز مبتنی بر کلکتور خورشیدی و اجزای مورد نیاز..... ۱۴۷
- شکل ۵-۲۸: شماتیک فرایندهای شارژ و دشارژ در یک سیستم جاذب سطحی بسته..... ۱۴۸
- شکل ۵-۲۹: شماتیک شارژ و دشارژ در سیستم جاذب کامل بسته مبتنی بر کلکتور خورشیدی و اجزای مورد نیاز..... ۱۵۰
- شکل ۵-۳۰: تصاویری از اجزاء ذخیره‌ساز ترموشیمیایی جامد-گاز به همراه شماتیک کامل آن..... ۱۵۱

- شکل ۵-۳۱: شماتیک انباشتگر ترموشیمیایی و نحوه کارکرد آن..... ۱۵۲
- شکل ۵-۳۲: شماتیک سیستم گرمایش از کف با ذخیره‌ساز ترموشیمیایی و نحوه کارکرد آن..... ۱۵۳
- شکل ۵-۳۳: شماتیک سیستم گرمایش ساختمان زمینی- خورشیدی با استفاده از ذخیره‌ساز ترموشیمیایی و نحوه کارکرد آن..... ۱۵۴
- شکل ۶-۱: شماتیکی از پیل سوختی و نحوه کارکرد آن..... ۱۶۱
- شکل ۷-۱: ظرفیت نصب شده از انواع ذخیره‌سازها در مقیاس شبکه در صنعت برق جهان در سال ۲۰۱۴..... ۱۶۹
- شکل ۷-۲: ظرفیت جدیدالاحداث از ذخیره‌سازها (به غیر از تلمبه ذخیره‌ای) در کشورهای مختلف جهان طی سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۸..... ۱۷۰
- شکل ۷-۳: ظرفیت جدیدالاحداث از ذخیره‌سازها (به غیر از تلمبه ذخیره‌ای) به تفکیک در مقیاس شبکه و پشت اندازه گیر در دنیا طی سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۸..... ۱۷۰
- شکل ۷-۴: سهم هر یک از ذخیره‌سازها (به غیر از تلمبه ذخیره‌ای) از کل ظرفیت جدیدالاحداث در دنیا طی سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۶..... ۱۷۱
- شکل ۷-۵: نمودار راگونی انواع ذخیره‌سازها..... ۱۷۴
- شکل ۷-۶: تداوم و بازده انواع ذخیره‌سازها..... ۱۷۵
- شکل ۷-۷: هزینه سرمایه‌گذاری به تفکیک توان و انرژی برای انواع ذخیره‌سازها..... ۱۷۶



فهرست جداول

<u>عنوان</u>	<u>صفحه</u>
جدول ۱-۲: مشخصات و ویژگی‌های انواع مختلف سوپر خازن‌ها.....	۲۸
جدول ۱-۳: مشخصات و ویژگی‌های سیستم‌های ذخیره‌سازی هوای فشرده با مخازن زیرزمینی و روزمینی.....	۴۹
جدول ۱-۴: مشخصات فنی و اقتصادی انواع باتری‌ها.....	۱۰۵
جدول ۱-۵: مواد جامد مورد استفاده به عنوان واسط ذخیره‌سازی حرارتی و مشخصات آنها.....	۱۱۳
جدول ۲-۵: مواد مایع مورد استفاده به عنوان واسط ذخیره‌سازی حرارتی و مشخصات آنها.....	۱۱۴
جدول ۳-۵: مواد رایج مورد استفاده در ذخیره‌سازی گرمای نهان و مشخصات ترموفیزیکی آنها.....	۱۲۸
جدول ۴-۵: مشخصات برخی از مواد جاذب متداول به همراه فرایند ترموشیمیایی مربوطه.....	۱۴۵
جدول ۵-۵: مشخصات فنی انباشتگر ترموشیمیایی در دو مد کاری سرمایش و گرمایش.....	۱۵۳
جدول ۶-۵: مشخصات و ویژگی‌های انواع روش‌های ذخیره‌سازی حرارتی.....	۱۵۷
جدول ۱-۶: مشخصات فنی انواع پیل‌های سوختی.....	۱۶۴
جدول ۱-۷: مشخصات فنی و اقتصادی انواع ذخیره‌سازها.....	۱۷۲
جدول ۲-۷: مشخصات فنی و اقتصادی انواع ذخیره‌سازها.....	۱۷۳
جدول ۳-۷: تکنولوژی‌های ذخیره‌سازی قابل استفاده به منظور تامین خدمات در کلاس مقیاس شبکه از ذخیره‌سازها به همراه مشخصات فنی مربوطه.....	۱۷۹
جدول ۴-۷: فناوری‌های ذخیره‌سازی قابل استفاده به منظور تامین خدمات در کلاس پشت شبکه از ذخیره‌سازها به همراه مشخصات فنی مربوطه.....	۱۸۰
جدول ۵-۷: فناوری‌های ذخیره‌سازی قابل استفاده به منظور تامین خدمات در کلاس خارج از شبکه ذخیره‌سازها به همراه مشخصات فنی مربوطه.....	۱۸۱
جدول ۶-۷: فناوری‌های ذخیره‌سازی قابل استفاده به منظور تامین خدمات مرتبط با حمل و نقل توسط ذخیره‌سازها به همراه مشخصات فنی مربوطه.....	۱۸۱
جدول ۷-۷: فناوری‌های ذخیره‌سازی قابل استفاده به منظور تامین خدمات در کلاس حرارتی از ذخیره‌سازها و مشخصات مربوطه.....	۱۸۳



مقدمه

قبل از انقلاب صنعتی که در قرن نوزدهم میلادی به وقوع پیوست، تعادل پایداری بین عرضه و تقاضای انرژی وجود داشت. صنعتی شدن کشورها و ظهور تکنولوژی‌های نوین، تقاضا برای انرژی را به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش داد. با کشف الکتریسیته و بکارگیری آن به عنوان عامل محرک برای بسیاری از تجهیزات و فناوری‌ها، مساله تقاضای انرژی و رشد آن حالت مضاعفی به خود گرفت بخصوص اینکه در ابتدا منابع اولیه جهت تولید برق در حجم انبوه شامل منابع تجدیدپذیر نبود و سوخت‌های فسیلی شامل نفت، بنزین و گاز طبیعی به عنوان منابع اولیه تامین انرژی بکار گرفته می‌شدند. تولید برق، حرارت و سرما از منابع صدرالذکر با قابلیت اطمینان بالا صورت می‌پذیرد و در نتیجه نیاز به منابع اضافی یا کمکی نیست. در این بین منابع مذکور محدود بوده و تاثیرات منفی زیست محیطی با خود به همراه دارند. از جمله این تاثیرات می‌توان به گرمایش جهانی و اسیدی شدن آب اقیانوس‌ها اشاره کرد که این دو عامل تاثیرات مخربی بر رشد و نمو گیاهان و جانوران کره زمین دارند.

با افزایش تقاضا برای سوخت‌های فسیلی، قیمت این منابع نیز رو به افزایش نهاد و بحرانهای متفاوتی را بوجود آورد که تاثیرات اقتصادی بسیار مخربی را به همراه داشت. نخستین بحران در سال ۱۹۷۳ میلادی رخ داد که در آن قیمت نفت به یک باره دو برابر شد و واکنش‌های گسترده جهانی را در پی داشت. پس از آن زمان، کشورهای صنعتی جهان از جمله فرانسه روش‌های دیگر تولید برق از جمله تولید برق هسته‌ای را در دستور کار خود قرار دادند که تا به امروز نیز ادامه دارد. هر چند تولید برق هسته‌ای با کاهش مواردی از جمله انتشار گازهای گلخانه‌ای همراه است لکن خطر انتشار مواد رادیواکتیو در محدوده جغرافیایی گسترده ناشی از حوادث غیرمترقبه تاثیرگذار بر نیروگاه‌های هسته‌ای، همواره موضوع این نوع از تولید برق را با تردید و شک همراه ساخته است.

حوادث هسته‌ای محتمل و گرمایش جهانی در کنار قیمت قابل توجه سوخت‌های فسیلی به همراه محدودیت آنها موجب شده تا سهم انرژیهای تجدیدپذیر در تامین انرژی مورد نیاز روز به روز افزایش یابد. خورشید و باد به عنوان دو منبع بزرگ انرژی تاثیرات زیست محیطی به مراتب کمتری در مقایسه با سوخت‌های فسیلی دارند و تمام شدنی نیز نیستند. با وجود این مزایا، این منابع غیر قابل پیش‌بینی و کنترل هستند و در استفاده از آنها عدم قطعیت‌های قابل ملاحظه‌ای وجود دارد. تامین برق و حتی حرارت و سرما در مکان و زمان خاص با مقدار مشخص، چالش بزرگی است که بکارگیری منابع تجدیدپذیر را با مشکل مواجه می‌سازد. بنابر این اگر بتوان انرژی ناشی از این منابع را در زمان کم باری یا زمان مصرف کم بگونه‌ای ذخیره کرد و در زمان اوج مصرف مورد استفاده قرار داد مشکل حل می‌شود. این مزیت در کنار سایر مزیت‌ها (به عنوان مثال کنترل فرکانس در شبکه برق) موجب شده تا ذخیره‌سازهای مختلف در قالب پنج روش ذخیره سازی مشتمل بر الکتریکی، مکانیکی، الکتروشیمیایی، شیمیایی و حرارتی مورد استفاده قرار گیرند. خروجی

ذخیره‌سازها فارغ از روش ذخیره‌سازی، برق، حرارت و در برخی موارد سرما می‌باشد. در این بین خروجی برق یا حرارت و بخصوص برق بسیار بیشتر مورد توجه قرار گرفته است.

علاوه بر موارد مذکور، امکان استفاده از فناوری‌ها در حالت متحرک، فارغ از میزان نیاز آنها به انرژی ایجاب می‌کند که انرژی در منبعی ذخیره شده و سپس در حین استفاده از فناوری، بازیابی شده و مورد استفاده قرار گیرد. تصور زندگی در دنیای امروز صرفاً با تکیه بر کاربرد ثابت فناوری‌های متنوع موجود در آن (تلفن همراه، خودرو برقی و ...) عملاً امکان‌پذیر نیست و بنابر این ذخیره‌سازی انرژی بیش از پیش ضرورت دارد.

نظر به آنچه که گفته شد استفاده از ذخیره‌سازهای انرژی در جهان رو به گسترش است. در این بین، تنوع بخشی به روش‌ها و تجهیزات ذخیره‌سازی، اقتصادی نمودن ذخیره‌سازی در مقیاس‌های بزرگ و ذخیره‌سازی حداکثری در حجم و جرم مشخص اهدافی هستند که مسیر تحقیق و توسعه را در زمینه مذکور مشخص نموده‌اند. چشم‌اندازها، پیش‌بینی‌ها و بررسی وضعیت موجود نشان می‌دهد که ذخیره‌سازی و تجهیزات وابسته به آن نقش بسیار مهمی در زندگی آتی بشر و بخصوص شبکه‌های تامین انرژی خواهد داشت. نظر به فراگیر شدن استفاده از تجهیزات ذخیره‌سازی در جهان و به تبع آن ایران، نیاز به بهره‌برداری از آنها در آینده‌ای نزدیک نیز احساس خواهد شد. در کنار پژوهش‌ها و فعالیت‌های تحقیقاتی همه‌جانبه، بدیهی است یکی از اقدامات مورد نیاز برای آماده‌سازی شرایط لازم جهت استفاده بهینه و گسترده از ذخیره‌سازها، تدوین راهنمای فنی این سیستم‌هاست. با عنایت به این مسئله تهیه و تدوین راهنمای ذخیره‌سازی انرژی در این پروژه مد نظر قرار گرفته و در گام اول به منظور آشنایی هر چه بیشتر با مسئله مورد تحقیق و زوایای مختلف آن به مرور ادبیات موضوع و بررسی تجارب موجود پرداخته شده است. ضابطه پیش‌رو به مباحث مذکور در قالب ۷ فصل می‌پردازد.



فصل ۱

ذخیره‌سازی انرژی و مفاهیم مربوطه



مقدمه

در این فصل از گزارش به بررسی مفهوم ذخیره‌سازی انرژی و موارد وابسته پرداخته می‌شود. در گام اول ساختار و روابط انرژی حاکم بر سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در گام دوم مشخصات سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی شرح داده خواهد شد. گام سوم به شناخت کلی و دسته‌بندی انواع روش‌های ذخیره‌سازی انرژی اختصاص دارد. این تقسیم‌بندی به منظور ایجاد یک الگوی مرجع و ثابت جهت تدوین فصل‌های بعدی نشریه و نشریات وابسته از اهمیت خاصی برخوردار است. در صورت آشنایی با مفاهیم و اصطلاحات مرتبط با ذخیره‌سازی انرژی، می‌توان از مطالعه این فصل صرف‌نظر نمود.

۱-۱- ساختار و مشخصات سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی

۱-۱-۱- ساختار و روابط انرژی حاکم بر سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی

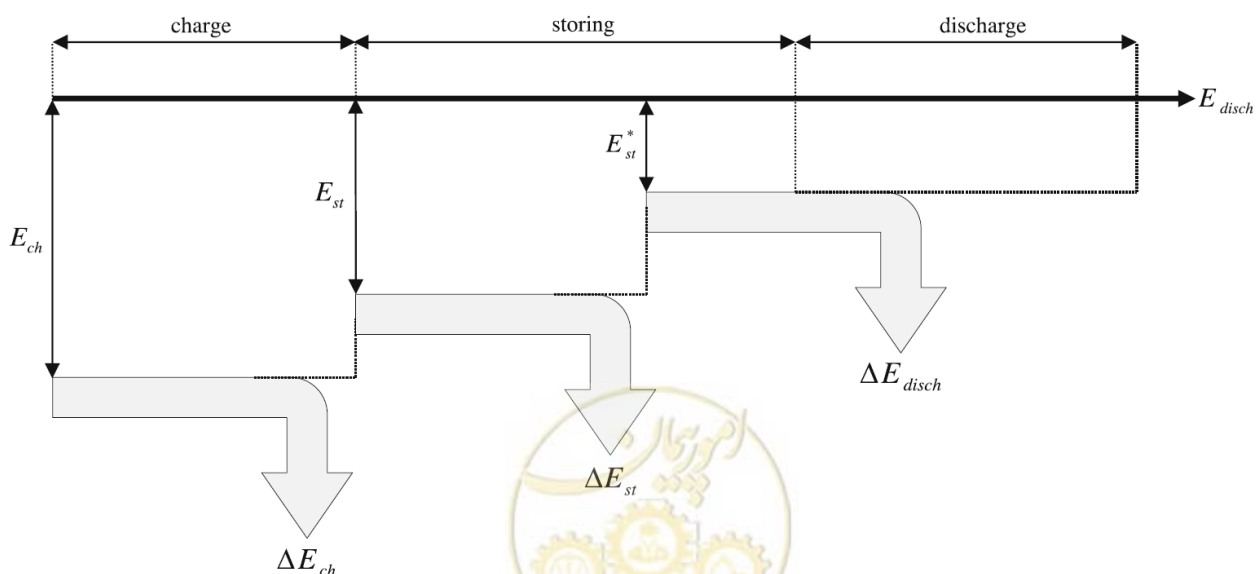
به منظور ذخیره انرژی تولید شده (به طور عمده انرژی الکتریکی)، لازم است انرژی مذکور به صورت‌های دیگری از انرژی مانند شیمیایی یا مکانیکی تبدیل شود. مطابق با تعاریف صورت گرفته، ذخیره‌سازی انرژی و بکارگیری مجدد آن شامل ۳ مرحله ذیل می‌باشد [۱]:

۱- شارژ: در این مرحله انرژی تولیدی از منبع اصلی آن جذب می‌شود.

۲- ذخیره‌سازی: در این مرحله انرژی جذب شده به صورت‌های دیگر انرژی تبدیل شده و ذخیره می‌گردد.

۳- دشارژ: در این مرحله انرژی به سیستم به صورت معکوس تزریق می‌گردد.

شماتیک ذخیره‌سازی انرژی در شکل (۱-۱) آورده شده است.



شکل ۱-۱: شماتیک تعادل انرژی در سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی

سیستم‌های ذخیره‌ساز به صورت کلی از سه جزء تشکیل می‌شوند. این سه جزء عبارتند از :

۱- ذخیره‌ساز مرکزی : مخزن، تجهیز و یا مکانی که انرژی تبدیل شده در آن ذخیره می‌شود.

۲- مبدل : واسطی بین ذخیره ساز مرکزی و سیستم ثانویه تحویل گیرنده با قابلیت انتقال دو طرفه

۳- سیستم کنترل : سیستمی که سنسورها و تجهیزات اندازه‌گیری را به منظور تعیین سطح شارژ یا دشارژ انرژی ذخیره شده بکار می‌گیرد.

با توجه به اینکه هیچ سیستم ذخیره‌سازی ایده‌آل نیست، همیشه تلفات مشخصی در مراحل مختلف فرآیند ذخیره-سازی وجود دارد. همیشه بین انرژی ذخیره شده و انرژی خروجی نهایی از ذخیره‌ساز تفاوت مشخصی مطابق رابطه (۱-۱) وجود دارد که از آن به عنوان تلفات ذخیره‌سازی یاد می‌شود.

$$E_{\text{generate}} - \Delta E_{\text{loss}} = E_{\text{out}} \quad (1-1)$$

تلفات انرژی در طی فرآیند ذخیره‌سازی با استفاده از رابطه (۲-۱) بدست می‌آید.

$$\Delta E_{\text{loss}} = \Delta E_{\text{ch}} + \Delta E_{\text{st}} + \Delta E_{\text{disch}} \quad (2-1)$$

در رابطه (۲-۱)، ΔE_{ch} تلفات مربوط به فاز شارژ، ΔE_{st} تلفات مربوط به فاز ذخیره‌سازی و ΔE_{disch} تلفات مربوط به فاز دشارژ یا تخلیه است.

برای هر یک از فازها راندمان یا بازده مشخصی وجود دارد که در روابط (۳-۱) تا (۵-۱) آورده شده است.

$$\eta_{\text{ch}} = \frac{E_{\text{st}}}{E_{\text{ch}}} \quad (3-1)$$

$$\eta_{\text{st}}(t) = \frac{E_{\text{st}}^*}{E_{\text{st}}} \quad (4-1)$$

$$\eta_{\text{dish}} = \frac{E_{\text{st}}^*}{E_{\text{dish}}} \quad (5-1)$$

در روابط (۳-۱) تا (۵-۱)، E_{st} انرژی ذخیره شده در قسمت مرکزی و E_{st}^* انرژی موجود از این بخش است. E_{ch} و E_{dish} نیز به ترتیب انرژی شارژ و دشارژ هستند. راندمان یا بازده ذخیره‌ساز بستگی به زمان ذخیره‌سازی نیز دارد. بنابراین ضروریست تا زمان در رابطه (۴-۱) لحاظ گردد. با در نظر گرفتن کلیه روابط (۱-۱) تا (۵-۱)، راندمان یا بازده کل ذخیره‌سازی انرژی مطابق رابطه (۶-۱) خواهد بود [۱].

$$\eta_{\text{st}}^{\text{total}} = \eta_{\text{ch}} \times \eta_{\text{st}}(t) \times \eta_{\text{dish}} = \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{generate}}} \quad (6-1)$$



۱-۱-۲- مشخصات سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی

در حالت کلی سه مشخصه برای سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در نظر گرفته می‌شود که عبارتند از:

۱- قابلیت تحرک (ساکن یا متحرک)

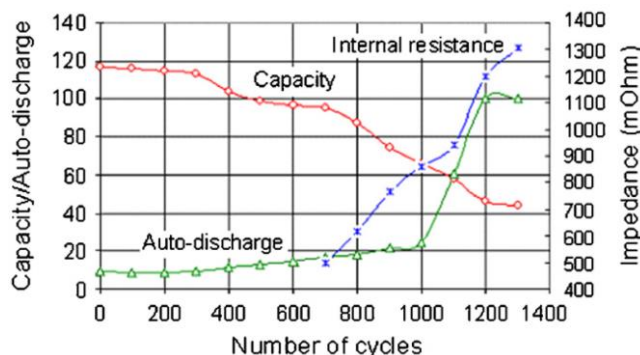
۲- مدت زمان ذخیره‌سازی (کوتاه مدت، میان مدت و بلند مدت)

۳- نوع انرژی خروجی تولیدی

در عین حال مشخصات فنی و اقتصادی مشخصی وجود دارد که مبنای انتخاب ذخیره‌سازها می‌باشد. در ادامه این مشخصات به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۲-۱-۱- ظرفیت نامی

ظرفیت نامی ذخیره‌ساز در واقع حداکثر مقدار انرژی موجود در ذخیره‌ساز پس از عمل شارژ است. با افزایش دفعات شارژ و دشارژ، به دلایل مختلف ظرفیت ذخیره‌ساز در مقایسه با حالت بدون کارکرد آن کاهش می‌یابد. ضمن اینکه نقش و تاثیر عواملی همچون حرارت نیز باید در نظر گرفته شود. واحد ظرفیت برای ذخیره‌سازها در حالت کلی وات-ساعت (Wh) و برای مواردی همچون باتری‌ها آمپر-ساعت (Ah) می‌باشد. در شکل (۱-۲) تغییرات ظرفیت، مقاومت داخلی و دشارژ اتوماتیک^۱ (خالی شدن شارژ ذخیره‌ساز با گذشت زمان بدون آنکه مورد استفاده قرار گیرد) برای یک نمونه باتری نیکل-هیدرید فلز با ولتاژ نامی ۶ ولت نشان داده شده است. واحد ظرفیت و دشارژ اتوماتیک میلی آمپر ساعت می‌باشد.



شکل ۱-۲: تغییرات ظرفیت، دشارژ اتوماتیک و مقاومت داخلی یک نمونه باتری نیکل-هیدرید فلز با افزایش تعداد دفعات شارژ و دشارژ [۱]

۱-۲-۱-۲- ظرفیت موجود

ماکزیمم توان شارژ یا دشارژ یک ذخیره‌ساز را ظرفیت موجود می‌نامند. در برخی موارد این پارامتر متوسط توان ماکزیمم شارژ و ماکزیمم توان دشارژ است. این دو پارامتر می‌توانند یکی یا متفاوت باشند.



¹ Self-Discharge or Auto-Discharge

۱-۲-۳- عمق دشارژ^۱ یا نرخ انتقال توان

فرآیند ذخیره سازی به صورت معمولی یک فرآیند کند است و در نقطه مقابل انرژی ذخیره شده باید به مراتب سریعتر تخلیه شده و تقاضای مورد نیاز را تامین کند. توان دشارژ یا خروجی یک ذخیره ساز می تواند تحت تاثیر پارامتری به نام عمق دشارژ یا نرخ انتقال توان محدود شود. رعایت نکردن محدودیت ایجاد شده بر عمر ذخیره ساز و کارکرد آن تاثیر منفی دارد. عمق دشارژ در واقع نشان دهنده میزان انرژی قابل استحصال در مقایسه با ظرفیت نامی ذخیره ساز است. این پارامتر که به صورت درصد بیان می شود در مقابل حالت شارژ^۲ قرار می گیرد بگونه ای که مجموع این دو پارامتر ۱۰۰ می شود. ظرفیت قابل استفاده یک ذخیره ساز با استفاده از رابطه (۷-۱) بدست می آید.

$$\text{Usable Capacity (Ah)} = \text{Depth of Discharge \%} \times \text{Nominal Capacity (Ah)} \quad (7-1)$$

۱-۲-۴- محدوده توان (Power Rating or Power Range)

بازه یا محدوده مشخصی از توان یا قدرت که توسط مجموعه ای از ماژول های یک ذخیره ساز قابل تحویل بوده و برای انواع مختلف ذخیره سازها متفاوت است.

۱-۲-۵- محدوده انرژی (Energy Rating or Energy Range)

بازه یا محدوده مشخصی از انرژی که ظرفیت نامی مجموعه ای از ماژول های یک ذخیره ساز در آن قرار گرفته و برای انواع مختلف ذخیره سازها متفاوت است.

۱-۲-۶- چگالی انرژی

چگالی انرژی در ذخیره سازها با دو پارامتر چگالی جرمی انرژی و چگالی حجمی انرژی شناخته می شود. ماکزیمم مقدار انرژی ذخیره شده در ذخیره ساز به ازای واحد جرم و حجم ذخیره ساز را به ترتیب چگالی جرمی انرژی و چگالی حجمی انرژی ذخیره ساز گویند. گاهی از چگالی جرمی انرژی به عنوان انرژی مخصوص نیز یاد می شود. این پارامتر برای کاربردهای متحرک از ذخیره سازها، اهمیت قابل ملاحظه ای دارد و هنگامی که ذخیره ساز با کاربرد ساکن مدنظر است، اهمیت کمتری می یابد.

۱-۲-۷- چگالی توان

چگالی توان در ذخیره سازها با دو پارامتر چگالی جرمی توان و چگالی حجمی توان شناخته می شود. ماکزیمم توان قابل استحصال از ذخیره ساز به ازای واحد جرم و حجم ذخیره ساز را به ترتیب چگالی جرمی توان و چگالی حجمی توان ذخیره ساز گویند. گاهی از چگالی جرمی توان به عنوان توان مخصوص نیز یاد می شود.

¹ Depth of Dishcharge or DoD

² State of charge or SoC

۸-۲-۱-۱- زمان دشارژ

زمان دشارژ از تقسیم انرژی ذخیره شده بر ماکزیمم توان دشارژ بدست می‌آید و به عواملی همچون عمق دشارژ و شرایط کارکرد بستگی دارد.

۹-۲-۱-۱- دوره ذخیره‌سازی

بازه زمانی مفید جهت ذخیره‌سازی انرژی به شرط آنکه تلفات خودی (اتوماتیک) موجب دشارژ بیش از حد ذخیره‌ساز نشود.

۱۰-۲-۱-۱- زمان پاسخگویی یا پاسخ‌دهی

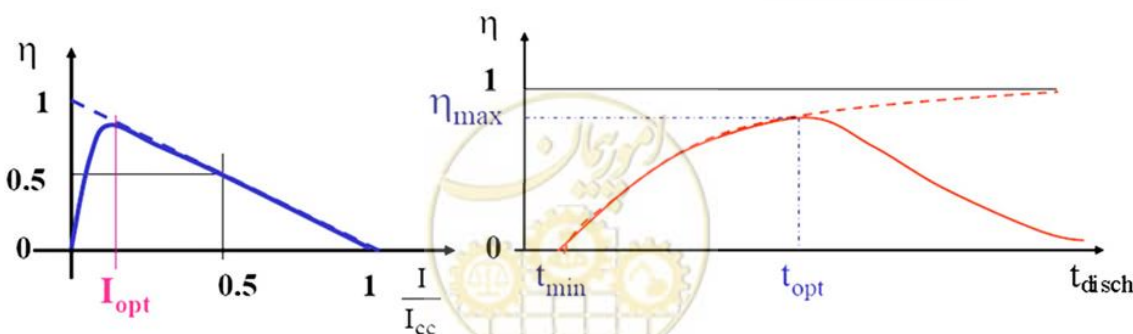
حداقل زمان لازم که پس از سپری شدن آن، ذخیره‌ساز قادر خواهد بود تقاضا را در سطح مورد نیاز به طور کامل تامین نماید.

۱۱-۲-۱-۱- راندمان یا بازده

نسبت بین انرژی آزاد شده و انرژی ذخیره شده را راندمان یا بازده ذخیره‌ساز می‌گویند. برای محاسبه راندمان یا بازده می‌توان از رابطه (۶-۱) بهره برد یا از رابطه (۸-۱) استفاده کرد.

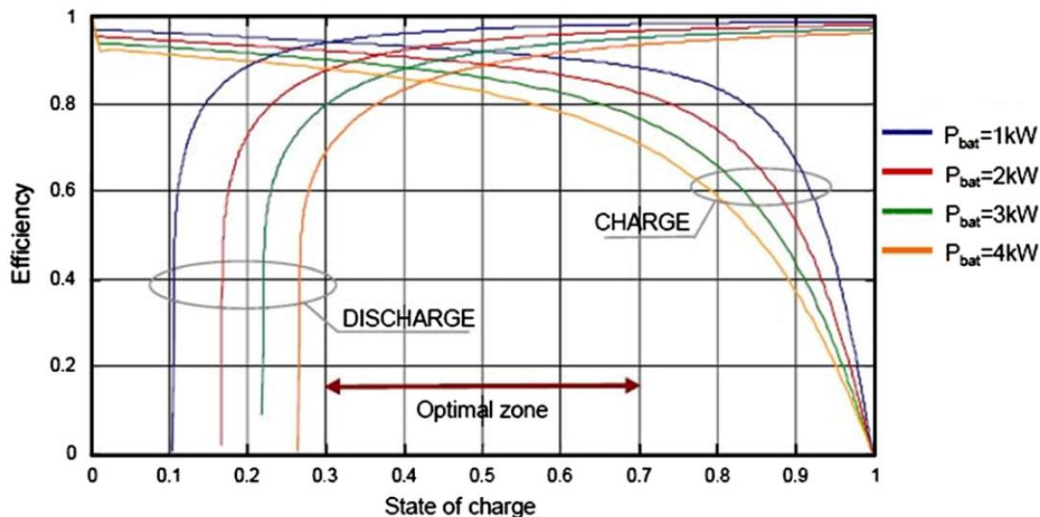
$$\eta = \frac{W_{ut}}{W_{st}} \quad (۸-۱)$$

رابطه (۸-۱) اغلب برای یک نقطه کار یا عملکرد مصداق دارد. در واقع سیستم‌های ذخیره‌ساز با توجه به نقطه کار شرایط متفاوتی دارند و تلفات شارژ، بی‌باری و دشارژ اتوماتیک با توجه به عوامل تاثیرگذار همچون دما می‌تواند متفاوت باشد. برای اینکه یک سیستم ذخیره‌ساز قابلیت رقابت داشته باشد ضروریست تا در مجموع راندمان یا بازده مناسبی داشته باشد. این بدان معنی است که برای عملکرد بهینه یک ذخیره‌ساز در نقطه کار بهینه آن، زنجیره انتقال توان مربوطه باید تلفات کم و محدودی داشته باشد و حداکثر میزان ممکن از انرژی ذخیره شده قابل بازیابی و استفاده باشد. در شکل (۳-۱) تغییرات راندمان یک انباشتگر الکتروشیمیایی برحسب زمان دشارژ و جریان خروجی از آن نشان داده شده است.



شکل ۳-۱: تغییرات راندمان یک انباشتگر الکتروشیمیایی بر حسب جریان و زمان دشارژ

همانگونه که از شکل (۳-۱) نیز پیداست با افزایش جریان و زمان دشارژ، راندمان یا بازده یک ذخیره‌ساز الکتروشیمیایی با افت قابل ملاحظه‌ای روبرو شده و بنابر این ضروریست با توجه به مشخصات فنی ذخیره‌ساز، زمان و جریان دشارژ مناسب جهت بهره‌گیری حداکثری از ذخیره‌ساز مذکور انتخاب شود. در شکل (۴-۱) میزان راندمان یک باتری سربی-اسیدی ۴۸ ولتی به ازای توان‌های مختلف شارژ و دشارژ و بر حسب حالت شارژ (SoC) نشان داده شده است.



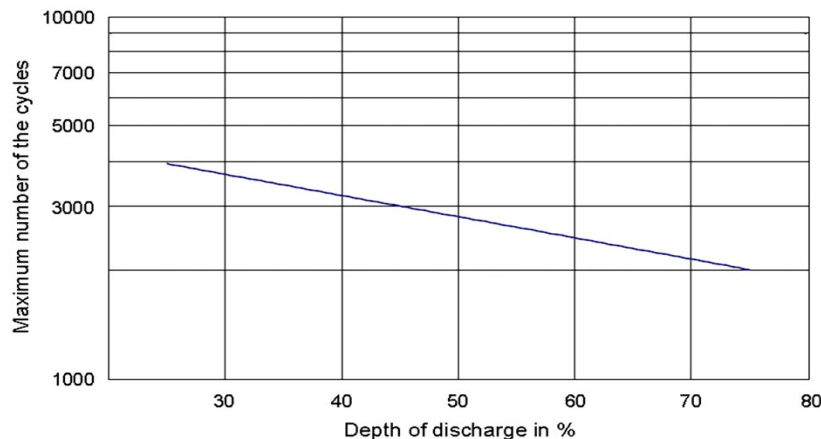
شکل ۴-۱: بازده توان (شارژ و دشارژ) یک باتری سربی-اسیدی ۴۸ ولت - ۳۱۰ آمپر ساعت) بر حسب حالت شارژ و توان [۱]

همانگونه که از شکل (۴-۱) نیز پیداست راندمان با توجه به توان و حالت شارژ تغییر می‌کند. برای بهره‌برداری بهینه ضروریست حالت شارژ بین ۰,۳ تا ۰,۷ و توان کمتر باشد.

۱-۲-۱-۱- تداوم

این پارامتر به تعداد دفعاتی که یک واحد ذخیره‌سازی می‌تواند انرژی را در سطح طراحی شده برای آن، آزاد نماید اطلاق می‌شود. تداوم در واقع همان مقدار ماکزیمم سیکلها (هر سیکل برابر با یک شارژ و یک دشارژ) بوده و به طور معمول با N نشان داده می‌شود.

استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی آنها را در معرض استهلاک و فرسودگی قرار می‌دهد. در واقع خاصیت‌های شیمیایی و فیزیکی تجهیزات مورد استفاده با بکارگیری و گذشت زمان به طرز قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کند و این تغییرات موجب عدم کارایی تجهیزات ذخیره‌سازی انرژی می‌گردد. بنابر این تداوم پارامتری است که باید در طراحی و انتخاب یک تجهیز ذخیره‌ساز مورد توجه قرار گیرد. با این وجود، فرآیندهای استهلاک و فرسودگی معمولاً پیچیده و متغیر بوده و به همین واسطه تعیین مقدار دقیق تداوم به سادگی امکان‌پذیر نیست. در همه موارد، ارتباط قابل ملاحظه‌ای بین عمق شارژ و تداوم مطابق آنچه که در شکل (۵-۱) نشان داده شده است وجود دارد.



شکل ۱-۵: تداوم یک باتری سربی-اسیدی بر حسب عمق شارژ [۱]

۱-۱-۲-۱۳- عدم وابستگی

این پارامتر به ماکزیمم زمانی که یک ذخیره‌ساز می‌تواند به طور پیوسته و بدون وقفه انرژی ذخیره شده را آزاد نماید اطلاق می‌شود. عدم وابستگی یک سیستم ذخیره‌ساز به نوع و کاربرد آن بستگی دارد. به عنوان مثال برای سیستم‌های ذخیره‌ساز کوچک (در حد چند کیلووات ساعت) که در کنار منابع تجدیدپذیر دارای عدم قطعیت و در مناطق دور افتاده مورد استفاده قرار می‌گیرند، عدم وابستگی بسیار حیاتی و مهم است.

۱-۱-۲-۱۴- اثر حافظه (Memory Effect)

اثر حافظه یا اثر باتری یا اثر باتری تنبل یا حافظه باتری تأثیری است که بواسطه آن ذخیره‌ساز پس از مدتی در مقایسه با کاربری اولیه کمتر شارژ می‌شود. این پدیده به طور خاص در باتری‌های قابل شارژ نیکل-کادمیم و نیکل فلز وجود دارد و دلیل بکارگیری واژه باطری در نام‌های مترادف برای این پدیده نیز به همین علت است. اگر باطری‌های مذکور به میزان کمی دشارژ و پس از آن دوباره شارژ شوند و این فرایند با تکرار فراوان باشد، پس از مدتی دیگر ظرفیت نامی خود را نداشته و به اصطلاح ظرفیت کمتری را به خاطر می‌آورند که به این پدیده اثر حافظه گفته می‌شود [۲].

۱-۱-۲-۱۵- هزینه سرمایه‌گذاری ذخیره‌ساز

مانند هر سرمایه‌گذاری دیگر، سیستم‌های ذخیره‌سازی هنگامی که مجموع بهره آنها از هزینه‌های مربوطه بیشتر شود، گزینه جذابی خواهند بود. هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه تعمیرات و نگهداری دو فاکتور مهم در طی زمان استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی است. سیستم‌های ذخیره‌ساز با بازده و تداوم کم به طور معمول هزینه سرمایه‌گذاری کمی دارند. در هر حال بررسی و تجزیه و تحلیل تداوم کل سیستم و تعیین عمر مفید آن با در نظر گرفتن مشخصات ذخیره‌ساز امری ضروری و مهم است. به طور جامع در حالت توسعه پایدار، محاسبه هزینه مجموع طی دوره عمر مفید سیستم با در نظر گرفتن مواد، انرژی و هزینه‌های زیست محیطی از ساخت تا بازیابی سیستم الزامی می‌باشد. در حالت کلی هزینه سرمایه‌گذاری برای یک ذخیره‌ساز با استفاده از رابطه (۱-۱۰) بدست می‌آید.

$$C = C_1 W_{ut} + C_2 P_d \quad (۱۰-۱)$$

در رابطه (۱۰-۱)، C_1 بر حسب دلار بر کیلووات ساعت و C_2 بر حسب دلار بر کیلووات می‌باشد. در برخی موارد رابطه (۱۰-۱) به صورت رابطه (۱۱-۱) بیان می‌شود [۱].

$$C = (\alpha C_1 + C_2) P_d \quad (۱۱-۱)$$

شایان ذکر است هزینه تعمیرات و نگهداری سیستم‌های ذخیره‌ساز در طی دوره عمر این سیستم‌ها با هزینه سرمایه‌گذاری متناسب باشد. به طور مثال برای سیستم‌های ذخیره‌ساز با خروجی برق و با دوره عمر معادل ۲۰ سال، هزینه تعمیرات و نگهداری معادل ۴۰ درصد هزینه سرمایه‌گذاری می‌باشد [۱].

۱-۲-۱۶- امکان‌سنجی و تطابق با منابع تولید

به منظور دستیابی به ماکزیمم راندمان یا بازدهی، یک سیستم ذخیره‌ساز باید با توجه به کاربرد آن و مشخصات تولید انرژی توسط آن انتخاب شود. این بدان معنی است که ذخیره‌ساز باید در هارمونی یا هماهنگی مناسب با شبکه‌ای که در آن استفاده می‌شود باشد. در شکل (۱-۶)، کاربرد ذخیره‌سازهای مختلف با توجه به توان خروجی، انرژی ذخیره شده و زمان استفاده نشان داده شده است. ذخیره‌سازهای آورده شده در فصل‌های بعدی به تفصیل معرفی خواهند شد. منظور از SMES، کوپل‌های ابررسانا و منظور از CAES، سیستم‌های هوا فشرده می‌باشد.

۱-۲-۱۷- دشارژ اتوماتیک

کاهش انرژی ذخیره شده در ذخیره‌ساز در مدت زمانی که ذخیره‌ساز مورد استفاده قرار نمی‌گیرد را دشارژ اتوماتیک یا دشارژ خودی می‌نامند.

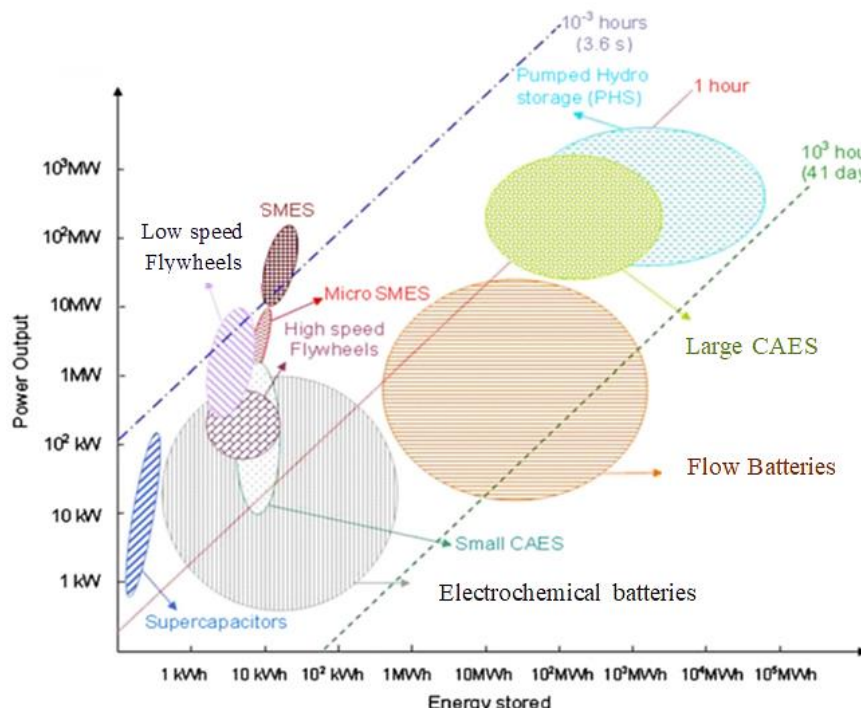
۱-۲-۱۸- محدودیت‌های عملیاتی

این محدودیت‌ها به موارد ایمنی (از جمله انفجار) یا موارد دیگری همچون دما و فشار (محدودیت‌های فیزیکی) مربوط می‌شوند و می‌توانند در انتخاب یک نوع خاص از ذخیره‌ساز بسیار تاثیرگذار باشند.

۱-۲-۱۹- قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان در خصوص ذخیره‌سازها از اهمیت دوجندانی برخوردار است، چرا که وجود ذخیره‌سازها تامین انرژی مورد نیاز بلادرنگ را تضمین می‌کند.





شکل ۱-۶: کاربرد ذخیره‌سازها با توجه به توان، انرژی ذخیره شده و عامل زمان

۱-۲-۲۰- سایر مشخصات ذخیره‌سازها

آسان بودن تعمیرات و نگهداری، سادگی و مقیاس‌پذیری در طراحی، انعطاف‌پذیری عملیاتی، پاسخ سریع، مقاوم بودن، قابلیت بازیافت و سازگاری با محیط زیست از جمله دیگر مشخصات ایده‌آل برای انواع ذخیره‌سازها می‌باشد.

۱-۲-۲- انواع روش‌های ذخیره‌سازی انرژی

در این قسمت به نحوه تقسیم‌بندی انواع روش‌های ذخیره‌سازی انرژی پرداخته می‌شود.

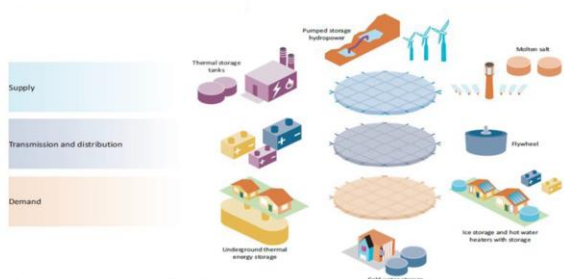
۱-۲-۱- طبقه‌بندی انواع روش‌های ذخیره‌سازی انرژی

همانگونه که پیشتر در مقدمه نیز ذکر شد خروجی ذخیره‌سازهای انرژی برق، حرارت و یا سرما است. با توجه به نوع خروجی، نوع انرژی ذخیره شده و حتی ساکن یا متحرک بودن ذخیره‌سازهای انرژی تقسیم‌بندی‌های متفاوتی برای انواع ذخیره‌سازها یا روش‌های ذخیره‌سازی انرژی ارائه شده است [۳].

بر اساس خروجی ذخیره‌ساز و قابلیت حرکت آن یک تقسیم‌بندی برای انواع ذخیره‌سازها مطابق شکل (۱-۷) ارائه شده است.



Stationary Electric Energy Storage



Energy storage technologies
(Source: IEA, Technology Roadmap Energy Storage)

Mobility Electric Energy Storage



EV station
(source: San Diego Gas & Electric)

Stationary Thermal Energy Storage



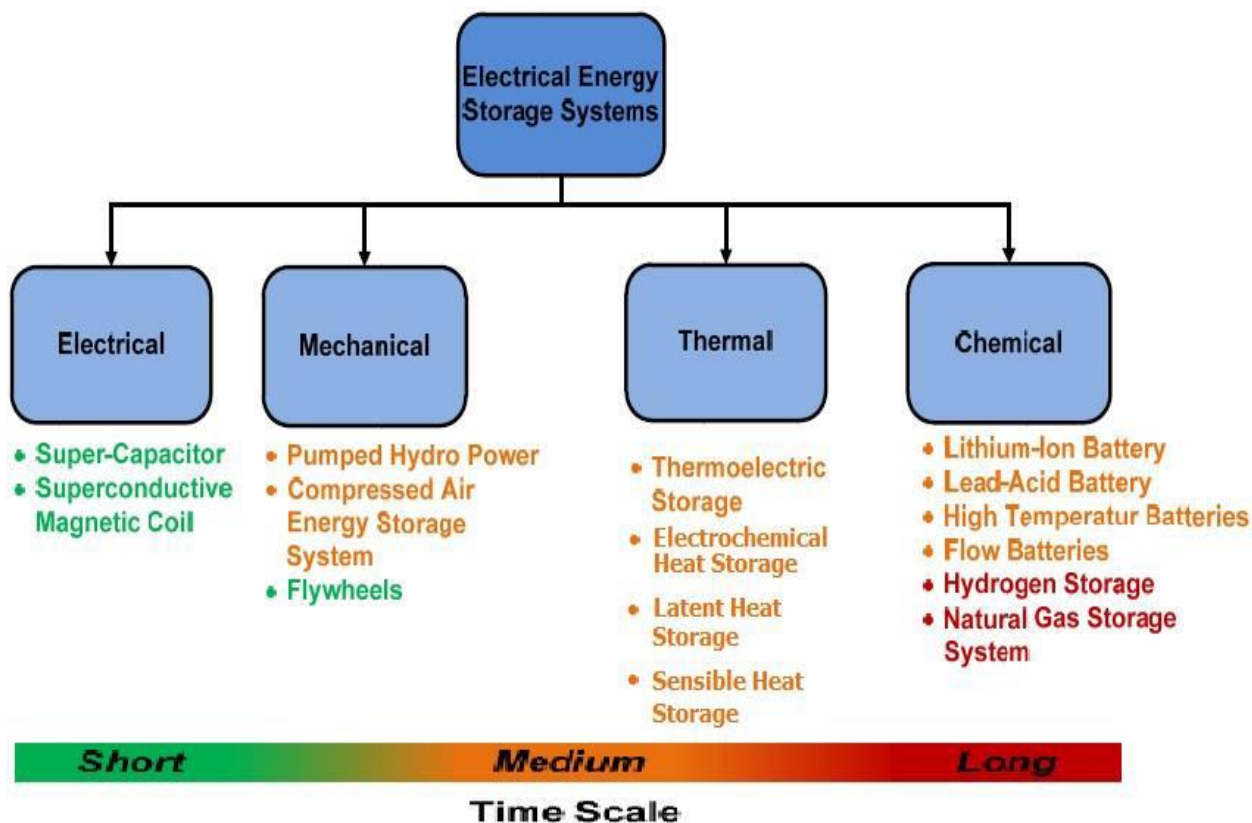
District heating accumulation
tower of Theiß, Austria
(source: Wikipedia)

شکل ۷-۱: تقسیم‌بندی روش‌های ذخیره‌سازی انرژی بر اساس خروجی و قابلیت حرکت [۳]

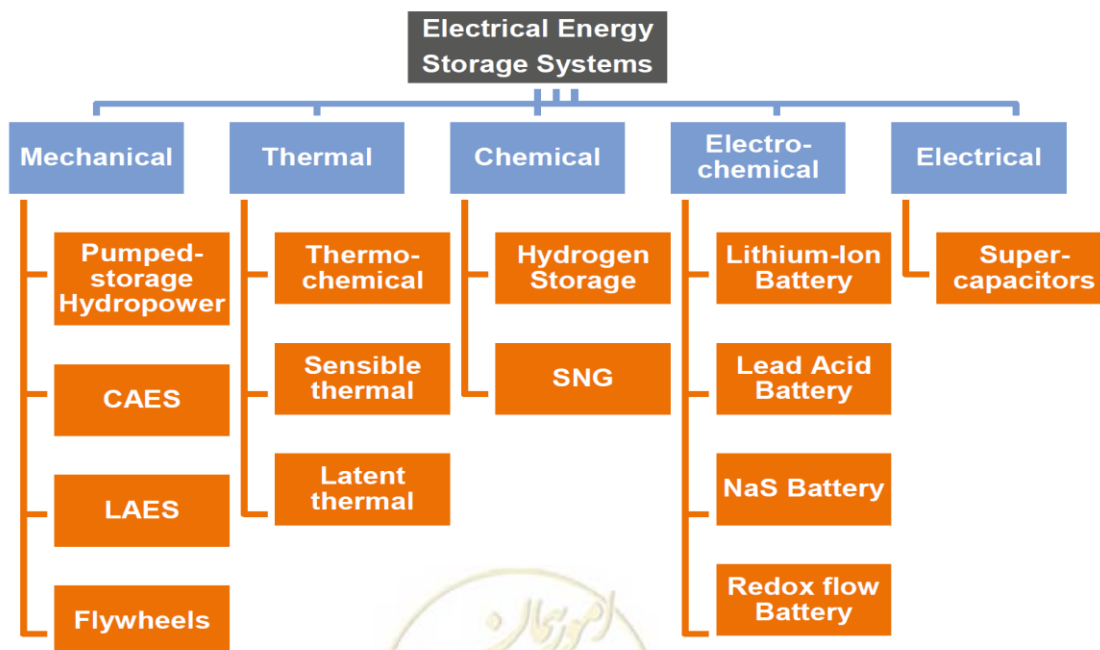
برخی از مراجع علمی، ذخیره‌سازها را با توجه به نوع انرژی ذخیره شده و زمان استفاده از آنها جهت تامین انرژی مورد نیاز مطابق شکل (۸-۱) تقسیم بندی کرده‌اند [۴].

در برخی از مطالعات و فعالیت‌های علمی صورت پذیرفته با محوریت انرژی الکتریکی، تقسیم بندی ذخیره‌سازها بر حسب نوع انرژی ذخیره شده مطابق شکل (۹-۱) می‌باشد [۵]. برخی مراجع ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی را به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم دانسته و تقسیم‌بندی جدیدی مطابق شکل (۱۰-۱) ارائه نموده‌اند [۶]. در این تقسیم‌بندی روش‌های مغناطیسی و الکتریکی زیرمجموعه روش مستقیم و روش‌های مکانیکی و شیمیایی زیرمجموعه روش غیرمستقیم هستند. نکته قابل ذکر تجمیع روش‌های شیمیایی و الکتروشیمیایی در برخی دسته‌بندی‌ها و مجزا نمودن این دو در برخی دسته‌بندی‌های دیگر است.



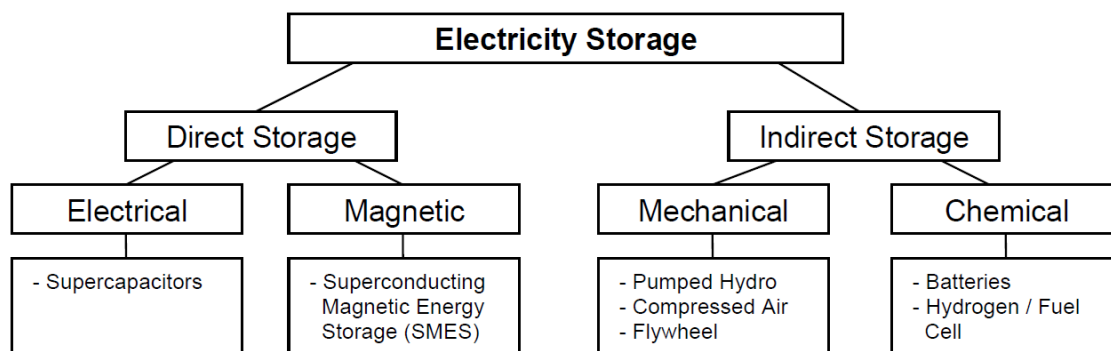


شکل ۸-۱: تقسیم‌بندی روش‌های ذخیره‌سازی انرژی بر اساس انرژی ذخیره شده و بازه زمانی مورد استفاده



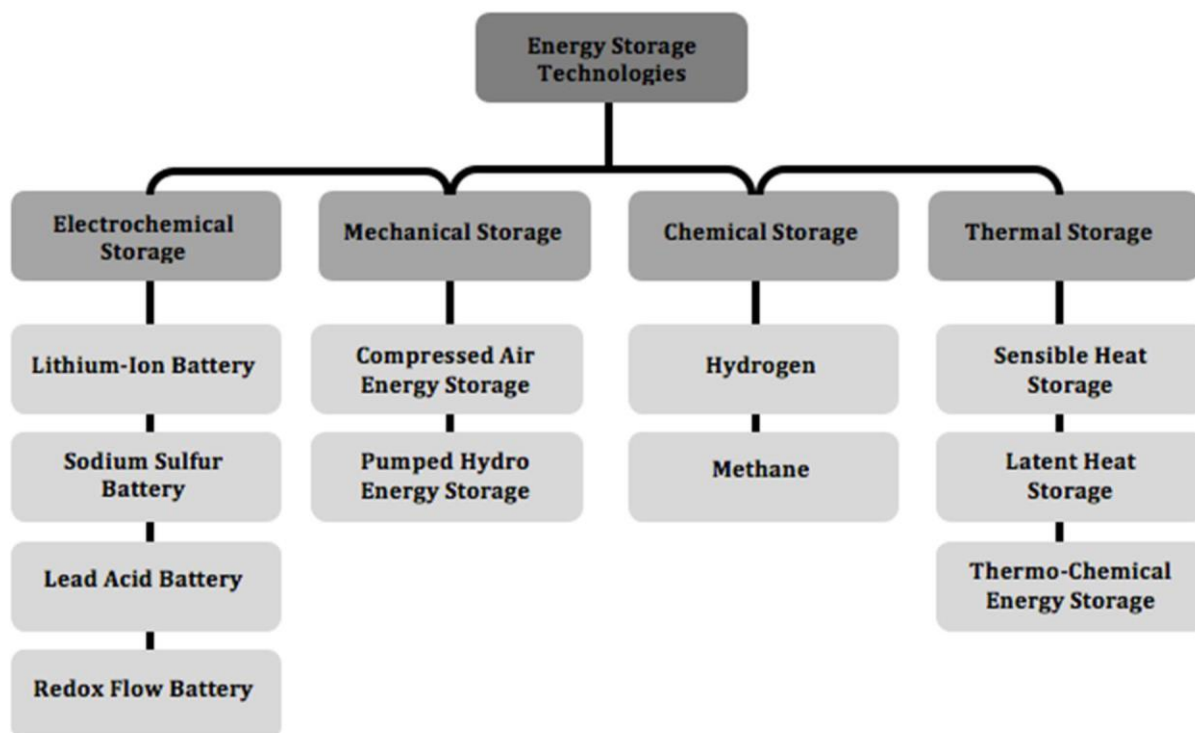
Source: PwC (2015) CAES is Compressed Air Energy Storage; LAES is Liquid Air Energy Storage; SNG is Synthetic Natural Gas

شکل ۹-۱: تقسیم‌بندی روش‌های ذخیره‌سازی انرژی با محوریت انرژی الکتریکی



شکل ۱-۱: تقسیم‌بندی روش‌های ذخیره‌سازی انرژی با محوریت انرژی الکتریکی به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم

در برخی مطالعات، برخی از ذخیره‌سازها همچون چرخ طیار (ذخیره‌ساز مکانیکی) کنار گذاشته شده و یک تقسیم‌بندی مطابق شکل (۱-۱۱) ارائه شده است [۷].

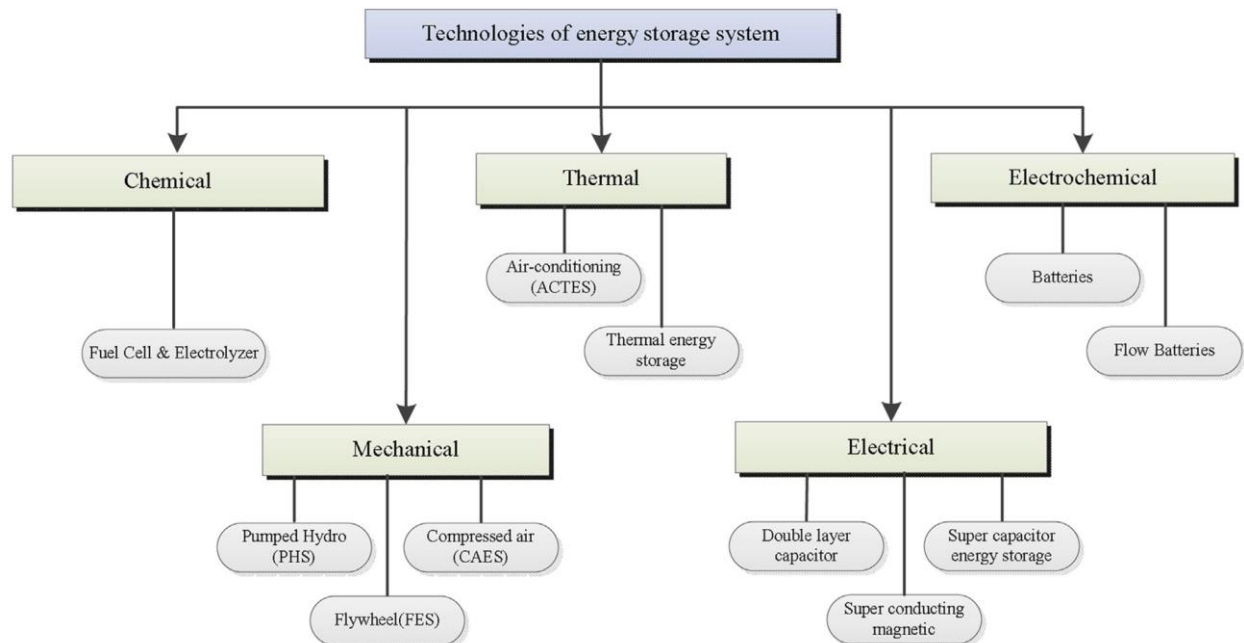


شکل ۱-۱۱: یک نمونه تقسیم‌بندی از روش‌های ذخیره‌سازی انرژی

تقسیم‌بندی ارائه شده در شکل (۱-۱۲) در مطالعات قابل توجهی مبنای تقسیم‌بندی روش‌های مختلف ذخیره‌سازی انرژی بوده است [۱]. این تقسیم‌بندی بر اساس نوع انرژی ذخیره شده است و صرفاً به انرژی الکتریکی به عنوان خروجی ذخیره‌ساز محدود نشده است.

به منظور پوشش جامع و مانع تمامی روش‌ها و تجهیزات مورد استفاده در ذخیره‌سازی انرژی و با توجه به دفعات تکرار انواع دسته‌بندی‌ها در مطالعات علمی صورت پذیرفته تاکنون، در این نشریه تقسیم‌بندی ارائه شده مطابق شکل

(۱۲-۱) مورد استفاده قرار می‌گیرد و این تقسیم‌بندی مبنای تفکیک و نام‌گذاری فصول در این نشریه و سایر نشریات وابسته خواهد بود.



شکل ۱۲-۱: تقسیم‌بندی مرجع روش‌های ذخیره‌سازی انرژی

۳-۱- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این فصل از گزارش مفهوم ذخیره‌سازی انرژی و موارد وابسته مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. ساختار و روابط انرژی حاکم بر سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی تشریح گردید. در ادامه مشخصات سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی شرح داده شد. به منظور ایجاد رویه واحد و تقسیم‌بندی مشخص، دسته‌بندی‌های ارائه شده برای انواع روش‌های ذخیره‌سازی انرژی در مطالعات مختلف ارائه گردید و در پایان دسته‌بندی انواع روش‌ها مشتمل بر روش‌های الکتریکی، مکانیکی، حرارتی، الکتروشیمیایی و شیمیایی به منظور استفاده در ادامه مطالعه انتخاب گردید. در فصول آتی به توضیح و تشریح جزئیات هر روش و فناوری‌های مورد استفاده در آن پرداخته می‌شود.



فصل ۲

روش‌های الکتریکی ذخیره‌سازی انرژی و فناوری‌های مربوطه



مقدمه

در این فصل از گزارش به تشریح روش‌های الکتریکی ذخیره‌سازی انرژی پرداخته می‌شود. در این روش از سوپرکازن‌ها یا همان ابرکازن‌ها و کوپل‌های مغناطیسی ابررسانا جهت ذخیره‌سازی استفاده می‌شود. در ابتدا به سوپرکازن‌ها پرداخته می‌شود و در گام بعدی کوپل‌های مغناطیسی ابررسانا معرفی می‌شوند.

۱-۲- کازن و انواع آن

کازن‌ها وسایل ذخیره انرژی الکتریکی هستند که توانایی انباشت بار الکتریکی را دارند. برخلاف مقاومت که بر اثر حرارت، انرژی را دفع می‌کند، یک کازن ایده‌ال، انرژی را در خود ذخیره می‌کند و تلفاتی ندارد. کازن‌ها در حالت کلی در سه دسته ذیل تقسیم‌بندی می‌شوند:

۱- کازن الکترواستاتیک که متداول‌ترین کازن با جداکننده خشک است. این نوع کازن دارای ظرفیت بسیار کمی بوده و برای پالایش سیگنال‌ها و تنظیم فرکانس‌های رادیویی مورد استفاده قرار می‌گیرد. دامنه تغییر ظرفیت این نوع کازن از چند پیکوفاراد تا چند میکروفاراد است.

۲- کازن الکترولیتی که گاهی کازن شیمیایی نیز خوانده می‌شود. علت این نامگذاری آن است که دی‌الکتریک این کازن‌ها از یک واکنش شیمیایی بین یک الکترولیت رسانا و یکی از صفحات کازن ایجاد می‌شود. این واکنش در شارژ اولیه کازن در کارخانه اتفاق می‌افتد. در این واکنش یکی از صفحات کازن اکسید شده و این لایه اکسید، وظیفه دی-الکتریک را انجام می‌دهد. الکتروود دیگر و الکترولیت رسانای بین الکتروودها با همدیگر الکتروود دیگر کازن را تشکیل می‌دهند. از جمله کاربردهای این نوع کازن می‌توان به استفاده از آن در مدارات یکسوساز و حافظه موقت اشاره کرد. دامنه ظرفیت این کازن‌ها در حد میکروفاراد است. این کازن‌ها چند هزار برابر کازن‌های الکترواستاتیکی توانایی ذخیره دارند.

۳- سوپرکازن یا ابرکازن یا فراکازن یا کازن طلایی یک کازن با ظرفیت بالا (در حالت مقایسه محدودیت ولتاژی دارد یا به عبارت بهتر ولتاژ قابل تحمل یا شکست آنها پایین‌تر است) در مقایسه با دیگر کازن‌هاست که از لحاظ ظرفیتی، فاصله بین کازن‌های الکترولیتی و باتری‌های قابل‌شارژ را پوشش می‌دهد. ابرکازن‌ها به طور معمول ۱۰ تا ۱۰۰ برابر بیشتر از کازن‌های الکترولیتی، انرژی را ذخیره کرده و در مقایسه با باتری‌های قابل‌شارژ، خیلی سریع‌تر شارژ و دشارژ می‌شوند. ضمن آنکه سیکل‌های شارژ و دشارژ به مراتب بیشتری را در مقایسه با باتری‌های قابل‌شارژ تحمل می‌نمایند. تکنولوژی سوپرکازن در فاز رشد قرار دارد [۸].



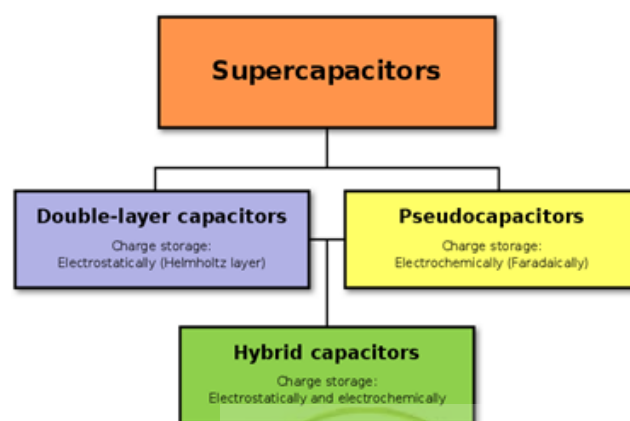
۲-۱-۱- سوپرکازن‌ها

سوپرکازن‌ها در دو گروه کازن‌های دو لایه الکترواستاتیک و شبه‌کازن‌ها دسته‌بندی می‌شوند. این تقسیم‌بندی بر اساس مکانیسم منحصر به فرد هر گروه برای ذخیره سازی بار یا انرژی است که به ترتیب غیر فارادی برای کازن‌های دولایه الکترواستاتیک و فارادی برای شبه‌کازن‌ها می‌باشد.

در کازن‌های الکترواستاتیک دولایه، جدایی بارهای الکتریکی غیر فارادیک (ناهم‌نام) در فصل مشترک الکترودهای کازن و الکترولیت سبب ذخیره‌سازی انرژی می‌شود. آلتروپیی‌های کربن مانند گرافیت، گرافن و نانولوله‌های کربنی رفتار کازنی دولایه الکتریکی دارند.

شبه‌کازن‌ها ذخیره بار بر روی سطح الکتروود را با مکانیسم کاملاً متفاوتی انجام می‌دهند. مکانیسم ذخیره بار در شبه‌کازن‌ها مشابه باتری‌ها است که طی یک فرایند فارادیک انجام می‌شود و شامل انتقال بار در طول دولایه الکتریکی است. اما برخلاف باتری‌ها که به صورت ایده‌آل در یک پتانسیل خاص انتقال بار انجام می‌شود در شبه کازن‌های الکتروشیمیایی، بار عبور کرده از فصل مشترک تابع پیوسته‌ای از پتانسیل می‌باشد. اکسیدهای فلزی مانند RuO_2 ، Co_3O_4 ، MnO_2 ، NiO ، M_xO_y و همچنین پلیمرهای هادی مانند پلی آنیلین و پلی پیرول رفتار شبه‌کازنی دارند [۸].

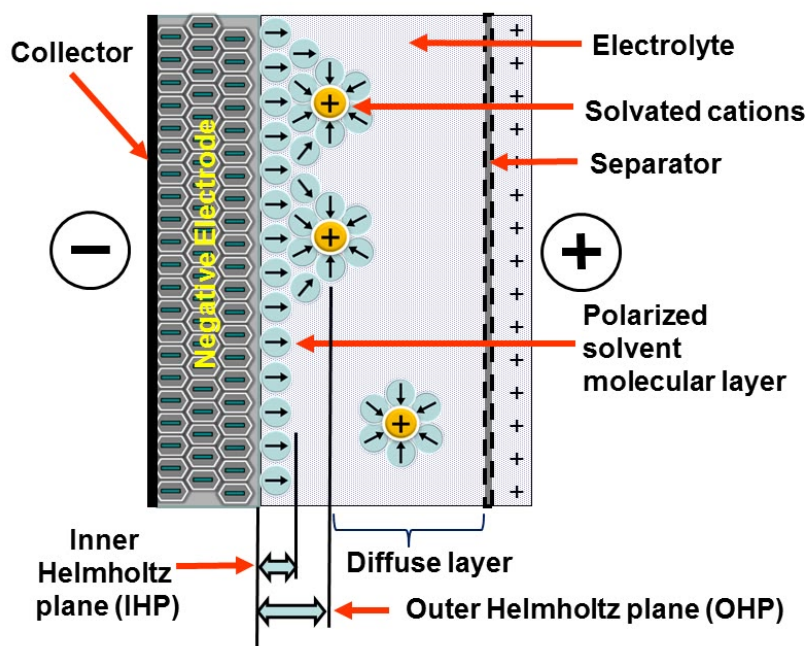
شبه کازن‌ها به دلیل وجود فرایند فارادیکی، ظرفیت بیشتری نسبت به کازن‌های دولایه الکترواستاتیک (حدود ۱۰۰ برابر) دارند اما به دلیل تغییرات فاز در حین فرایند فارادیک، پایداری شارژ- دشارژ آنها نسبت به کازن‌های دولایه الکترواستاتیک کمتر است. بنابراین با سنتز کامپوزیت‌هایی شامل ابرکازن‌های دولایه الکترواستاتیک و شبه کازن‌ها می‌توان به ظرفیت بیشتر و پایداری شارژ- دشارژ بالا دست یافت. کازنی که از دو کازن دولایه الکترواستاتیک و شبه کازن تشکیل می‌شود با نام کازن ترکیبی شناخته می‌شود. در شکل (۲-۱) انواع سوپرکازن‌ها نشان داده شده است.



شکل ۲-۱: انواع سوپرکازن‌ها

۲-۱-۱-۲ اجزاء و نحوه کارکرد خازن‌های دولایه الکترواستاتیک

ظرفیت دولایه به عنوان یک پدیده یا خاصیت، اساس کار خازن‌های دولایه الکترواستاتیک است. این پدیده، با اعمال ولتاژ خارجی به خازن دولایه الکترواستاتیک، بین الکتروود رسانا و الکترولیت مایع مجاور رخ می‌دهد. در این حدفاصل دو لایه از بار با پلاریته یا قطبیت مخالف شکل می‌گیرد، یکی در سطح الکتروود و دیگری در الکترولیت. این دو لایه، الکترون‌های روی الکتروود و یون‌های موجود در الکترولیت، به طور معمول توسط یک لایه از مولکول‌های حلال که به سطح الکتروود چسبیده‌اند و مانند یک دی‌الکتریک در یک خازن معمولی عمل می‌کند از هم جدا می‌شوند. این لایه به عنوان لایه یا صفحه داخلی هلمهولتز یا IHP (Inner Helmholtz Plane) شناخته می‌شود. بعد از این لایه، به ترتیب لایه یا صفحه خارجی هلمهولتز (OHP) و لایه پخش قرار می‌گیرند. شماتیک آنچه گفته شد در شکل (۲-۲) آورده شده است [۹].

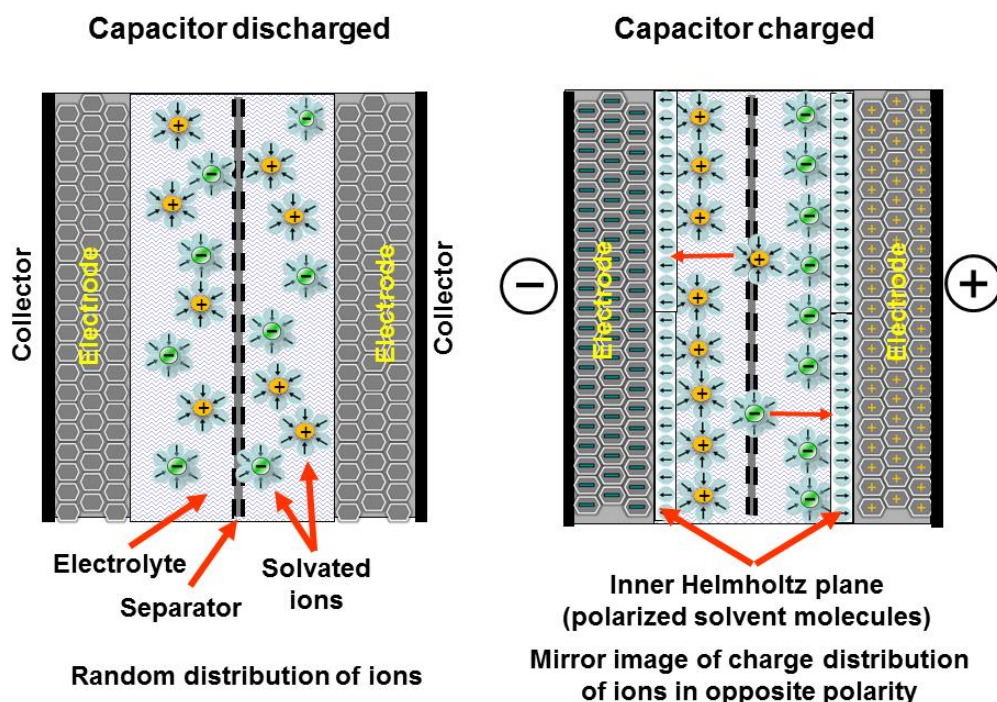


شکل ۲-۲: شماتیک بروز پدیده ظرفیت دولایه در الکتروود منفی از یک خازن دولایه الکترواستاتیک

هنگامی که یک خازن دولایه الکترواستاتیک شارژ می‌شود، یک تصویر آینه‌ای از نحوه توزیع بارهای الکتریکی با پلاریته مختلف (شکل (۲-۳)) شکل می‌گیرد. هنگامی که خازن دولایه الکترواستاتیک دشارژ می‌شود توزیع یون‌ها به صورت تصادفی خواهد بود و عملاً خاصیت خازنی یا ذخیره‌سازی تا اعمال دوباره ولتاژ بی‌مفهوم خواهد بود. با عنایت به موارد ذکر شده، خازن دولایه الکترواستاتیک از یک لایه دی‌الکتریک با ضخامت یک مولکول واحد بهره می‌برد و بنابراین، فرمول استاندارد مطابق رابطه (۲-۱) برای خازن‌های صفحه معمولی می‌تواند برای محاسبه ظرفیت آن استفاده شود.

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \quad (۲-۱)$$

مطابق رابطه (۲-۱)، هر چه ضریب نفوذپذیری (ε) دی‌الکتریک مورد استفاده در خازن و سطح الکترودهای آن (A) بزرگتر و فاصله بین صفحات آن (d) کوچکتر باشد، ظرفیت بیشتری حاصل می‌شود. خازن‌های دولایه الکترواستاتیک بواسطه سطح موثر وسیع از الکترودهای کربن فعال و فاصله دولایه بسیار نازک در حد چند آنگستروم (۰,۸-۰,۳ نانومتر) دارای ظرفیت بسیار بالاتری نسبت به خازن‌های معمولی هستند.



شکل ۲-۳: ساختار و نحوه عملکرد یک خازن دولایه الکترواستاتیک ایده‌آل در دو حالت شارژ و دشارژ

کربن ایروژل، فیبر کربنی، کربن فعال و نانو لوله‌های کربنی جهت تهیه الکترودهای خازن‌های دولایه الکترواستاتیک مورد استفاده قرار می‌گیرند [۹].

۲-۱-۱-۲- مشخصات و ویژگی‌های خازن‌های دولایه الکترواستاتیک

انرژی مخصوص خازن‌های دولایه الکترواستاتیک بین ۳ تا ۵ وات‌ساعت بر کیلوگرم و توان مخصوص این خازن‌ها بین ۲ تا ۱۰ وات بر گرم گزارش شده است [۱۰]. چگالی حجمی توان و چگالی حجمی انرژی برای ذخیره‌ساز مذکور به ترتیب در بازه‌های ۴۰ تا ۱۲۰ مگاوات بر متر مکعب و ۱۰ تا ۲۰ کیلووات ساعت بر متر مکعب قرار می‌گیرد [۱۱]. زمان شارژ بین ۱ تا ۱۰ ثانیه، امکان کامل شارژ و دشارژ (عمق دشارژ برابر ۱ یا ۱۰۰ درصد امکان‌پذیر است)، دشارژ خودی بین ۲۰ تا ۴۰ درصد در روز، ولتاژ نامی هر سلول برابر ۲,۷ ولت و بازه دمایی کارکرد بین ۴۰- تا ۶۵ درجه سانتیگراد از جمله دیگر مشخصات خازن‌های دولایه الکترواستاتیک بشمار می‌روند [۱۲].

بازده ذخیره‌سازی در خازن‌های دولایه الکترواستاتیک نزدیک به ۹۵ درصد است. تداوم (شامل یک بار شارژ و دشارژ کامل) این نوع ذخیره‌ساز تا ۱,۰۰۰,۰۰۰ گزارش شده است. هزینه سرمایه‌گذاری برای این ذخیره‌ساز شامل هزینه مربوط به توان بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ دلار به ازای هر کیلووات و هزینه مربوط به انرژی بین ۳۰۰ تا ۲۰۰۰ دلار به ازای هر کیلووات ساعت می‌باشد. همچنین هزینه ثابت تعمیر و نگهداری خازن‌های دولایه الکترواستاتیک ۶ دلار بر کیلووات در سال و هزینه متغیر مربوطه ۰,۰۰۵ دلار بر کیلووات ساعت می‌باشد [۱۷-۱۳].

فضای مورد نیاز برای ذخیره‌سازی یک کیلووات ساعت انرژی در خازن‌های دولایه الکترواستاتیک ۰,۴۳ متر مربع می‌باشد. اثر حافظه در این نوع ذخیره‌ساز دیده نشده است. با در نظر گرفتن سطوح زیاد، متوسط، کم، خیلی کم و فاقد تاثیر برای تاثیرات مخرب زیست محیطی، اثر زیست محیطی این ذخیره‌ساز "کم" گزارش شده است. با در نظر گرفتن امتیازهای ۱ تا ۵ برای خاصیت بازیافت بگونه‌ای که ۱ بدترین و ۵ بهترین حالت باشد، امتیاز بازیافت خازن‌های دولایه الکترواستاتیک "۴" خواهد بود. خازن‌های دولایه الکترواستاتیک قابلیت کاربرد متحرک نیز دارند [۱۸].

با در نظر گرفتن سطوح خوب، معمولی و ضعیف برای شاخص‌های مقیاس‌پذیری و ایمنی و سطوح زیاد، متوسط و کم برای شاخص انعطاف‌پذیری، خازن‌های دولایه الکترواستاتیک در شاخص اول در سطح ضعیف، در شاخص دوم در سطح معمولی و در شاخص آخر در سطح کم قرار می‌گیرند [۱۹].

۲-۱-۳- اجزاء و نحوه کارکرد شبه‌خازن‌ها

شبه‌خازن‌ها یا خازن‌های فارادیک که بیشتر به باطری‌ها (به علت نحوه عملکرد) شبیه هستند متفاوت از خازن‌های دولایه الکترواستاتیک می‌باشند. هنگامی که به یک شبه‌خازن، ولتاژ اعمال می‌شود، واکنش‌های سریع و برگشت‌پذیر فارادیک بر روی الکترودها اتفاق می‌افتد و این مساله باعث شارژ و دشارژ شبه‌خازن‌ها مشابه فرآیندهای حادث در باتری‌ها می‌شود.

به عبارت بهتر، مکانیسم کاری شبه‌خازن‌ها تغییر ظرفیت ماده تشکیل دهنده الکترودها بواسطه انتقال الکترون است. اکسید روتنیوم (RuO_2) اولین ماده‌ای بود که به عنوان الکترودها خاصیت شبه‌خازنی از خود نشان داد. در حالت کلی سه نوع فرایند شیمیایی فارادیک می‌تواند بر روی الکترودهای شبه‌خازن رخ دهد [۲۰]. این سه نوع فرایند عبارتند از:

۱- فرایند جذب برگشت‌پذیر مانند جذب هیدروژن روی سطح پلاتین یا جذب پالادیوم روی طلا

۲- فرایند اکسایش و کاهش اکسید فلزات مانند اکسید روتنیوم

۳- فرایند الکتروشیمیایی برگشت‌پذیر مشتمل بر ناخالص و خالص‌سازی الکترودها

فرایند اول (از آن با عنوان Underpotential Deposition نیز یاد می‌شود) هنگامی رخ می‌دهد که یون‌ها بر روی یک واسط دو بعدی فلز- الکترولیت نشانداده می‌شوند. واکنش شیمیایی مربوط به فرایند مذکور که معکوس‌پذیر نیز هست مطابق رابطه (۲-۲) خواهد بود. علامت (→) دشارژ و علامت (←) شارژ شبه‌خازن را نشان می‌دهد.



در رابطه (۲-۲)، C اتم‌های جذب شده (به عنوان مثال هیدروژن یا پالادیوم)، M فلز گرانبها (پلاتین یا طلا)، x تعداد اتم‌های جذب شده، z ظرفیت اتمی اتم‌های جذب شده و بنابر این zx تعداد الکترون‌های انتقال یافته می‌باشد. فرایند دوم (از آن به عنوان Redox Pseudocapacitance نیز یاد می‌شود) هنگامی رخ می‌دهد که ذرات با بار مثبت (الکترون از دست داده) به صورت الکتروشیمیایی به سطح یا نزدیک سطح ذرات اکسید شده جذب می‌شوند. واکنش‌های شیمیایی معکوس‌پذیر مربوط به فرایند مذکور برای دو ماده اکسید روتینیوم و دی‌اکسید منگنز مطابق روابط (۳-۲) و (۴-۲) خواهد بود.



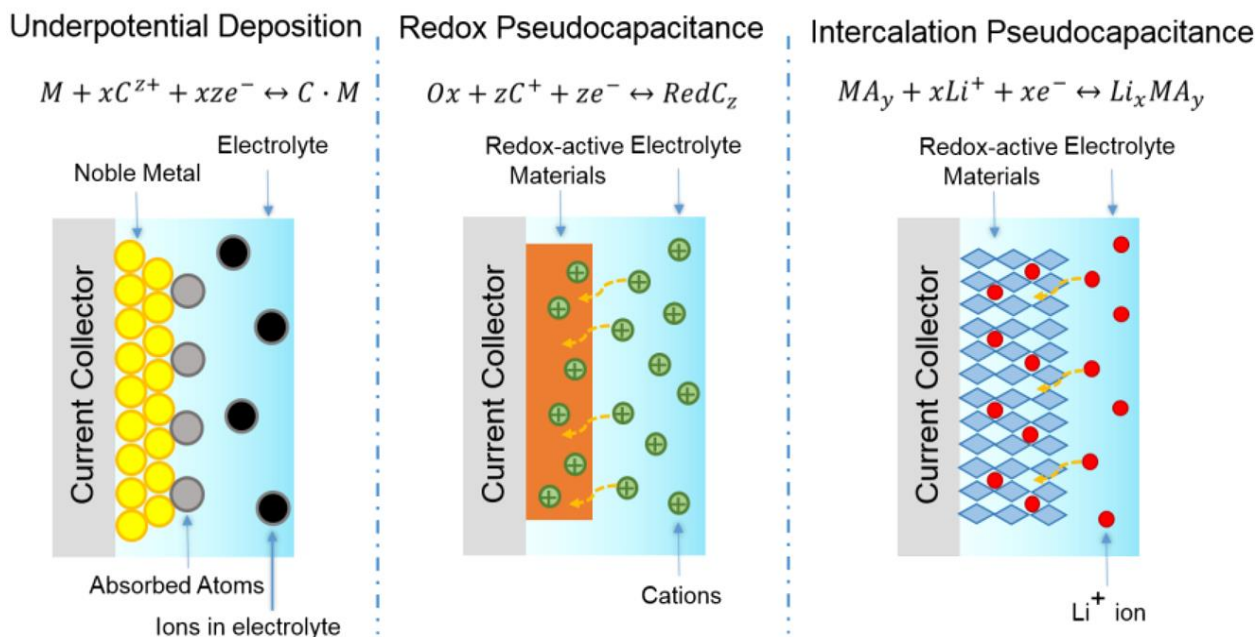
در رابطه (۳-۲) و (۴-۲)، z تعداد الکترون‌های انتقال یافته می‌باشد. A^{+} نیز یون مثبت فلزات فعال همچون سدیم و پتاسیم است.

فرایند سوم (از آن به عنوان Intercalation Pseudocapacitance نیز یاد می‌شود) هنگامی رخ می‌دهد که یون‌های مثبت لیتیوم (مهمان) بین صفحات الکترودها (به عنوان میزبان) قرار گیرند یا از بین صفحات مزبور خارج شوند. واکنش‌های شیمیایی معکوس‌پذیر مربوط به فرایند مذکور برای ماده MA_y به عنوان میزبان مطابق رابطه (۵-۲) خواهد بود.



MA_y می‌تواند موادی همچون Nb_2O_5 یا TiO_2 باشد. در رابطه (۵-۲)، x تعداد الکترون‌های منتقل شده می‌باشد. شکل (۴-۲) شماتیک فرایندهای صدرالذکر به همراه معادلات شیمیایی در یک شبه‌خازن را نشان می‌دهد. فلزات گرانبها همچون پلاتین یا طلا، پلیمرهای رسانا و اکسید فلزات جهت تهیه الکترودهای شبه‌خازن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۰].





شکل ۲-۴: شماتیک فرایندهای شیمیایی مرتبط با شبه‌خازن‌ها به همراه معادلات هر یک از آنها

۴-۱-۱-۲- مشخصات و ویژگی‌های شبه‌خازن‌ها

برای شبه‌خازن‌ها، متوسط انرژی مخصوص ۱۰ وات‌ساعت بر کیلوگرم، زمان شارژ بین ۱ تا ۱۰ ثانیه و دشارژ خودی بین ۲۰ تا ۴۰ درصد در روز گزارش شده است [۱۰]. ولتاژ نامی هر سلول از این ذخیره‌ساز بین ۲٫۳ تا ۲٫۸ ولت است. این خازن‌ها برای بازه دمایی ۴۰- تا ۶۵ درجه سانتیگراد طراحی و ساخته می‌شوند [۱۱].

بازده ذخیره‌سازی در شبه‌خازن‌ها نزدیک به ۹۰ درصد است [۱۱]. تداوم (شامل یک بار شارژ و دشارژ کامل) شبه‌خازن‌ها تا ۱۰۰,۰۰۰ گزارش شده است [۱۰]. هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه تعمیرات و نگهداری برای این ذخیره‌ساز همانند هزینه ارائه شده برای خازن‌های دولایه الکترواستاتیک است. اثر حافظه در این نوع ذخیره‌ساز دیده نشده است [۱۲].

۴-۱-۱-۲-۵- اجزاء و نحوه کارکرد خازن‌های ترکیبی

مفهوم خازن‌های ترکیبی نتیجه تلاش‌ها جهت افزایش انرژی مخصوص یا چگالی انرژی سوپرکازن‌ها به بازه ۲۰ تا ۳۰ وات‌ساعت بر کیلوگرم می‌باشد. در واقع تلاش‌های مذکور با بکارگیری مواد بهتر جهت ساخت الکترودها و الکترولیت خازن‌های دولایه الکترواستاتیک آغاز شد و با طرح ایده خازن‌های ترکیبی ادامه یافت [۲۱].

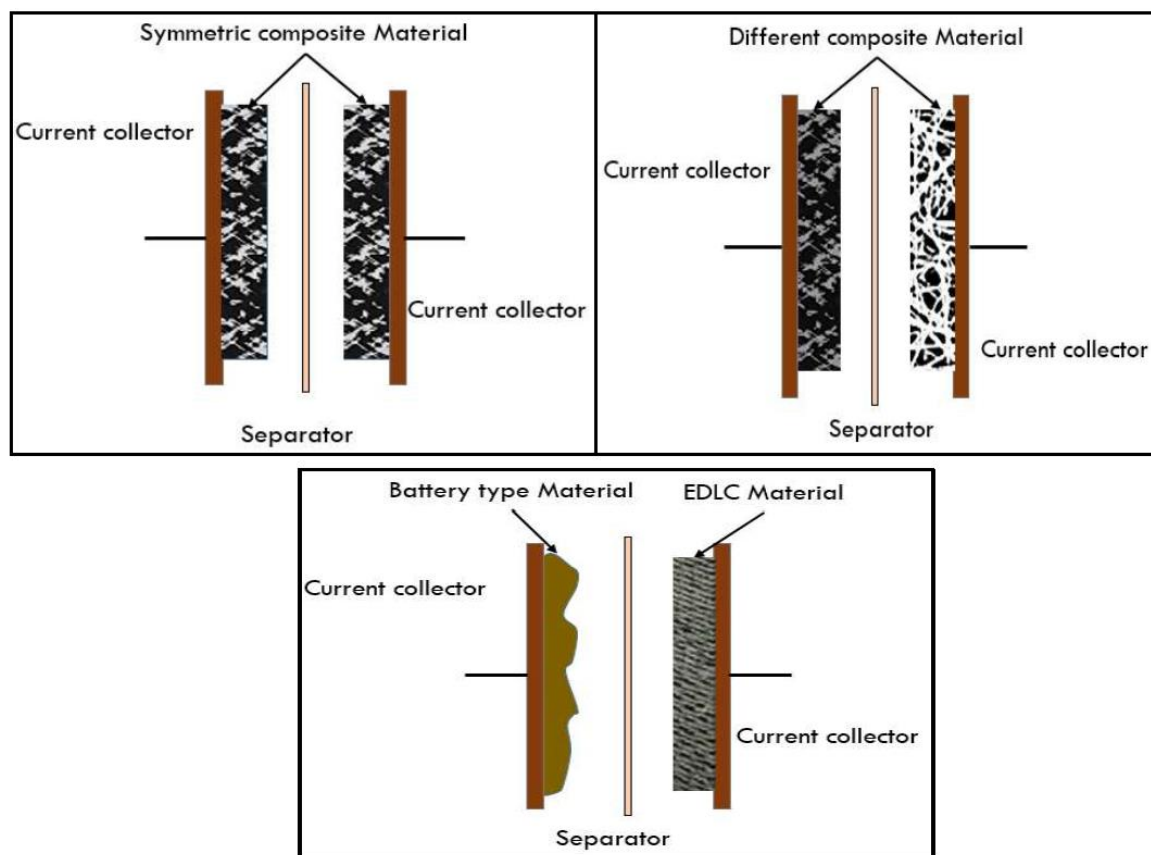
ترکیب خازن دولایه الکترواستاتیک و شبه‌خازن به تشکیل خازن ترکیبی می‌انجامد. در خازن ترکیبی واکنش فارادیک در الکتروود منفی رخ می‌دهد. این الکتروود به صورت نوعی از مواد بکار رفته در الکترودهای شبه‌خازن ساخته می‌شود. بواسطه فرایند مذکور، خازن ترکیبی چگالی انرژی بالاتری نسبت به خازن‌های دولایه الکترواستاتیک و شبه‌خازن دارد. در نقطه مقابل، الکتروود مثبت از کربن فعال ساخته می‌شود که انرژی الکترواستاتیکی را مشابه آنچه که

در مورد خازن‌های دولایه الکترواستاتیک گفته شد در سطح الکتروود ذخیره می‌کند. بواسطه ارتباط یا تاثیر متقابل الکترواستاتیکی بین حامل‌های بار و الکتروود مثبت امکان کشیدن جریان‌های بالاتر از خازن ترکیبی در مقایسه با دو نوع دیگر از سوپرکازن‌ها فراهم می‌شود. خازن‌های ترکیبی از لحاظ ساختار و عملکرد شبیه به باتری‌های لیتیم-یونی هستند.

اگر از دو الکتروود مشابه جهت ساخت خازن ترکیبی استفاده شود، خازن حاصله از نوع متقارن خواهد بود. در حال حاضر، تنها خازن ترکیبی متقارن تجاری، ترکیب یک جفت الکتروود ساخته شده از کربن فعال در الکتروولیت ارگانیک است که ولتاژ سلولی برابر با ۲٫۷ ولت را نتیجه می‌دهد. اگر از دو الکتروود متفاوت جهت ساخت خازن ترکیبی استفاده شود، خازن حاصله از نوع نامتقارن خواهد بود. در حال حاضر استفاده از کربن فعال در یک الکتروود و استفاده از اکسید منگنز (MnO_2) در الکتروود دیگر جهت ساخت خازن‌های ترکیبی نامتقارن فراگیر شده است. در این بین گروه یا دسته سومی از خازن‌های ترکیبی با عنوان خازن‌های ترکیبی از نوع باتری نیز معرفی شده‌اند. در این نوع از خازن‌ها، یک الکتروود از جنس الکترودهایی است که در باتری مورد استفاده قرار می‌گیرند. الکتروود دیگر از جنس الکترودهای مورد استفاده در خازن‌های دولایه الکترواستاتیک می‌باشد. شکل (۲-۵) شماتیک دسته‌های مختلف خازن ترکیبی را نشان می‌دهد. شایان ذکر است خازن‌های ترکیبی که از دو الکتروود متفاوت بهره می‌برند در مقایسه با خازن‌های ترکیبی مبتنی بر یک نوع الکتروود، رفتار الکتروشیمیایی بهتری دارند [۲۲].

کربن فعال، پلیمرهای رسانا و اکسید فلزات جهت تهیه الکترودهای خازن ترکیبی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۲].





شکل ۲-۵: شماتیک انواع مختلف خازن‌های ترکیبی

۲-۱-۱-۶- مشخصات و ویژگی‌های خازن‌های ترکیبی

انرژی مخصوص خازن‌های ترکیبی بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ وات‌ساعت بر کیلوگرم گزارش شده است [۱۰]. توان مخصوص این خازن‌ها نیز بین ۳ تا ۱۴ وات بر گرم قرار دارد [۱۱]. زمان شارژ خازن‌های ترکیبی حدود ۱۰۰ ثانیه است. در مورد دشارژ خودی این خازن‌ها اطلاع دقیقی در دست نیست. ولتاژ نامی هر سلول از این ذخیره‌ساز بین ۲٫۳ تا ۲٫۸ ولت است. این خازن‌ها برای بازه دمایی ۴۰- تا ۶۵ درجه سانتیگراد طراحی و ساخته می‌شوند [۱۱]. بازه ذخیره‌سازی در خازن‌های ترکیبی نزدیک به ۹۰ درصد است [۱۱]. تداوم (شامل یک بار شارژ و دشارژ کامل) این نوع ذخیره‌ساز ۵۰۰,۰۰۰ می‌باشد [۱۰]. اثر حافظه در این نوع ذخیره‌ساز دیده نشده است [۱۲].

۲-۱-۱-۷- الکترولیت و سایر اجزاء سوپرکازن‌ها

الکترولیت‌های مورد استفاده در سوپرکازن‌ها به دو دسته الکترولیت‌های آبی و ارگانیک تقسیم‌بندی می‌شوند. ترکیب آب با مواردی همچون اسید سولفوریک، هیدروکسید پتاسیم و موارد فراوان دیگر که بتوانند نقش یک الکترولیت را ایفا نمایند، در دسته اول قرار می‌گیرند. دمای کارکرد الکترولیت‌های آبی نسبتاً کم بوده و کاربرد آنها در سوپرکازن‌هایی است که انرژی مخصوص کم و توان مخصوص قابل ملاحظه دارند [۲۳].

الکترولیت‌ها با حلال‌های آلی نظیر پروپیلن کربنات، دی‌اتیل کربنات و محلول‌هایی با نمک آلکیل آمونیوم یا نظایر آنها، الکترولیت‌های ارگانیک بشمار می‌روند. این الکترولیت‌ها از الکترولیت‌های آبی گرانتر هستند، اما ولتاژ حاصل از بکارگیری آنها و دامنه دمایی کارکرد آنها بالاتر است. الکترولیت‌های ارگانیک هدایت الکتریکی پایین‌تری نسبت به الکترولیت‌های آبی دارند که این مساله منجر به توان کمتر می‌شود. در نقطه مقابل با افزایش ولتاژ، از آنجا که مطابق با رابطه (۶-۲) با مربع ولتاژ انرژی ذخیره شده افزایش می‌یابد، چگالی انرژی یا انرژی مخصوص بالاتری حاصل می‌شود.

$$W = \frac{1}{2} CV^2 \quad (۶-۲)$$

جداسازها یا جداکننده‌ها در سوپرکازن‌ها باید از نظر فیزیکی دو الکتروود را از هم جدا کنند تا از اتصال کوتاه ناشی از تماس یا برخورد مستقیم جلوگیری شود. جداسازها در سوپرکازن‌ها متخلخل و بسیار نازک (در حد چند صدم میلیمتر) هستند تا حداقل مقاومت در مسیر یون‌های هادی ایجاد شده یا به حداقل برسد. به منظور حفظ پایداری و هدایت الکترولیت‌ها، جداساز باید باید از نظر شیمیایی خنثی یا بی‌اثر باشد. در سوپرکازن‌های معمولی از جداکننده‌های ارزان قیمت استفاده می‌شود. فیلم‌های پلیمری متخلخل بافته نشده مانند پلی‌آکریل نیتریل یا کپتون، الیاف شیشه‌ای بافته شده یا الیاف سرامیکی بافته شده متخلخل در سوپرکازن‌های پیشرفته مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۳].

جمع‌کننده‌ها یا کلکتورها، الکتروودهای خازن را به پایانه‌های آن وصل می‌کنند. جمع‌کننده یا روی الکتروود اسپری می‌شود یا یک فویل فلزی است. جمع‌کننده یک سوپرکازن باید بتواند جریان پیک تا ۱۰۰ آمپر را تحمل کند. خارجی‌ترین جزء یک خازن محفظه یا پوشش آن است که تمامی اجزای خازن را در برمی‌گیرد. محفظه با توجه به نقش خود می‌تواند از مواد مختلفی ساخته شود. در این بین اگر محفظه از یک فلز (به طور معمول آلومینیوم) ساخته شود، باید جمع‌کننده‌ها نیز از همان ماده ساخته شوند تا از تشکیل یک سلول گالوانیکی خورنده جلوگیری شود [۲۳].

۲-۱-۱-۸- مقایسه انواع سوپرکازن‌ها

بازه یا محدوده توان برای سوپرکازن‌ها بین ۰.۱ تا ۱ مگاوات و بازه یا محدوده انرژی برای این نوع ذخیره‌ساز بین ۱ تا ۱۰۰ کیلووات ساعت می‌باشد. زمان پاسخگویی سوپرکازن‌ها برابر با چند میلی ثانیه و زمان دشارژ آنها در حد چند میلی ثانیه تا چند دقیقه است. عمر مفید سوپرکازن‌ها بین ۲۵ تا ۳۰ سال است. بازه ذخیره‌سازی در سوپرکازن‌ها بین چند ثانیه تا چند ساعت می‌باشد [۱۱]. در جدول (۲-۱) سایر مشخصات و ویژگی‌های انواع سوپرکازن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. در مواردی که آرایه جدول با علامت (--) پر شده است، اطلاعات معتبر و دقیقی در دسترس نیست.



جدول ۱-۲: مشخصات و ویژگی‌های انواع مختلف سوپرکازن‌ها

انواع سوپر خازن ها			مشخصات و ویژگی ها
خازن های ترکیبی	شبه خازن	خازن های دولایه الکترواستاتیک	
۱۰۰	۱-۱۰		زمان شارژ (ثانیه)
۵۰۰,۰۰۰	۱۰۰,۰۰۰	۱,۰۰۰,۰۰۰	تداوم
۲,۳-۲,۸	۲,۳-۲,۸	۲,۷	ولتاژ سلول (ولت)
۱۵۰-۲۰۰	۱۰	۳-۵	انرژی مخصوص (وات ساعت بر کیلوگرم)
۳-۱۴	--	۲-۱۰	توان مخصوص (وات بر گرم)
۹۰	۹۰	۹۵	بازده (درصد)
--	۱۰۰-۳۰۰		هزینه سرمایه گذاری
--	۳۰۰-۲۰۰۰		
--	۶		هزینه تعمیرات و نگهداری
--	۰,۰۰۵		
--	۲۰-۴۰		دشارژ خودی (درصد در روز)

همانگونه که از جدول (۱-۲) نیز پیداست، کازن‌های دولایه الکترواستاتیک و شبه‌کازن‌ها در بازه زمانی بین ۱ تا ۱۰ ثانیه شارژ می‌شوند در حالی که کازن‌های ترکیبی به دلیل وجود دو نوع فرایند شارژ و نزدیک بودن به ساختار و کارکرد باتری‌ها به زمان قابل توجهی جهت شارژ نیاز دارند.

کازن‌های دولایه الکترواستاتیک بدلیل عدم وجود فرایندهای فارادیک تداوم قابل ملاحظه‌ای در مقایسه با انواع دیگر سوپرکازن‌ها و بخصوص شبه‌کازن‌ها دارند. همانگونه که انتظار می‌رود، تداوم کازن‌های ترکیبی حفاصل و به عبارت بهتر متوسطی از تداوم دو نوع دیگر است.

ولتاژ انواع مختلف سوپرکازن‌ها با یکدیگر تفاوت قابل ملاحظه‌ای ندارند. در این بین، ولتاژ شبه‌کازن‌ها و کازن‌های ترکیبی تنوع بیشتری دارد.

به لطف پیشرفت‌های حاصل شده در ساختار و مواد کازن‌های دولایه الکترواستاتیک، کازن‌های ترکیبی انرژی مخصوص بالاتری دارند. تفاوت بین انرژی مخصوص کازن‌های ترکیبی با دو نوع دیگر بسیار قابل ملاحظه است. از یک طرف مواد و ساختار بهبود یافته و از طرف دیگر الکتروود باتری گونه فارادیک بر انرژی مخصوص کازن‌های ترکیبی افزوده است. علی‌رغم پیشرفت‌های قابل توجه هنوز بالاترین انرژی مخصوص گروه سوپرکازن‌ها با انرژی مخصوص باتری‌هایی که جهت ذخیره‌سازی انرژی بکار می‌روند فاصله دارد. به عنوان مثال انرژی مخصوص باتری‌های لیتیوم-یونی حدود ۲۵۰ وات‌ساعت بر کیلوگرم است.

علی‌رغم انرژی مخصوص پایین کازن‌های دولایه الکترواستاتیک، این کازن‌ها بواسطه عدم وجود فرایند فارادیک، توان مخصوص بالاتری نسبت به شبه‌کازن‌ها دارند. هر چند تاکنون گزارش معتبری در خصوص توان مخصوص شبه‌کازن‌ها ارائه نشده است. وجود الکتروود کازنی (منبع توان) در کازن‌های ترکیبی موجب می‌شود که این کازن‌ها نیز توان

مخصوص قابل توجه‌ای داشته باشند و با وجود پیشرفت‌های حاصله حتی از خازن‌های دولایه الکترواستاتیک پیشی بگیرند.

به دلیل عدم وجود واکنش‌های شیمیایی در خازن‌های دولایه الکترواستاتیک، این خازن‌ها در ذخیره و رهاسازی انرژی بازده بالاتری نسبت به شبه‌خازن‌ها و خازن‌های ترکیبی دارند. در این بین همواره بازده سوپرخازن‌ها بیش از ۹۰ درصد گزارش شده است.

نقطه ضعف یا چالش اساسی در استفاده از سوپرخازن‌ها به عنوان منابع ذخیره‌سازی انرژی، هزینه بالای آنها و همچنین دشارژ خودی یا اتوماتیک بالای آنها می‌باشد. تاکنون اطلاعات دقیقی در خصوص هزینه و دشارژ خودی خازن‌های ترکیبی ارائه نشده است لکن بعید به نظر می‌رسد اتفاق خاصی در این زمینه رخ داده یا پیشرفت قابل توجهی حادث شده باشد.

با توجه به آنچه که گفته شد به نظر می‌رسد بهترین تعبیر یا مقایسه برای انواع سوپرخازن‌ها، مقایسه دوندگان در مسابقات دو سرعت و استقامت باشد. خازن‌های دولایه الکترواستاتیک با توان مخصوص بالا را می‌توان مشابه دوندگان دو سرعت در نظر گرفت که باید در بازه زمانی کوتاه توان قابل ملاحظه‌ای را جهت رسیدن به هدف صرف نمایند. در نقطه مقابل، شبه‌خازن‌ها با انرژی مخصوص بالا دوندگان دو استقامت هستند که در بازه زمانی طولانی، انرژی ذخیره شده را جهت دویدن بکار می‌برند. در این بین با توسعه خازن‌های ترکیبی، می‌توان به هر دو ویژگی دست یافت که بسیار ایده‌آل است و سوپرخازن‌ها را در زمینه ذخیره انرژی به یک پیشرو تبدیل می‌کند.

۲-۱-۱-۹- مزایا و معایب سوپرخازن‌ها

با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش‌های قبلی، مزیت‌های بکارگیری سوپرخازن‌ها به عنوان ذخیره‌سازهای انرژی در مقایسه با سایر ذخیره‌سازها بخصوص باتری‌ها به عنوان رقیب اصلی به صورت ذیل است [۱۰]:

- ۱- توان مخصوص بالا بویژه در مقایسه با باتری‌ها
- ۲- زمان شارژ و دشارژ بسیار کم در مقایسه با باتری‌ها
- ۳- تداوم بالا
- ۴- بازده بالا
- ۵- ایمن و دوستدار محیط زیست در حد قابل قبول
- ۶- بازده دمایی قابل قبول جهت کار
- ۷- امکان استفاده به صورت ترکیبی با انواع دیگر ذخیره‌سازها
- ۸- شارژ ساده و بدون دردسر (نیازی به حفاظت شارژ بیش از حد وجود ندارد)



معایب بکارگیری سوپرکازن‌ها به عنوان ذخیره‌سازهای انرژی در مقایسه با سایر ذخیره‌سازها بخصوص باطری‌ها به عنوان رقیب اصلی عبارتند از [۱۰] :

- ۱- انرژی مخصوص پایین
- ۲- هزینه بالا
- ۳- ولتاژ کاری پایین
- ۴- دشارژ خودی یا اتوماتیک بالا
- ۵- نبود استانداردهای کافی جهت تجاری سازی
- ۶- مقاومت داخلی پایین که در صورت دشارژ شدن به صورت اتصال کوتاه موجب ایجاد جرقه و خطر می‌شود.

۲-۱-۱-۱۰- کاربرد سوپرکازن‌ها

سوپرکازن‌ها در مواردی که نیاز به سیکل‌های شارژ و دشارژ سریع باشد مورد استفاده قرار می‌گیرند. از جمله این موارد می‌توان به سیستم ترمز ماشین‌ها، قطارها و آسانسورها (این سیستم‌ها خاصیت بازیابی و تولید مجدد انرژی را دارند) دستگاه‌های پزشکی یا نظامی، لیزر و میکروویو، منابع تغذیه، سیستم‌های امنیتی و اطلاعاتی، مدارهای راه انداز LED های توان بالا، توربین‌های بادی، شبکه‌های برق‌رسانی (به منظور پایداری شبکه)، منابع تغذیه وقفه‌ناپذیر کامپیوترهای حساس، درهای برقی و تثبیت‌کننده‌های ولتاژ اشاره کرد. واحدهای کوچک از ابرکازن‌ها نیز به عنوان حافظه پشتیبان و حافظه استاتیک با قابلیت دسترسی تصادفی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۴].

۲-۱-۱-۱۱- تاریخچه پیدایش و تکامل سوپرکازن‌ها

ایده اولیه طراحی و ساخت سوپرکازن یا به عبارت بهتر خازن، برای اولین بار در سال‌های میانی دهه ۴۰ از سده هجدهم میلادی توسط دانشمند آلمانی Ewald Georg von Kleist و دانشمند هلندی Pieter van Musschenbroek که به صورت مستقل از یکدیگر کار می‌کردند، مطرح شد. این خازن Leyden jar نام داشت. خازن مذکور یک ظرف شیشه‌ای بود که داخل و خارج آن با فویل آلومینیومی پوشانده شده بود و این فویل‌ها از یکدیگر ایزوله بودند. با توجه به مشخصات ارائه شده، ظرفیت این خازن یک نانوفاراد تخمین زده می‌شود [۲۵].

پس از اختراع صدرالذکر، دانشمندان در سراسر جهان مدل‌ها و طرح‌های متنوعی را به منظور ساخت خازن با ظرفیت‌های بالاتر از جنس خازن‌های دولایه الکترواستاتیک ارائه نمودند. از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل هلمهولتز آلمانی در ۱۸۸۰، مدل گوی- چاپمن در ۱۹۱۰ و مدل استرن در ۱۹۲۴ اشاره نمود که با گذشت زمان بهتر و دقیق‌تر شدند لکن در حد تئوری باقی ماندند. در اوایل دهه ۵۰ میلادی، مهندسان شرکت جنرال الکتریک به منظور ساخت خازن، آزمایشاتی با الکتروود از جنس کربن متخلخل انجام دادند. این ایده از طراحی پیل سوختی و باطری‌های قابل شارژ گرفته شده بود. کربن فعال شده یک هادی الکتریکی متخلخل با سطح مخصوص قابل توجه است. در سال ۱۹۵۷،

Becker یک خازن الکترولیتی ولتاژ پایین با الکتروکربن متخلخل را توسعه داد. او معتقد بود که انرژی در حفره‌های کربن و حفره‌های فویل متصل به خازن الکترولیتی توسعه داده شده ذخیره می‌شود. از آنجا که مکانیزم دولایه در آن زمان برای وی شناخته شده نبود او در تشریح اختراع خود نوشت "دقیقا مشخص نیست که چه اتفاقی می‌افتد اما ظرفیت قابل ملاحظه‌ای ایجاد شده است". جنرال الکتریک اختراع Becker را دنبال نکرد [۲۴].

در سال ۱۹۶۶، محققان در شرکت SOHIO (قدیمی‌ترین شرکت نفتی آمریکایی) در حالی که به آزمایشات و طراحی پیل‌سوختی مشغول بودند، تجهیز جدیدی را به منظور ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی توسعه دادند. در این اختراع نیز خاصیت‌های ذاتی ذخیره‌سازی انرژی الکتروشیمیایی تشریح نشد. در ادامه و در سال ۱۹۷۰، خازن الکتروشیمیایی توسط Donald L. Boos ثبت اختراع شد. این خازن که در واقع اولین نمونه از شبه‌خازن‌ها بود به عنوان یک خازن الکترولیتی با الکترودهای کربن ثبت گردید [۲۴].

خازن‌های الکتروشیمیایی اولیه یا شبه‌خازن‌ها از دو فویل آلومینیومی پوشیده شده با کربن فعال بهره می‌بردند. الکترودها در یک الکترولیت مستغرق شده و سپس توسط یک عایق نازک از یکدیگر جدا می‌شدند. این ساختار، خازنی با ظرفیت تقریب یک فاراد را نتیجه می‌داد که به طور قابل توجهی از ظرفیت یک خازن الکترولیتی با ابعاد مشابه بیشتر بود. طراحی مکانیکی مذکور، پایه طراحی بسیاری از خازن‌های الکتروشیمیایی شد.

شرکت SOHIO اختراع محققان خود را تجاری نکرد و پروانه صنعتی خود را به شرکت بین‌المللی NEC واگذار کرد. NEC اختراع مذکور را در سال ۱۹۷۱ تحت عنوان سوپرکازن روانه بازار کرد که به منظور تغذیه پشتیبان برای حافظه کامپیوتر مورد استفاده قرار گرفت. حداث سال‌های ۱۹۷۵ تا ۱۹۸۰، Brian Evans Conway فعالیت‌های جامع و گسترده‌ای در خصوص خازن‌های الکتروشیمیایی یا شبه‌خازن‌ها بر پایه اکسید روتنیوم انجام داد. طی این سال‌ها بازار سوپرکازن‌ها به آرامی رشد کرد. در سال ۱۹۷۸، پاناسونیک، سوپرکازن خود را به بازار عرضه کرد. این محصول، منبع انرژی بسیار خوبی برای کاربردهای پشتیبان حافظه شد. در سال ۱۹۸۲، اولین سوپرکازن با مقاومت داخلی کم توسط موسسه تحقیقاتی Pinnacle جهت کاربردهای نظامی توسعه داده شد. در ادامه همین موسسه محصول خود با نام PRI Ultracapacitor را روانه بازار کرد. رقابت جدی در این حوزه چند سال بعد شروع شد. در سال ۱۹۸۷، شرکت ELNA اولین سوپرکازن خود از جنس خازن‌های دولایه الکترواستاتیک را به بازار عرضه کرد. این نسل از خازن‌های الکترواستاتیکی دولایه، مقاومت داخلی بسیار زیادی داشتند و این مساله جریان دشارژ را محدود می‌کرد. خازن‌های مذکور برای مواردی همچون تغذیه حافظه‌های استاتیک و پشتیبانی اطلاعات مورد استفاده قرار می‌گرفت [۲۴].

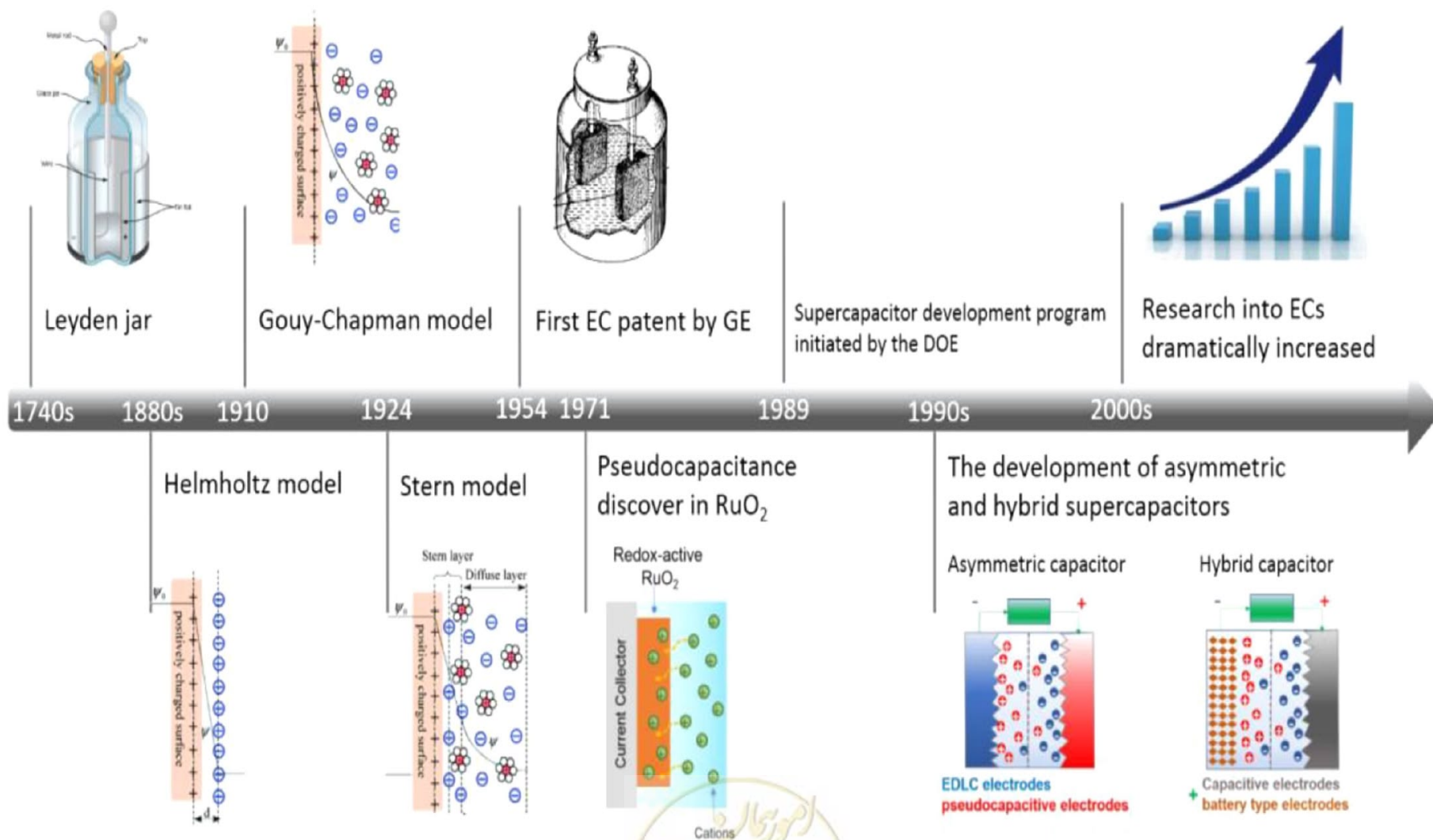
در پایان سال‌های پایانی دهه هشتاد، الکترودهای بهبود یافته ظرفیت خازن‌ها را افزایش داد. طی همین مدت پیشرفت الکترولیت‌ها در زمینه عبور جریان، مقاومت داخلی خازن‌ها را کاهش داد که در نتیجه جریان شارژ و دشارژ افزایش قابل ملاحظه‌ای پیدا کرد. در سال ۱۹۹۱، Brian Evans Conway که از مدت‌ها قبل تحقیقات خود را در زمینه توسعه سوپرکازن‌ها شروع کرده بود، تفاوت‌های رفتار سوپرکازن و رفتار باتری در زمینه ذخیره‌سازی انرژی

الکتروشیمیایی را تشریح کرد. در سال ۱۹۹۲، آزمایشگاه ماکسول، توسعه مشابه‌ای را در پیش گرفت و محصول خود را با نام Boost Caps به بازار ارائه کرد که نشان از کاربرد آن در صنعت برق داشت [۲۴].

در ادامه از آنجا که انرژی ذخیره شده در خازن با توان دوم ولتاژ رابطه مستقیمی دارد، محققان بر آن شدند که ولتاژ شکست خازن‌ها را تا حد امکان افزایش دهند. در سال ۱۹۹۴، David A. Evans با بکارگیری آند یک خازن ولتاژ بالای الکتrolیتی تانتالومی، یک خازن ترکیبی جدید متشکل از خازن الکتrolیتی و خازن الکتروشیمیایی (از نوع شبه‌خازن) را توسعه داد. خواص این خازن، ترکیب خواص خازن‌های الکتrolیتی و الکتروشیمیایی بود. ظرفیت خازن بدست آمده ۵ برابر بیشتر از ظرفیت یک خازن الکتrolیتی تانتالومی با ابعاد یکسان بود. هزینه بالای خازن توسعه داده شده، کاربرد آن را به موارد خاص نظامی محدود کرد [۲۴].

Brian Evans Conway در سال ۱۹۹۹، افزایش ظرفیت خازنی به واسطه دو عامل واکنش‌های اکسایشی و کاهش و انتقال شارژ فارادیک را به طور کامل شرح داد. سوپرخازنی که توسط Brian Evans Conway در این سال توسعه داده شد در واقع یک خازن ترکیبی بود. پیشرفت سوپرخازن‌ها از سال ۲۰۰۰ به بعد شامل خازن‌های لیتیوم یونی بوده است. پیشرو در زمینه این خازن‌ها که در واقع خازن ترکیبی (ترکیب خازن‌های دولایه الکترواستاتیکی و شبه‌خازن) بشمار می‌روند شرکت FDK است که اولین محصول را در سال ۲۰۰۷ به بازار عرضه کرده است. این خازن‌ها از یک الکتروود کربنی الکترواستاتیک و یک الکتروود الکتروشیمیایی لیتیوم یونی که در آن از ناخالصی استفاده شده است بهره می‌برند. این مساله نه تنها ظرفیت را افزایش می‌دهد بلکه افزایش ناخالصی به آند (به عنوان پروسه Pre-doping شناخته می‌شود) سطح ولتاژ آن را پایین آورده و در نتیجه افزایش ولتاژ سلولی حادث می‌شود که انرژی مخصوص را بالا می‌برد. موسسات تحقیقاتی، شرکت‌ها و دانشگاه‌های مختلف در دنیا در حال تحقیق و پژوهش بر روی سوپرخازن‌ها بوده و تلاش دارند به مشخصات مدنظر خود در این زمینه دست یابند. شکل (۲-۶) خلاصه‌ای از روند توسعه و پیشرفت سوپرخازن‌ها از ابتدا تاکنون را نشان می‌دهد [۲۴].





شکل ۲-۶: روند توسعه و پیشرفت سوپرکازن‌ها از ابتدا تاکنون [۲۱]

۲-۲- کویل‌های مغناطیسی ابررسانا

۲-۲-۱- خاصیت ابررسانایی

از بین رفتن کامل مقاومت الکتریکی و اخراج میدان مغناطیسی در مواد جامد مختلف هنگامی که آنها به کمتر از یک دمای خاص و حساس سرد می‌شوند به عنوان ابررسانایی شناخته شده است. این خاصیت اولین بار توسط فیزیکدان هلندی کامرلینگ در سال ۱۹۱۱ کشف شد. پدیده یا خاصیت ابررسانایی با اخراج میدان مغناطیسی یا اخراج خطوط میدان مغناطیسی (که به عنوان اثر دیامغناطیس شناخته می‌شود) از ماده ابررسانا همراه است که به عنوان اثر مایسنر شناخته می‌شود. به عبارت بهتر، ابررساناها یا مواد در حالت ابررسانا دیامغناطیس کامل هستند و این بدان معنا است که خطوط میدان وارد ابررسانا نمی‌شوند و به صورت یک حلقه ماده را در بر می‌گیرند [۲۶].

توضیح اینکه چرا مواد خاصیت ابررسانایی از خود نشان می‌دهند اولین بار توسط سه فیزیکدان ارائه شد. جان باردین، لئون کوپر و رابرت شری در نظریه خود با عنوان نظریه BCS توضیح دادند که الکترون‌ها با تشکیل جفت‌های کوپر موجب بروز پدیده ابررسانایی می‌شوند. در حالت کلی الکترون‌ها به دلیل وجود ناخالصی‌ها، نقص‌های موجود در ساختار ماده و لرزش‌های ناخواسته پراکنده می‌شوند که این مساله به معنی افزایش مقاومت الکتریکی است. در دماهای پایین هنگامی که جفت کوپر شکل می‌گیرد، الکترون‌ها بدون اینکه پراکنده شوند می‌توانند به آزادی حرکت نمایند. در نتیجه این عمل مقاومت الکتریکی به سمت صفر میل می‌کند [۲۶].

۲-۲-۲- انواع ابررساناها

تاکنون دو نوع دسته‌بندی برای ابررساناها ارائه شده است. دسته بندی اول بر اساس نوع پاسخ به میدان مغناطیسی و دسته‌بندی دوم بر اساس دمای بحرانی می‌باشد.

در دسته‌بندی بر اساس نوع پاسخ به میدان مغناطیسی، ابررساناها در دو دسته نوع (۱) و نوع (۲) جای می‌گیرند. ابررساناهای نوع (۱) عمدتاً فلزات یا متالوئیدهایی هستند که خاصیت ابررسانایی خوبی از خود نشان می‌دهند. ویژگی‌های برجسته این گروه شامل مقاومت الکتریکی صفر در دمای کمتر از دمای بحرانی، میدان مغناطیسی داخلی صفر و یک میدان مغناطیسی بحرانی که بالای آن ابررسانایی متوقف می‌شود، می‌باشد. جیوه، اورانیوم، کادمیم و آلومینیوم از جمله این ابررساناها هستند [۲۷].

ابررساناهای نوع (۲) از آلیاژها یا سرامیک‌های اکسید پیچیده ساخته می‌شوند. ابررساناهای دما بالا که در ادامه توضیح داده خواهند شد، ابررسانای نوع (۲) هستند. ابررساناهای نوع (۲) از نظر مکانیکی سخت‌تر از نوع (۱) هستند. علاوه بر این میدان مغناطیسی بحرانی بالاتری نیز دارند. این گروه از ابررساناها معمولاً در حالت ترکیبی از حالت نرمال و ابررسانایی قرار دارند. به این حالت، اصطلاحاً حالت گرداب گفته می‌شود. در حالت گرداب، هسته مواد با گردابی از جریان‌های ابررسانایی احاطه می‌شود که این مساله موجب می‌شود اثر مایسنر به صورت ناقص اتفاق افتد. نیوبیوم

تیتانیوم (NbTi)، نیوبیوم نیتريد (NbN)، نیوبیوم قلع (Nb₃Sn) و وانادیوم سیلیکات (V₃Si) از جمله ابررساناهای نوع (۲) بشمار می‌روند [۲۷].

در دسته‌بندی بر اساس دمای بحرانی، ابررساناها به دو دسته دما بالا و دما پایین تقسیم‌بندی می‌شوند. در ابررساناهای دما پایین، خاصیت مذکور فقط در دماهای پایین می‌تواند رخ دهد. دمای بحرانی برای ابررساناها در این گروه کمتر از ۲۰ درجه کلوین (معادل ۲۵۳- درجه سانتیگراد و ۴۲۳- درجه فارنهایت) می‌باشد. در دماهای مذکور مقاومت الکتریکی وجود ندارد و هیچگونه انرژی تلف نمی‌شود.

در سال ۱۹۸۶، فیزیکدان آلمانی J. Georg Bednorz و فیزیکدان سوئیسی K. Alex Muller، سرامیکی را کشف کردند

که می‌توانست به یک ابررسانا در دمای نزدیک به ۳۰ درجه کلوین (معادل ۲۴۳- درجه سانتیگراد و ۴۰۵- درجه فارنهایت) تبدیل شود. جایزه نوبل همان سال برای این کشف به آنها اهدا شد. با وجود گذشت بیش از ۳۲ سال از زمان کشف مذکور، مکانیسم مربوطه هنوز به صورت کامل تشریح نشده است. تاکنون، چندین ترکیب بر پایه آهن به عنوان ابررسانای دما بالا شناسایی شده است. در کوپل‌های مغناطیسی ابررسانا، بکارگیری ابررساناهای دما بالا به دلیل افزایش میدان مغناطیسی و در نتیجه افزایش انرژی ذخیره شده (انرژی ذخیره شده با توان دوم میدان مغناطیسی رابطه مستقیم دارد) ترجیح داده می‌شود [۲۸].

۲-۲-۳- نحوه عملکرد کوپل‌های مغناطیسی ابررسانا

در کوپل‌های مغناطیسی ابررسانا یا SMES^۱ انرژی در میدان مغناطیسی ایجاد شده بوسیله جریان مستقیم که از کوپل ابررسانا عبور می‌کند ذخیره می‌شود. کوپل مذکور به دماهای بسیار پایین سرد می‌شود بگونه‌ای که حد دمایی مرتبط با خاصیت ابررسانایی آن حفظ شود.

از دیدگاه مهندسان برق SMES یک عنصر اندوکتانسی یا سلفی است که می‌تواند انرژی الکتریکی را به صورت مغناطیسی ذخیره کند و آن را به شبکه برق یا بار برگرداند. اگر اندوکتانس سیم پیچ یا سلف SMES، L باشد که جریان مستقیم برابر I را حمل می‌کند، انرژی ذخیره شده به صورت رابطه (۷-۲) بیان می‌شود.

$$W = \frac{1}{2} LI^2 \quad (7-2)$$

به منظور نگهداری القاگر یا هسته یا چوک یا راکتور القاءکننده در وضعیت ابررسانایی خود، هسته مذکور در هلیوم مایع که ایزولاسیون خلا، در خصوص آن صورت پذیرفته است به طور کامل مستغرق می‌شود. هسته به طور معمول از نیوبیوم-تیتانیوم ساخته می‌شود و خنک‌کننده، هلیوم مایع در دمای ۴٫۲ درجه کلوین یا سوپر مایع هلیوم در دمای ۱٫۸ درجه کلوین می‌باشد. سوپر مایع حالتی از ماده است که در آن ماده یک مایع با ویسکوزیته یا گرانروی صفر است. پدیده

^۱ Superconducting Magnetic Energy Storage

سوپر مایع اولین بار در هلیوم مایع کشف شد. کویل‌های مغناطیسی ابررسانا هم اکنون در مراحل اولیه از فاز رشد قرار دارند [۲۹-۳۰].

۲-۲-۴- مشخصات و ویژگی‌های کویل‌های مغناطیسی ابررسانا

برای کویل‌های مغناطیسی ابررسانا بازه توان بین ۰,۰۱ تا ۱۰ مگاوات، بازه انرژی بیش از ۱۵ کیلووات ساعت و بدون کران بالا، انرژی مخصوص بین ۰,۵ تا ۵ وات‌ساعت بر کیلوگرم، توان مخصوص بین ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ وات بر کیلوگرم، چگالی حجمی توان معادل ۲۶۰۰ کیلووات بر متر مکعب و چگالی حجمی انرژی معادل ۶ کیلووات ساعت بر متر مکعب گزارش شده است [۳۱-۳۳].

زمان شارژ در حد دقیقه، زمان پاسخگویی در حدود چند میلی ثانیه، زمان دشارژ در حدود چند میلی ثانیه تا ۸ ثانیه و بازه ذخیره‌سازی مناسب بین چند دقیقه تا چند ساعت از جمله مشخصات کویل‌های مغناطیسی ابررسانا بشمار می‌روند. این ذخیره‌ساز را می‌توان به صورت کامل شارژ و دشارژ نمود (عمق دشارژ برابر ۱ یا ۱۰۰ درصد امکان‌پذیر است). دشارژ خودی کویل‌های مغناطیسی ابررسانا بین ۱۰ تا ۱۵ درصد در روز است. بازه دمایی کارکرد این سیستم‌ها نیز بین ۱۴۰- تا ۲۷۰- درجه سانتیگراد می‌باشد [۱۱-۱۲].

بازده ذخیره‌سازی در کویل‌های مغناطیسی ابررسانا بین ۹۰ تا ۹۷ درصد است. تداوم (شامل یک بار شارژ و دشارژ کامل) این نوع ذخیره‌ساز بین ۲۰ هزار تا ۱۰۰ هزار و طول عمر مفید آن بین ۲۰ تا ۳۰ سال گزارش شده است. هزینه سرمایه‌گذاری برای این ذخیره‌ساز شامل هزینه مربوط به توان بین ۲۰۰ تا ۳۵۰ دلار به ازای هر کیلووات و هزینه مربوط به انرژی بین ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ دلار به ازای هر کیلووات ساعت می‌باشد. همچنین هزینه ثابت تعمیر و نگهداری کویل‌های مغناطیسی ابررسانا ۱۸,۵ دلار بر کیلووات در سال و هزینه متغیر مربوطه ۰,۰۰۱ دلار بر کیلووات ساعت می‌باشد [۱۱-۱۲].

فضای مورد نیاز برای ذخیره‌سازی یک کیلووات ساعت انرژی در کویل‌های مغناطیسی ابررسانا بین ۰,۹۳ تا ۲,۶ متر مربع می‌باشد. اثر حافظه در این نوع ذخیره‌ساز دیده نشده است. با در نظر گرفتن پارامترهای زیاد، متوسط، کم، خیلی کم و فاقد تاثیر برای تاثیرات مخرب زیست محیطی، اثر زیست محیطی این ذخیره‌ساز "کم" گزارش شده است. کویل‌های مغناطیسی ابررسانا قابلیت کاربرد متحرک نیز دارند [۱۸].

با در نظر گرفتن سطوح خوب، معمولی و ضعیف برای شاخص‌های مقیاس‌پذیری و ایمنی و سطوح زیاد، متوسط و کم برای شاخص انعطاف‌پذیری، کویل‌های مغناطیسی ابررسانا در شاخص اول در سطح معمولی، در شاخص دوم در سطح ضعیف و در شاخص آخر در سطح کم قرار می‌گیرند [۱۹].



۲-۲-۵- اجزاء تشکیل دهنده کوئل‌های مغناطیسی ابررسانا

کوئل مغناطیسی ابررسانا از چهار جزء اصلی تشکیل شده که در شکل (۲-۲) نشان داده شده است. این چهار جزء عبارتند از :

۱- کوئل مغناطیسی و ساختار پشتیبان آن

۲- سیستم خنک کننده در دماهای بسیار پایین

۳- سیستم تبدیل توان

۴- سیستم کنترل

کوئل مغناطیسی و ساختار پشتیبان آن شامل کوئل مغناطیسی و سیستم محافظ آن می‌باشد. کوئل مغناطیسی قلب سیستم است و انرژی ذخیره شده در آن با دو فاکتور ذیل تعیین می‌شود:

۱- ابعاد و هندسه کوئل. هر چه سایز بزرگتر باشد انرژی بیشتری را می‌توان در کوئل ذخیره نمود.

۲- مشخصات هادی که ماکزیمم جریان عبوری را مشخص می‌کند.

در حالت کلی دو توپولوژی برای کوئل شامل سلونوئید و تروئید وجود دارد. به دلیل پاره‌ای از مسائل از جمله هزینه به طور معمول توپولوژی سلونوئید بر توپولوژی تروئید ترجیح داده می‌شود [۳۳]. مواد ابررسانا مورد استفاده در هسته نیز در دو گروه دسته‌بندی می‌شوند. این دو گروه عبارتند از :

۱- مگنت ابررسانای دما پایین (^۱ LTS)

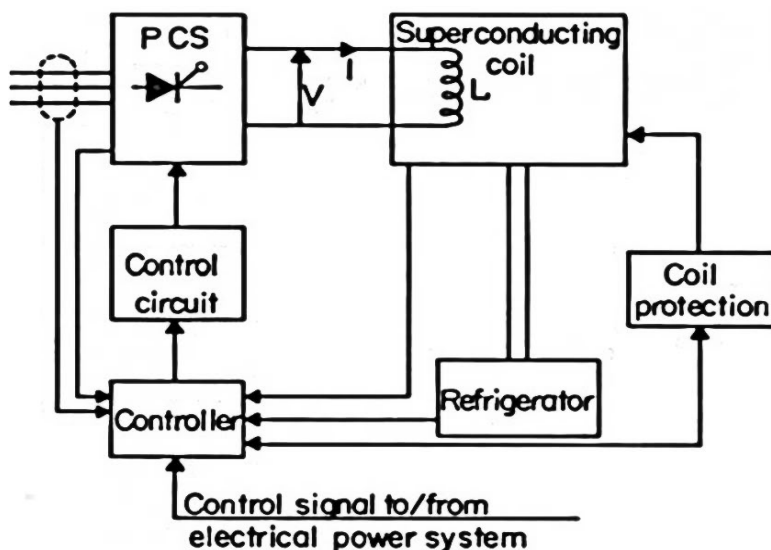
۲- مگنت ابررسانای دما بالا (^۲ HTS)

استفاده از مگنت ابررسانای دما پایین با هزینه فراوانی همراه است. بنابر این محققان تلاش فراوانی دارند تا بتوانند از مگنت ابررسانای دما بالا استفاده کنند و تحقیقات فراوانی در این زمینه در دست انجام است. سیستم حفاظت با توجه به سایز و توان کوئل مغناطیسی ابررسانا طراحی و تنظیم می‌شود. وظیفه اصلی سیستم حفاظت، پایدار نگهداشتن سیستم تحت هرگونه خطا یا مشکل است [۳۴].



¹ Low-temperature superconductor magnet

² High-temperature superconductor magnet



شکل ۷-۲: شماتیک یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر کویل مغناطیسی ابررسانا

سیستم خنک‌کننده شامل سرماپا، کمپرسور، محافظ خلاء و ماده خنک‌کننده است. به منظور حفظ دماهای پایین از هلیوم استفاده می‌شود. محافظ خلاء موجود در سیستم، هلیوم متراکم شده را دریافت نموده و به صورت هلیوم مایع از آن برای خنک کردن کویل هسته استفاده می‌کند. در واقع یک سیکل تبرید در دماهای پایین شکل می‌گیرد که هدف آن خنک نگه‌داشتن کویل است.

اینورترها، یکسوسازها و مدارات الکترونیکی، اجزاء سیستم تبدیل توان در سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر کویل‌های مغناطیسی ابررسانا هستند. در حالت کلی این بخش از سیستم شامل مبدل‌هایی است که جریان مستقیم را به متناوب و بالعکس تبدیل می‌کند. بر اساس بکارگیری و آرایش مبدل‌های مذکور و مدارات الکترونیکی بکارگرفته شده سه دسته‌بندی برای سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر کویل‌های مغناطیسی ابررسانا در نظر گرفته می‌شود [۳۴]. این سه دسته‌بندی عبارت‌اند از :

- ۱- سیستم‌های مبتنی بر ترستور
- ۲- سیستم‌های مبتنی بر مبدل‌های منبع ولتاژ
- ۳- سیستم‌های مبتنی بر مبدل‌های منبع جریان

سیستم کنترل در واقع کنترل‌کننده ارتباط بین تقاضای توان مورد نیاز شبکه و توان تزریق شده یا گرفته شده از کویل می‌باشد. این سیستم در هر لحظه شرایط کل سیستم و از همه مهمتر دمای مورد نیاز کارکرد کویل را بررسی کرده و اقدامات کنترلی لازم را انجام می‌دهد. این سیستم از ادوات کنترلی و پردازنده مرکزی نظیر میکروکنترلرها بهره می‌برد [۳۵].



۲-۲-۶- مزایا و معایب کوپل‌های مغناطیسی ابررسانا

همانند سایر ذخیره‌سازها، کوپل‌های مغناطیسی ابررسانا مزایا و معایبی دارند. مزایای این سیستم‌ها موجب کاربردهای خاص می‌شود و در نقطه مقابل، معایب موجود ضمن ایجاد محدودیت، سایر کاربردها یا بهره‌گیری از کوپل‌های مغناطیسی ابررسانا جهت ذخیره‌سازی را منتفی می‌سازند. از جمله مزایای کوپل‌های مغناطیسی ابررسانا می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد [۳۱-۳۳]:

۱- بازده بسیار بالا (به صورت نوعی ۹۵ درصد)

۲- توان مخصوص بالا

۳- پاسخ سریع جهت برطرف کردن نیاز به انرژی در بازه زمانی بسیار کوتاه

۴- تداوم زیاد

۵- قابلیت اطمینان بالا

۶- وابستگی کمتر انرژی خروجی به نرخ دشارژ در مقایسه با باتری‌ها

۷- دوستدار محیط زیست

در نقطه مقابل معایب و چالش‌های بهره‌گیری از کوپل‌های مغناطیسی ابررسانا به منظور ذخیره‌سازی انرژی عبارتند از [۳۱-۳۳]:

۱- انرژی مخصوص پایین

۲- نیاز به یک سیستم خنک‌کننده بسیار قوی

۳- نیاز به یک ساختار مکانیکی مقاوم جهت کاهش اثرات نیروهای لورنتز بر روی خواص ابررسانایی

۴- هزینه تمام شده بالا

۲-۲-۷- کاربرد کوپل‌های مغناطیسی ابررسانا

SMES ها با توجه به مشخصات ذکر شده کاربردهای متنوعی دارند. از جمله این کاربردها می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد [۳۶]:

۱- استفاده در ادوات FACTS یا همان سیستم‌های انتقال AC انعطاف‌پذیر

۲- لانچرهای الکترومغناطیسی که در واقع یک اسلحه الکتریکی است.

۳- تراز نمودن بار و تولید در شبکه‌های قدرت

۴- منابع تغذیه بدون وقفه یا همان UPS ها

۵- بریکرها در خطوط قدرت

۶- رزرو چرخان در شبکه برق



۲-۲-۸- تاریخچه پیدایش و تکامل SMES ها

اولین تلاش‌ها برای طراحی و ساخت سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر کوئل‌های مغناطیسی در سال ۱۹۶۹ در فرانسه توسط شخصی به نام Ferrier صورت پذیرفت. در سال ۱۹۷۱ تحقیقاتی گسترده در دانشگاه ویسکانسین آمریکا شروع شد که در نهایت منجر به ساخت اولین SMES شد. بعد از این موفقیت، شرکت‌های متعددی وارد عرصه ساخت SMES ها شدند. از جمله این شرکت‌ها می‌توان به هیتاچی در سال ۱۹۸۶، Wisconsin Public Service Corporation در سال ۲۰۰۰ و ACCEL Instruments GmbH در سال ۲۰۰۵ اشاره کرد. ظرفیت نصب شده از SMES ها در حال حاضر در جهان بیش از ۱۰۰ مگاوات است. طراحی، ساخت و بکارگیری سیستم‌های مذکور طی دو دهه گذشته به دلیل محدودیت‌های مختلف به کندی انجام شده است [۳۶].

۲-۳- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این فصل از گزارش روش‌های الکتریکی ذخیره‌سازی انرژی مورد بررسی قرار گرفت. در روش الکتریکی ذخیره‌سازی انرژی از سوپرکازن‌ها یا همان ابرخازن‌ها و کوئل‌های مغناطیسی ابرسانا جهت ذخیره‌سازی استفاده می‌شود. در ابتدا به سوپرکازن‌ها پرداخته شد و ضمن معرفی اجمالی، تاریخچه پیدایش و تکامل این تجهیز شرح داده شد. در گام بعدی کوئل‌های مغناطیسی ابرسانا معرفی شدند. بررسی تاریخچه کوئل‌های مغناطیسی ابرسانا نشان داد که این تجهیزات قدمت کمتری در مقایسه با سوپرکازن‌ها دارند و پیشرفت در حوزه مربوطه به دلیل محدودیت‌های موجود به کندی صورت می‌پذیرد.



فصل ۳

روش‌های مکانیکی ذخیره‌سازی انرژی و فناوری‌های مربوطه



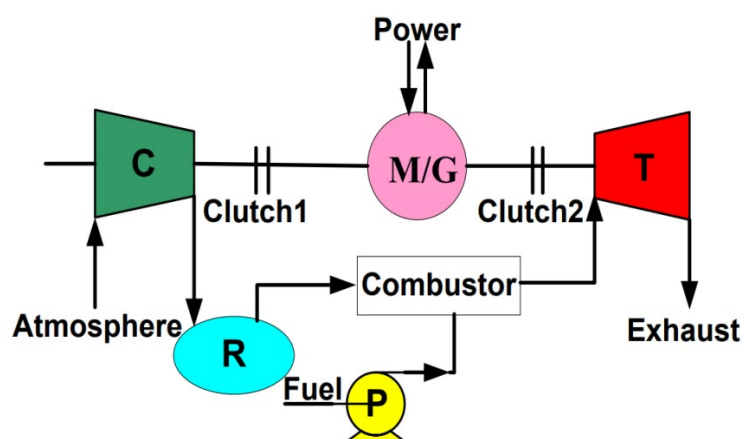
مقدمه

در این فصل از گزارش به تشریح روش‌های مکانیکی ذخیره‌سازی انرژی پرداخته می‌شود. در این روش از سیستم‌های هوای فشرده (^۱CAES)، سیستم‌های هیدروالکتریکی تلمبه ذخیره‌ای (^۲PHEs)، چرخ طیار یا فلاپیول و سیستم‌های مبتنی بر انرژی پتانسیل گرانشی جهت ذخیره‌سازی استفاده می‌شود. مواردی که ذکر شد به ترتیب توضیح داده شده و مشخصات هر یک به صورت اجمالی مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت.

۳-۱- سیستم‌های هوای فشرده

۳-۱-۱- اجزاء و نحوه عملکرد سیستم‌های هوای فشرده

اجزای اصلی یک سیستم هوای فشرده شامل موتور (M)، کمپرسور (C)، محفظه ذخیره هوا (R)، محفظه احتراق (Combustor)، توربین (T) و ژنراتور (G) است. نحوه عملکرد این سیستم به این صورت است که در ساعات غیر پیک، برق را از شبکه می‌گیرد و به وسیله یک کمپرسور، هوا را تا حدود ۷۵ bar و بیشتر فشرده ساخته و در داخل محفظه‌ای می‌دمد. البته برای استفاده بهینه از فضا، هوا پیش از تزریق به داخل حفره، خنک می‌شود. اجزاء یک سیستم نمونه CAES در شکل (۳-۱) آورده شده است [۳۷].



شکل ۳-۱: شماتیک یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر هوای فشرده

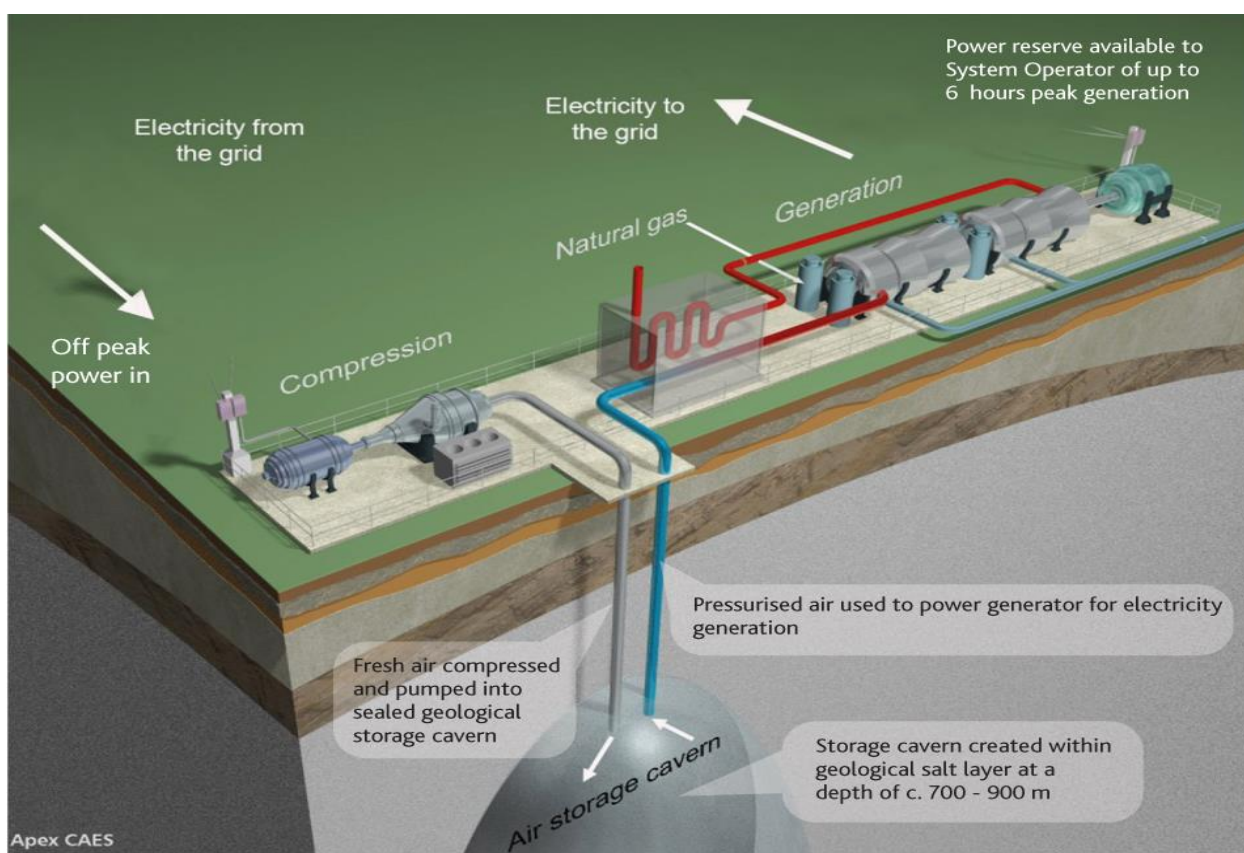
کمپرسور و مخزن هوا نقش کلیدی در میان اجزاء یک سیستم CAES دارند. طراحی یا انتخاب کمپرسورها بر اساس نوع کاربرد و فشار هوای ذخیره شده می‌باشد. در برخی کاربردها به منظور رسیدن به چگالی ذخیره‌سازی بالا در حجم کم فشار هوا تا ۳۰ مگا پاسکال نیز افزایش می‌یابد. در این موارد به طور خاص از کمپرسورهای رفت و برگشتی چند مرحله‌ای استفاده می‌شود. فشار متوسط استفاده شده برای سیستم‌های CAES در مقیاس بزرگ نیز در حدود ۸ مگا

^۱ Compressed Air Energy Storage

^۲ Pumped Hydroelectric Energy Storage

پاسکال است در سیستم‌های مقیاس بزرگ، ترکیب چند مرحله‌ای مشتمل بر کمپرسورهای محوری در مرحله فشار کم و کمپرسورهای گریز از مرکز در مرحله فشار زیاد انتخاب غالب بشمار می‌رود [۳۸].

برای ایجاد محفظه نگهداری هوا یا می‌توان آن را به طور مصنوعی ساخت که هزینه بسیار زیادی دارد و یا از سفره‌های آب زیرزمینی و یا معادن مختلف استفاده کرد. هوای فشرده با تلفات بسیار اندک در محفظه نگهداری می‌شود و در مواقع لزوم، بعد از خروج، در اتاق احتراق با مقداری سوخت مخلوط و سپس به توربین گازی انتقال و در نهایت با استفاده از ژنراتور، برق تولید می‌شود. شماتیک بهره‌برداری از یک سیستم ذخیره‌سازی هوای فشرده در شکل (۲-۳) آورده شده است.



شکل ۲-۳: شماتیک بهره‌برداری از سیستم ذخیره‌سازی هوای فشرده

۳-۱-۲- انواع سیستم‌های ذخیره‌ساز هوای فشرده

۳-۱-۲-۱- کلاسه‌بندی سیستم‌های ذخیره‌ساز هوای فشرده بر اساس نوع مخزن

سیستم‌های ذخیره‌ساز هوای فشرده با توجه به نوع مخزن به دو دسته زیرزمینی و روزمینی تقسیم‌بندی می‌شوند. مخازن مورد استفاده نیز می‌توانند بر دو قسم باشند. دسته اول مخازن با حجم ثابت است و دسته دوم مخازن با فشار ثابت هستند.

مخزن با حجم ثابت یک محفظه با ابعاد مشخص است که برای ذخیره‌سازی هوا مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نکته از نظر ترمودینامیکی به معنی وجود یک سیستم با حجم ثابت و فشار متغیر است. فشار متغیر مشکلات و محدودیت‌های بهره‌برداری از کمپرسورها و توربین‌ها را به همراه دارد. بنابر این کنترل تغییرات فشار به منظور حفظ آن در محدوده مشخص الزامی می‌باشد.

مخازن با حجم ثابت اغلب غارهای زیرزمینی هستند که بواسطه استخراج محلول ایجاد می‌شوند (به عنوان مثال استخراج نمک حل شده در آب). استفاده از معادن متروکه نیز می‌تواند راهگشا باشد. استفاده از سازه‌های سنگی متخلخل، مانند مواردی که گاز طبیعی در آنها یافت می‌شود، نیز اخیراً مورد توجه قرار گرفته است. همچنین در برخی سیستم‌های جدید، خط لوله زیرزمینی به عنوان مخزن ذخیره‌سازی مورد استفاده قرار گرفته و نتایج قابل قبولی را به همراه داشته است. پرواضح و مبرهن است که هزینه این سیستم‌ها بالاتر است، اما انتخاب مکان با طراح سیستم است و این مساله آزادی عمل قابل توجهی ایجاد می‌کند، در حالی که استفاده از مخازن طبیعی نیازمند وجود سازه‌های خاص زمین شناسی همچون گنبد‌های نمکی، سفره‌های آب و غیره می‌باشد.

در حالت فشار ثابت، مخزن ذخیره‌سازی تحت فشار ثابت نگه داشته می‌شود، در حالی که حجم‌های مختلف و متغیری تجربه می‌شود. انواع زیادی از مخازن ذخیره‌سازی با فشار ثابت، طراحی و ساخته شده است. از جمله این مخازن می‌توان به مخازن قرار گرفته در زیر آب اشاره کرد. این نوع مخازن صدها متر زیر آب قرار می‌گیرند و فشار هیدرواستاتیک ستون آب در بالای مخزن ذخیره‌سازی، امکان کنترل فشار در سطح مورد نظر را فراهم می‌سازد. استفاده از مخازن با فشار ثابت مزایای ذیل را به همراه دارد [۳۸]:

۱- چگالی انرژی سیستم ذخیره‌سازی را بهبود می‌بخشد چرا که می‌توان از تمام هوای موجود استفاده کرد. توضیح آنکه فشار هوا در کلیه شرایط شارژ مخزن ثابت و یکسان است. بنابر این محدودیت در استفاده از هوا توسط توربین وجود ندارد. در حالی که در سیستم‌های با حجم ثابت، پس از مدتی فشار زیر حد ایمنی قرار می‌گیرد و سیستم باید متوقف شود.

۲- بهبود بازده توربوماشین‌های مورد استفاده در سیستم

۳- امکان استفاده از مکان‌های مختلف جغرافیایی جهت تأسیس نیروگاه همچون خطوط ساحلی، سکوه‌های شناور و

غیره

۳-۱-۲-۲- کلاسه بندی سیستم های ذخیره ساز هوای فشرده بر اساس فرآیندهای ترمودینامیکی

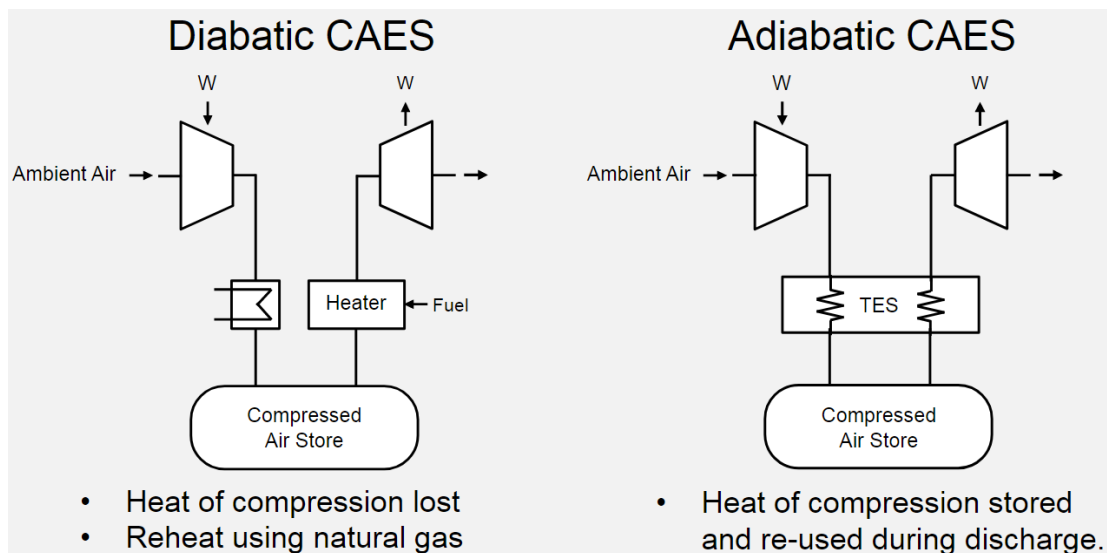
متراکم کردن هوا تولید گرما می کند. در واقع هوا بعد از متراکم شدن گرمتر می شود. در نقطه مقابل، انبساط باعث سرد شدن می شود و اگر منبع گرمایی جدیدی به مجموعه اضافه نشود، هوا بعد از انبساط بسیار سردتر خواهد بود. یک راه حل اولیه آن است که گرمای ایجاد شده حین تراکم، ذخیره شده و هنگام انبساط استفاده شود. در این صورت بازده یا راندمان ذخیره سازی به طرز قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. در ارتباط با مساله مطرح شده چند راهکار عمده وجود دارد که موجب تقسیم بندی سیستم های ذخیره ساز هوای فشرده در دسته های آدیاباتیک (بی دررو)، دیاباتیک (با دررو)، ایزوترمال (همدم) و نزدیک به ایزوترمال شده است.

در سیستم های هوا فشرده آدیاباتیک، حرارت تولید شده در تراکم، حفظ شده و به هوا هنگامی که جهت تولید برق بکار می رود باز گردانده می شود. تا پایان سال ۲۰۱۵ هیچگونه پروژه مقیاس بزرگی در حوزه هوای فشرده از نوع آدیاباتیک انجام نشد اما در سال ۲۰۱۶ شرکت RWE Power که بزرگترین تولید کننده برق در آلمان است، پروژه ADELE را اجرا نمود. در این پروژه یک سیستم هوای فشرده آدیاباتیک با ظرفیت ذخیره سازی ۳۶۰ مگاوات ساعت طراحی و ساخته شد و مورد بهره برداری قرار گرفت که نتایج آن رضایت بخش بود. بازده تئوری سیستم های ذخیره سازی آدیاباتیک با ایزولاسیون کامل ۱۰۰ درصد است، اما در عمل به بازده ۷۰ درصد می توان رسید. گرما را می توان در یک جامد مانند بتن یا سنگ یا در یک مایع مانند روغن داغ (تا ۳۰۰ درجه سانتیگراد) یا محلول های نمکی مذاب (۶۰۰ درجه سانتیگراد) ذخیره کرد [۳۹].

در سیستم های هوا فشرده دیاباتیک، بخش عمده ای از حرارت ناشی از تراکم بوسیله میان سردکننده ها (intercoolers) به جو وارد می شود که در واقع نوعی اتلاف است. به همین منظور به طور معمول از منابع انرژی های تجدیدپذیر برای فرآیند تراکم استفاده می شود. در سیستم های دیاباتیک اگر دمای هوا برای فرآیند بازیافت انرژی کم باشد، هوا قبل از انبساط در توربین به منظور تولید برق، باید دوباره گرم شود. بدین منظور از گاز طبیعی و یا یک توده فلزی گرم استفاده می شود. سیستم های هوای فشرده دیاباتیک به صورت کامل تجاری شده و در حال حاضر مورد استفاده قرار می گیرند. از جمله این موارد می توان به سیستم McIntosh در ایالت آلابامای آمریکا اشاره کرد. این سیستم نیاز به ۲,۵ مگاژول برق و ۱,۲ مگاژول گاز با ارزش حرارتی پایین برای هر مگاژول انرژی خروجی دارد و بازده آن حدود ۲۷ درصد است. در شکل (۳-۳) سیستم های ذخیره سازی هوای فشرده آدیاباتیک و دیاباتیک به صورت شماتیک با یکدیگر مقایسه شده اند [۳۹].

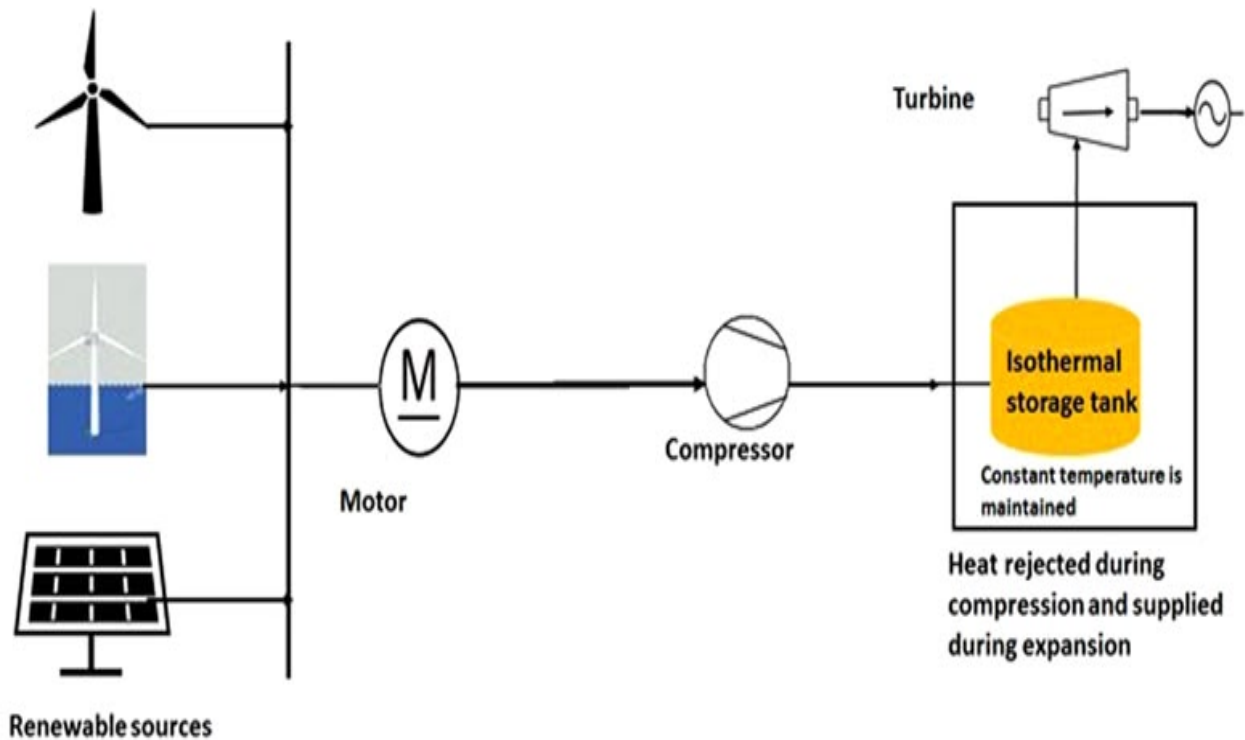
در سیستم های هوا فشرده ایزوترمال (همدم) تلاش می شود با تبادل گرمایی ثابت با محیط، دمای کارکرد حفظ شود. نمونه های محدودی از این سیستم ها در مقیاس کوچک (منظور سطوح پایین توان تولیدی است) عملیاتی شده اند. بازده تئوری ذخیره انرژی در حالت ایزوترمال ۱۰۰ درصد است به شرط آنکه انتقال حرارت به محیط کامل باشد. در عمل این

چرخه ترمودینامیکی قابل دستیابی نیست، زیرا برخی از تلفات گرما اجتناب ناپذیر است. شماتیک سیستم ذخیره‌سازی هوای فشرده ایزوترمال در شکل (۳-۴) آورده شده است [۳۹].

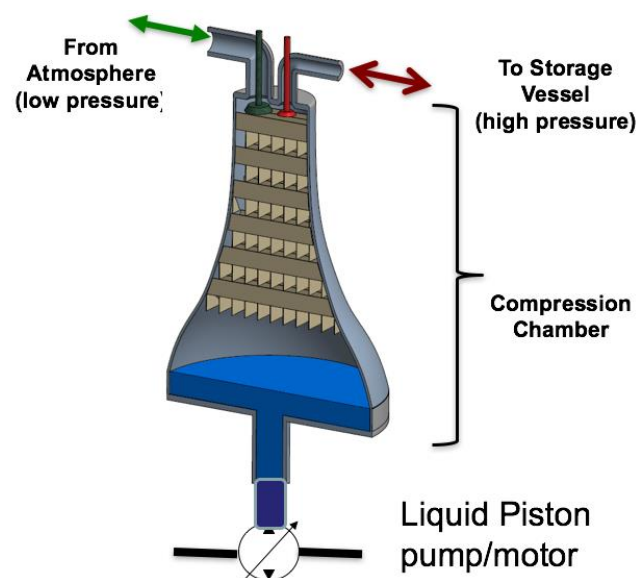


شکل ۳-۳: مقایسه سیستم‌های ذخیره‌ساز هوای فشرده آدیاباتیک با سیستم‌های دیاباتیک

در سیستم‌های هوا فشرده نزدیک ایزوترمال، هوا در مکانی بسیار نزدیک به یک جرم حرارتی تراکم ناپذیر، مانند ساختار جذب و آزادسازی گرما (HARS) یا اسپری آب، فشرده می‌شود. یک HARS معمولاً از یک سری باله‌های موازی تشکیل شده است. همانطور که هوا فشرده می‌شود، گرما فشرده‌سازی به سرعت به جرم حرارتی منتقل می‌شود، بنابراین دمای هوا پایدار می‌شود. یک مدار خنک‌کننده خارجی برای حفظ دمای جرم حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این بین بازده ایزوترمال می‌تواند به شناسایی نوع فرایند کمک کند. اگر این بازده صفر باشد، فرایند کاملاً آدیاباتیک است. با بازده ۱۰۰، فرایند کاملاً ایزوترمال است. بنابر این در یک فرایند نزدیک به ایزوترمال، بازده ۹۰ تا ۹۵ درصد محقق خواهد شد. در شکل (۳-۵) شماتیک فشرده‌سازی و انبساط هوا در کنار آب (جرم حرارتی تراکم‌ناپذیر) آورده شده است [۳۹].



شکل ۳-۴: شماتیک سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده ایزوترمال (همدا)



شکل ۳-۵: شماتیک فشرده‌سازی و انبساط هوا در کنار آب در یک سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده نزدیک ایزوترمال

۳-۱-۳- مشخصات و ویژگی‌های سیستم‌های ذخیره‌سازی هوای فشرده

برای سیستم‌های ذخیره‌ساز هوای فشرده با مخزن زیرزمینی و مخزن روزمینی مشخصات فنی متفاوتی ارائه شده است. در این بین بازه ذخیره‌سازی در سیستم‌های هوای فشرده بین چند ساعت تا چند ماه می‌تواند متغیر باشد. اثر

حافظه در این نوع ذخیره‌ساز دیده نشده است. با در نظر گرفتن سطوح خوب، معمولی و ضعیف برای شاخص‌های مقیاس‌پذیری و ایمنی و سطوح زیاد، متوسط و کم برای شاخص انعطاف‌پذیری، سیستم‌های ذخیره‌سازی هوای فشرده در شاخص اول در سطح ضعیف، در شاخص دوم در سطح خوب و در شاخص آخر در سطح کم قرار می‌گیرند [۱۹]. در ادامه به مشخصات و ویژگی‌های سیستم‌های ذخیره‌سازی هوای فشرده به تفکیک تجهیز به مخازن زیرزمینی و رو زمینی پرداخته می‌شود.

۳-۱-۳-۱- مشخصات و ویژگی‌های سیستم‌های ذخیره‌سازی هوای فشرده مجهز به مخازن زیرزمینی

برای سیستم‌های مجهز به مخزن زیرزمینی بازه توان بین ۵ تا ۳۰۰ مگاوات، بازه انرژی بین ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ مگاوات ساعت، انرژی مخصوص بین ۳۰ تا ۶۰ وات ساعت بر کیلوگرم، توان مخصوص بین ۲،۲ تا ۲۴ وات بر کیلوگرم، چگالی حجمی توان بین ۰،۴ تا ۱۰ کیلووات و چگالی حجمی انرژی بین ۰،۴ تا ۲۰ کیلووات ساعت بر متر مکعب گزارش شده است [۴۰-۴۱].

زمان شارژ بین چند دقیقه تا چند ساعت، زمان پاسخگویی بین ۱ تا ۱۵ دقیقه و زمان دشارژ با کران پایینی برابر با یک ساعت از جمله مشخصات دیگر سیستم‌های مجهز به مخزن زیرزمینی بشمار می‌روند. این ذخیره‌ساز را می‌توان به صورت کامل شارژ و دشارژ نمود (عمق دشارژ برابر ۱ یا ۱۰۰ درصد امکان‌پذیر است). دشارژ خودی سیستم‌های مجهز به مخزن زیرزمینی تقریباً صفر درصد در روز است. بازه دمایی این سیستم‌ها دمای محیط ذکر شده است [۱۱-۱۲].

بازده ذخیره‌سازی در سیستم‌های هوای فشرده مجهز به مخزن زیرزمینی بین ۴۰ تا ۷۵ درصد است. تداوم (شامل یک بار شارژ و دشارژ کامل) این نوع ذخیره‌ساز بین ۸۰۰۰ تا ۱۳۰۰۰ و طول عمر مفید این تکنولوژی ذخیره‌سازی بین ۲۵ تا ۴۰ سال می‌باشد. هزینه سرمایه‌گذاری برای این ذخیره‌ساز شامل هزینه مربوط به توان بین ۵۰۰ تا ۱۸۰۰ دلار به ازای هر کیلووات و هزینه مربوط به انرژی بین ۵۰ تا ۴۰۰ دلار به ازای هر کیلووات ساعت می‌باشد. همچنین هزینه ثابت تعمیر و نگهداری این سیستم‌ها بین ۱۹ تا ۲۵ دلار بر کیلووات در سال و هزینه متغیر مربوطه ۰،۰۰۳ دلار بر کیلووات ساعت می‌باشد. فضای مورد نیاز برای ذخیره‌سازی یک کیلووات ساعت انرژی در سیستم‌های هوای فشرده بین ۰،۱ تا ۰،۲۸ متر مربع می‌باشد [۱۸].

۳-۱-۳-۲- مشخصات و ویژگی‌های سیستم‌های ذخیره‌سازی هوای فشرده مجهز به مخازن روزمینی

برای سیستم‌های مجهز به مخزن روزمینی بازه توان بین ۳ کیلووات تا ۳ مگاوات، بازه انرژی بین ۲ کیلووات ساعت تا ۱۰ مگاوات ساعت، انرژی مخصوص ۱۴۰ وات ساعت بر کیلوگرم در فشار ۳۰۰ اتمسفر، چگالی حجمی توان بیش از ۱۰ کیلووات بر متر مکعب و چگالی حجمی انرژی بیش از ۲۰ کیلووات ساعت بر متر مکعب گزارش شده است [۴۲-۴۳].

زمان شارژ بین چند دقیقه تا ۲ ساعت، زمان پاسخگویی بین چند ثانیه تا چند دقیقه و زمان دشارژ بین ۲ تا ۴ ساعت از جمله مشخصات دیگر سیستم‌های مجهز به مخازن روزمینی بشمار می‌روند. این ذخیره‌ساز را می‌توان به صورت

کامل شارژ و دشارژ نمود (عمق دشارژ برابر ۱ یا ۱۰۰ درصد امکان پذیر است). دشارژ خودی سیستم های مجهز به مخزن روزمینی تقریباً صفر درصد در روز است. بازه دمایی این سیستم ها دمای محیط ذکر شده است [۱۱-۱۲].

بازده ذخیره سازی در سیستم های هوای فشرده مجهز به مخزن روزمینی بین ۷۰ تا ۹۰ درصد است. تداوم (شامل یک بار شارژ و دشارژ کامل) این نوع ذخیره ساز حداکثر ۳۰ هزار سال و طول عمر مفید آن حداکثر ۲۵ سال است. هزینه سرمایه گذاری برای این ذخیره ساز شامل هزینه مربوط به توان بین ۱۰۰۰ تا ۱۵۵۰ دلار به ازای هر کیلووات و هزینه مربوط به انرژی بین ۲۰۰ تا ۲۵۰ دلار به ازای هر کیلووات ساعت می باشد. هزینه تعمیر و نگهداری سیستم های هوا فشرده روزمینی ناچیز و قابل چشم پوشی است [۱۸]. در جدول (۳-۱) مشخصات سیستم های ذخیره ساز هوای فشرده روزمینی و زیرمینی با یکدیگر مقایسه شده اند.

جدول ۳-۱: مشخصات و ویژگی های سیستم های ذخیره سازی هوای فشرده با مخازن زیرمینی و روزمینی

انواع مخزن		مشخصات و ویژگی‌ها	
روزمینی	زیرزمینی		
۰,۰۰۳-۳	۵-۳۰۰	بازه توان (مگاوات)	
۰,۰۰۲-۱۰	۲۰۰-۱۰۰۰	بازه انرژی (مگاوات ساعت)	
--	۲,۲-۲۴	توان مخصوص (وات بر کیلوگرم)	
۱۴۰ در فشار ۳۰۰ اتمسفر	۳۰-۶۰	انرژی مخصوص (وات‌ساعت بر کیلوگرم)	
>۱۰	۰,۰۴-۱۰	چگالی حجمی توان (کیلووات بر مترمکعب)	
>۲۰	۰,۴-۲۰	چگالی حجمی انرژی (کیلووات ساعت بر متر مکعب)	
چند دقیقه تا ۲ ساعت	چند دقیقه تا چند ساعت	زمان شارژ	
۲-۴	>۱	زمان دشارژ (ساعت)	
چند ثانیه تا دقیقه	۱-۱۵ دقیقه	زمان پاسخ‌دهی	
۱۰۰	۱۰۰	عمق دشارژ (درصد)	
۳۰۰۰۰	۸۰۰۰-۱۳۰۰۰	تداوم (سال)	
۷۰-۹۰	۴۰-۷۵	بازده (درصد)	
۲۵	۲۵-۴۰	طول عمر	
۱۰۰۰-۱۵۵۰	۵۰۰-۱۸۰۰	هزینه توان (دلار بر کیلووات)	هزینه سرمایه‌گذاری
۲۰۰-۲۵۰	۵۰-۴۰۰	هزینه انرژی (دلار بر کیلووات ساعت)	
.	۱۹-۲۵	هزینه ثابت (دلار بر کیلووات)	هزینه تعمیر و نگهداری
	۰,۰۰۳	هزینه متغیر (دلار بر کیلووات ساعت)	
.	.	دشارژ خودی (درصد در روز)	

امکان استفاده در مقادیر ظرفیتی بالا (موجود بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ مگاوات)، عدم ایجاد ضایعات خطرناک و سمی و امکان بهره گیری مجدد از گرمای تولید شده حین فرآیند فشرده سازی هوا از جمله مزایای سیستم های مذکور هستند. در نقطه مقابل، هزینه بالای ذخیره سازی در مقایسه با برخی از ذخیره سازها همچون چرخ طیار، بازده کم، نیازمندی های

خاص مرتبط با زمین شناسی به منظور بهره‌گیری از مخازن طبیعی، اثرات مخرب زیرزمینی ناشی از مخازن مذکور و ریسک بالا در استفاده از سیستم‌های فشار بالا معایب سیستم‌های ذخیره‌ساز هوای فشرده بشمار می‌روند. سیستم‌های ذخیره‌ساز هوای فشرده هم‌اکنون تجاری شده لکن به بلوغ کامل نرسیده‌اند [۴۴].

۳-۱-۴- کاربرد سیستم‌های ذخیره‌ساز هوای فشرده

سیستم‌های ذخیره‌ساز هوای فشرده به منظور پیک‌سایی و مدیریت بار در شبکه برق مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سیستم‌ها قابلیت آن را دارند که عدم قطعیت تولید برق از منابع تجدیدپذیر (خورشید و باد) را در مقیاس وسیع پوشش دهند. در حالت کلی سیستم‌های ذخیره‌ساز هوای فشرده می‌توانند سیستم پشتیبان مناسبی برای هر شبکه متکی بر منابع مختلف تولید برق باشند [۳۴].

سیستم‌های ذخیره‌ساز هوای فشرده در مقیاس کوچک در حمل و نقل و به طور خاص در خودروهای معمولی، کشتی‌ها و وسایل نقلیه هیبریدی کاربرد دارند. استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی هوای فشرده شده در فناوری‌های بسیار مدرن همچون ماشین‌های پرنده در حال بررسی است. در این سیستم‌ها از مخازن ذخیره هوا ساخته شده از فیبر کربن با مقاومت بالا استفاده می‌شود. به منظور حفظ انرژی ذخیره شده در هوای فشرده، این مخازن باید از نظر حرارتی از محیط ایزوله شوند [۳۴].

۳-۱-۵- تاریخچه پیدایش و تکامل سیستم‌های ذخیره‌ساز هوای فشرده

تاریخچه استفاده از سیستم‌های هوای فشرده در سطح شهرها به سال ۱۸۷۰ میلادی برمی‌گردد. این سیستم ذخیره‌سازی در شهرهایی مانند پاریس در فرانسه، بیرمنگام در انگلستان، درسدن، ریکسدورف و آفنباخ در آلمان و بوئنوس آیرس در آرژانتین نصب شده است. ویکتور پوپ اولین نمونه از سیستم‌های هوای فشرده را به منظور تامین انرژی مورد نیاز ساعت ساخت. در این ساعت‌ها، هر دقیقه یک پالس هوا برای تغییر وضعیت اشاره‌گر دقیقه مورد استفاده قرار می‌گرفت. در ادامه سیستم‌های هوا فشرده به منظور انتقال انرژی به خانه‌ها و صنعت توسعه یافتند. از سال ۱۸۹۶، شهر پاریس به سیستم هوای فشرده با توان ۲٫۲ مگاوات مجهز شد. این سیستم متشکل از یک لوله هوا به طول ۵۰ کیلومتر و فشاری برابر با ۵۵۰ کیلو پاسکال به منظور استفاده در صنایع سبک و سنگین بود. این سیستم منبع اصلی انرژی جهت استفاده در ساختمان‌ها در آن زمان بود و انرژی مورد نیاز برای دستگاه‌های دندانپزشکی، تجهیزات چاپ و اصناف از جمله مراکز پخت نان را فراهم می‌کرد [۴۵].

تا سال ۱۹۷۸ پروژه‌های کوچک و البته نه چندان صنعتی از سیستم‌های ذخیره‌سازی هوای فشرده در نقاط مختلف دنیا پیاده سازی و اجرا شد. در سال ۱۹۷۸ اولین سیستم ذخیره‌سازی هوای فشرده شده در مقیاس صنعتی با ظرفیت ۲۹۰ مگاوات در Huntorf آلمان ساخته شد. این سیستم از یک گنبد نمکی بهره می‌برد [۴۵].

در سال ۱۹۹۱ یک سیستم ذخیره‌سازی هوای فشرده با ظرفیت ۱۱۰ مگاوات و زمان کارکرد ۲۶ ساعت در آلابامای آمریکا ساخته شد. هزینه ساخت این سیستم ۶۵ میلیون دلار بود. هزینه تولید در این سیستم ۵۹۰ دلار به ازای هر کیلووات و هزینه ذخیره‌سازی ۲۳ دلار به ازای هر کیلووات ساعت بود. در این سیستم از یک غار نمکی با ظرفیت ۱۹ میلیون فوت مکعب برای ذخیره هوا تا فشار ۱۱۰۰ Psi استفاده شده است. فاز فشرده‌سازی در این سیستم راندمانی برابر با ۸۲ درصد دارد لکن نیاز به احتراق گاز طبیعی است [۴۵].

در دسامبر ۲۰۱۲، یک سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده از نوع نزدیک به ایزوترمال با ظرفیت ۲ مگاوات در شهر هانتینگتون آمریکا توسط شرکت General Compression ساخته شد. شایان ذکر است این سیستم از هیچگونه سوختی استفاده نمی‌کند [۴۵].

از سال ۲۰۱۲ تاکنون سرمایه‌گذاری بر روی سیستم‌های ذخیره‌ساز هوای فشرده در مقیاس صنعتی رو به افزایش نهاده و نهادهای مختلفی از جمله DOE آمریکا سرمایه‌گذاری‌های قابل توجهی در این حوزه نموده‌اند. در این بین، موفق‌ترین پروژه، پروژه ADELE در آلمان بوده که قبلاً به مشخصات فنی آن اشاره شد [۴۶].

۳-۲- سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای

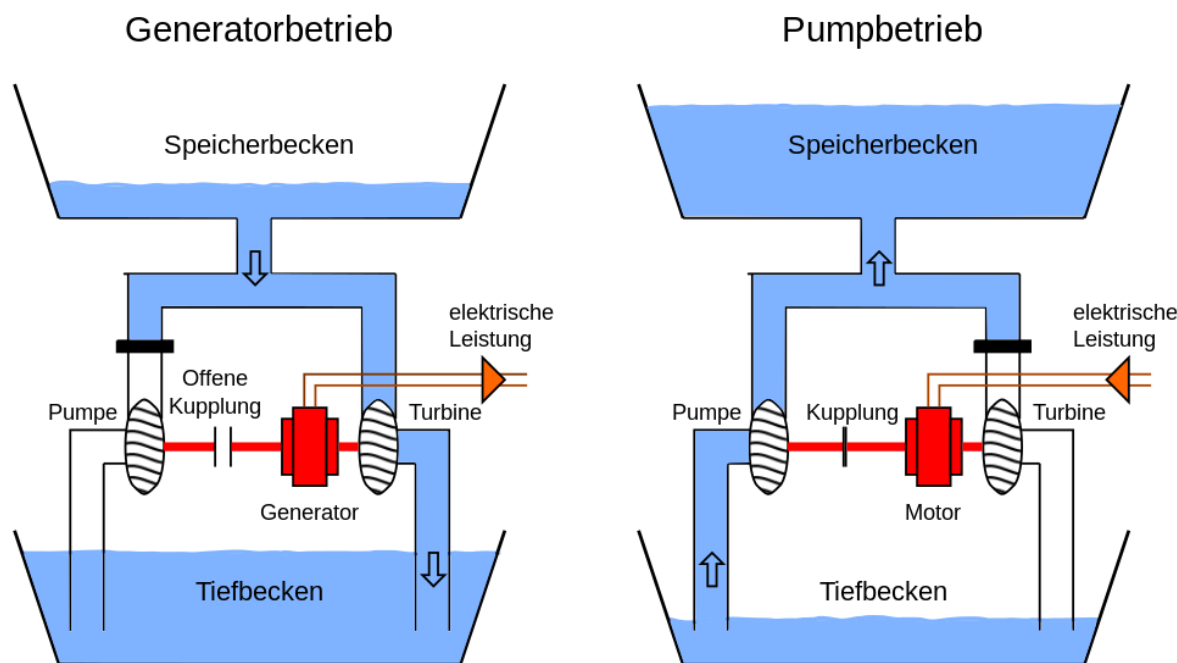
۳-۲-۱- اجزاء و نحوه عملکرد سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای

سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای در واقع همان نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای هستند. نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای نوعی نیروگاه است که برای استفاده از برق مازاد بر مصرف و بازتولید این برق در زمان‌هایی که تقاضای مصرف زیاد است به کار می‌رود. اگر چه ذخیره کردن الکتریسیته به طور مستقیم عملی نیست، نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای توانایی افزایش ظرفیت هیدرولیکی را از طریق تلمبه آب از یک مخزن پایین‌تر به یک مخزن بالاتر در مواقعی که تقاضای مصرف برق کم است (مثلاً هنگام شب) می‌دهد. این آب در زمان‌هایی که تقاضا زیاد می‌شود و نیاز به برق ذخیره است به مخزن پایین برمی‌گردد تا توربین‌ها را بچرخاند و در نهایت ژنراتور را به گردش درآورد. برای این که چنین نیروگاهی مقرون به صرفه باشد باید اختلاف ارتفاع دو مخزن پایین‌دست و بالادست، حداقل ۳۰۰ متر باشد. توربین آبی، پمپ، مخزن بالادست و مخزن پایین‌دست اجزای اصلی نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای هستند. نحوه عملکرد و اجزاء نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای در شکل (۳-۶) نشان داده شده است [۴۷].

در حالت کلی ذخیره برق کار بسیار پرهزینه‌ای است و همچنین روش‌های متداولی برای این کار حداقل در مقیاس بزرگ وجود ندارد. علاوه بر این موضوع، میزان مصرف برق در ساعات مختلف شبانه‌روز متفاوت است و نیروگاه‌ها که تنها توان تولید ظرفیت مشخصی را دارند مجبور می‌شوند تا به اندازه پیک مصرف، برق تولید کنند. اما با استفاده از



نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای به نحوی می‌توان برق را ذخیره کرد. سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای در مرحله بلوغ از چرخه فناوری قرار دارند.



شکل ۳-۶: نحوه عملکرد نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای

۳-۲-۲-۲- کلاسه‌بندی انواع نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای

نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای به دو روش طبقه‌بندی می‌شوند. طبقه‌بندی اول بر اساس دوره یا چرخه کار است. در این روش نیروگاه‌ها در سه دسته یا گروه با عملکرد روزانه، هفتگی یا سالانه تقسیم‌بندی می‌شوند. ذخیره‌سازی و تولید انرژی در این نیروگاه‌ها بر اساس منحنی تقاضای مربوطه انجام می‌شود.

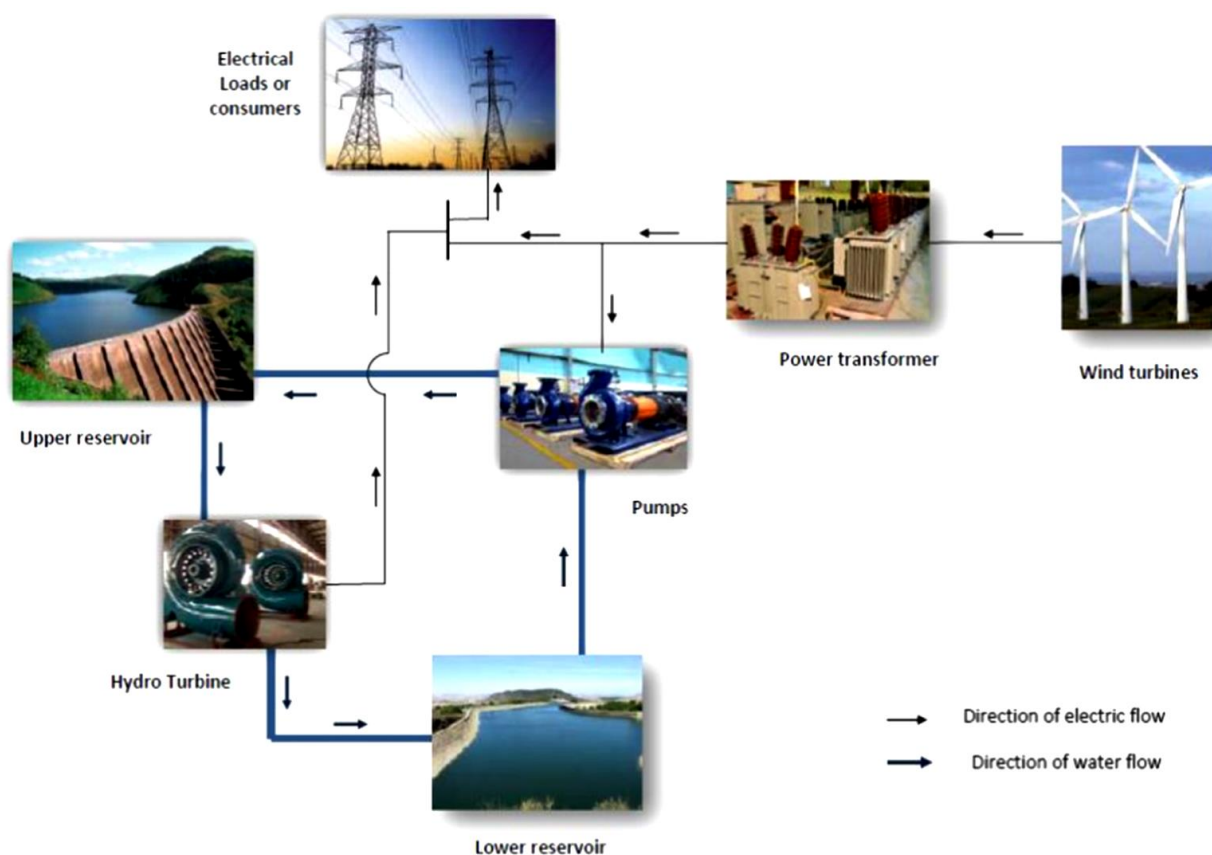
در طبقه‌بندی نوع دوم، نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای به دو نوع خالص و مرکب تقسیم‌بندی می‌شوند. در نوع خالص حجم آب تقریباً ثابت است و به طور مکرر بین دو مخزن بالا دست و پایین دست جریان می‌یابد. در نوع مرکب جریان‌های آب طبیعی به مجموعه اضافه شده و این مساله موجب می‌شود حجم کلی آب که از توربین‌ها عبور می‌کند بیشتر از میزان آبی باشد که از پمپ‌ها عبور می‌کند. تولید انرژی اضافی در این نوع نیروگاه‌ها بر فواید اقتصادی آن می‌افزاید [۴۷].

۳-۲-۲-۳- ترکیب نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای با سایر منابع تولید برق

با در نظر گرفتن منابع تجدیدپذیر جهت تولید برق مورد نیاز پمپ‌ها (خورشید، باد یا ترکیب هر دو) اجزای دیگری به مجموعه تلمبه ذخیره‌ای اضافه شده و نیروگاه‌های جدیدی شکل می‌گیرند. شکل (۳-۷) اجزای یک نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای بادی را نشان می‌دهد.

علاوه بر ترکیب منابع تجدیدپذیر با نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای، تکنولوژی‌های جدیدی نیز در رابطه با این نیروگاه‌ها معرفی شده‌اند که از آن جمله می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد [۴۷]:

- ۱- نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای دور متغیر
- ۲- نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای مبتنی بر آب دریا
- ۳- نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای در زیر زمین
- ۴- نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای با هوای فشرده
- ۵- نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای در زیر دریا



شکل ۳-۷: مدل مفهومی نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای بادی

۳-۲-۴- مشخصات و ویژگی‌های نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای

برای سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای بازه توان بین ۱۰۰ تا ۵۰۰۰ مگاوات، بازه انرژی بین ۵۰۰ تا ۸۰۰۰ مگاوات ساعت، انرژی مخصوص بین ۰,۵ تا ۱,۵ وات ساعت بر کیلوگرم و توان مخصوص بین ۰,۰۱ تا ۰,۱۲ وات بر کیلوگرم گزارش شده است [۱۲]. به دلیل معادل بودن یک لیتر آب با یک کیلوگرم از آن، چگالی حجمی توان و چگالی حجمی انرژی برای ذخیره‌ساز مذکور به ترتیب با توان مخصوص و انرژی مخصوص آن برابر است.

زمان شارژ بین چند دقیقه تا چند ساعت، زمان پاسخگویی کمتر از ۳ دقیقه، زمان دشارژ با کران پایین ۱ ساعت و کران بالای ۲۴ ساعت و بازه ذخیره‌سازی بین چند ساعت تا چند ماه از جمله دیگر مشخصات سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای بشمار می‌رود. عمق دشارژ در این ذخیره‌ساز برابر ۰,۹۵ یا ۹۵ درصد است. دشارژ خودی سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای تقریباً صفر درصد در روز است و بازه دمایی این سیستم‌ها دمای محیط ذکر شده است [۱۱].

بازده ذخیره‌سازی در سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای بین ۷۰ تا ۸۰ درصد است. در این بین گزارشاتی مبنی بر راندمان ۸۷ درصد نیز وجود دارد. تداوم (شامل یک بار شارژ و دشارژ کامل) این نوع ذخیره‌ساز نیز بین ۱۰۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ و طول عمر مفید آن بین ۴۰ تا ۶۰ سال می‌باشد [۱۱]. هزینه سرمایه‌گذاری برای این ذخیره‌ساز شامل هزینه مربوط به توان بین ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ دلار به ازای هر کیلووات و هزینه مربوط به انرژی بین ۵ تا ۱۰۰ دلار به ازای هر کیلووات ساعت می‌باشد. همچنین هزینه ثابت تعمیر و نگهداری این سیستم‌ها ۳ دلار بر کیلووات در سال و هزینه متغیر مربوطه ۰,۰۰۴ دلار بر کیلووات ساعت می‌باشد. فضای مورد نیاز برای ذخیره‌سازی یک کیلووات ساعت انرژی در سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای ۰,۰۲ متر مربع گزارش شده است [۱۸].

با در نظر گرفتن سطوح خوب، معمولی و ضعیف برای شاخص‌های مقیاس‌پذیری و ایمنی و سطوح زیاد، متوسط و کم برای شاخص انعطاف‌پذیری، سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای در شاخص اول در سطح خوب، در شاخص دوم در سطح خوب و در شاخص آخر در سطح کم قرار می‌گیرند [۱۹].

علاوه بر راندمان بالا، استفاده از نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای با مزایای ویژه‌ای همراه است. از جمله این مزایا می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد [۴۸-۴۹]:

- ۱- عدم وابستگی و تابعیت از رژیم آبی
- ۲- عمر طولانی در مقایسه با نیروگاه‌های حرارتی
- ۳- آسیب زیست محیطی کم
- ۴- کاهش روشن و خاموش شدن نیروگاه‌های حرارتی
- ۵- هزینه بهره‌برداری و نگهداری پایین
- ۶- ذخیره گردان مطمئن
- ۷- پاسخگوی مطمئن به خاموشی

در نقطه مقابل شاید تنها عیب برای این نیروگاه‌ها لزوم دستیابی به یک موقعیت جغرافیایی خاص (ایجاد ارتفاع و دسترسی به منابع آبی) جهت احداث آنهاست [۵۰].

۳-۲-۵- تاریخچه پیدایش و تکامل سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای

اولین نیروگاه برق آبی با قابلیت تلمبه ذخیره‌ای در سال ۱۸۸۲ در زوریخ سوییس شروع به فعالیت نمود. پس از آن در سال ۱۹۰۹ نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای دیگری در اسکاف هوسن کشور مذکور راه‌اندازی شد که هنوز هم از آن

بهره‌برداری می‌شود. در سال ۱۹۲۰ در انگلستان اولین نیروگاه تلمبه ذخیره ای در والکربورن نصب و راه‌اندازی شد. بنا به گفته فریمن تا سال ۱۹۲۵ حدود ۳۵ نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای کوچک در کشورهای مختلف اروپا مورد بهره‌برداری قرار گرفت. در همان زمان فرضیه ساخت توربین - تلمبه معکوس ارائه و در سال ۱۹۳۱ اولین توربین تلمبه معکوس در شهر بالدنیسی آلمان نصب گردید [۵۱].

با شروع جنگ جهانی دوم، تقاضا برای انرژی افزایش قابل ملاحظه‌ای یافت و در طی آن شبکه‌های انتقال انرژی توسعه یافتند. توسعه شبکه‌های مذکور نیاز به نیروگاه‌هایی جهت تامین بار پیک را بیشتر کرد. در همین راستا نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای بعنوان یکی از اجزاء لازم در سیستم تولید برق شناخته شدند. در سال ۱۹۵۵ اولین واحد تلمبه ذخیره‌ای مجهز به توربین فرانسوی توسط سازمان تنسی والی در ایالت متحده نصب گردید. در سال ۱۹۶۲ اجرای پروژه‌های تلمبه ذخیره‌ای ۳۶۰ مگاواتی فستینیوگ در انگلستان و پروویندنزا در ایتالیا با ارتفاع ۲۸۴ متر نقطه عطفی در پیشرفت نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای شد. پس از آن در سال ۱۹۶۳، ایالت متحده دو واحد ۲۳۰ مگاواتی با هد ۲۵۰ متر بر روی سد تام ساک راه‌اندازی کرد [۵۱].

تا اواسط دهه هفتاد نیروگاه آهیرا واقع در ژاپن با هد ۵۱۳ متر و نیروگاه لادینگتون در ایالت متحده با ظرفیت ۱۸۷۲ مگاوات به ترتیب دارای بالاترین هد و بیشترین ظرفیت تولید بودند. روند توسعه نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای ادامه یافت تا اینکه در پایان سال ۱۹۹۰ بیش از ۳۰۰ نیروگاه از نوع مذکور در دست ساخت یا بهره‌برداری بوده است و این نشانه نقش موثر نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در خدمات تولید برق می‌باشد. بزرگترین طرح‌های تلمبه ذخیره‌ای مربوط به کشورهای صنعتی می‌باشد. کشورهای ژاپن، آمریکا و روسیه پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای در این زمینه داشته‌اند. در حال حاضر طرح پلاس رادولو ایتالیا با هد ۱۲۶۰ متر و نیروگاه لویستون در ایالت متحده با ظرفیت تولید ۲۸۸۰ مگاوات به ترتیب دارای بیشترین هد و ظرفیت تولید می‌باشند [۵۱].

ژاپن در زمینه نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای بیش از ۴۰ طرح با ظرفیت تولید ۱۶ گیگاوات دارد که در آینده نزدیک با طرح‌های در دست اجرا این ظرفیت تولید به ۵۰ گیگاوات خواهد رسید. پتانسیل‌یابی انجام شده در ژاپن بیانگر ۴۴۰ نقطه مناسب جهت اجرای طرح‌های تلمبه ذخیره‌ای با توانائی ذخیره ۳۲۴ گیگاوات می‌باشد. آمریکا نیز از جمله کشورهایی است که سرمایه‌گذاری زیادی در زمینه نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای کرده است. این کشور در پایان سال ۱۹۷۱ دارای ۱۵ طرح تلمبه ذخیره‌ای با ظرفیت تولید ۳/۷۶۵ گیگاوات بوده است. هم‌اکنون ظرفیت تولید در آمریکا بیش از ۱۷ گیگاوات و در روسیه بیش از ۱۱ گیگاوات می‌باشد [۵۱]. در ایران نیز از قبل از انقلاب اسلامی، مطالعات شناسائی و مرحله اول چند نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در شمال کشور انجام گردید که نیروگاه سیاه‌بیشه و هریجان مهمترین آنها می‌باشند. نیروگاه سیاه‌بیشه هم‌اکنون با ظرفیت ۱۰۴۰ مگاوات بهره‌برداری می‌شود [۵۲].



۳-۳- چرخ طیار یا فلاپویل

۳-۳-۱- نحوه عملکرد چرخ طیار

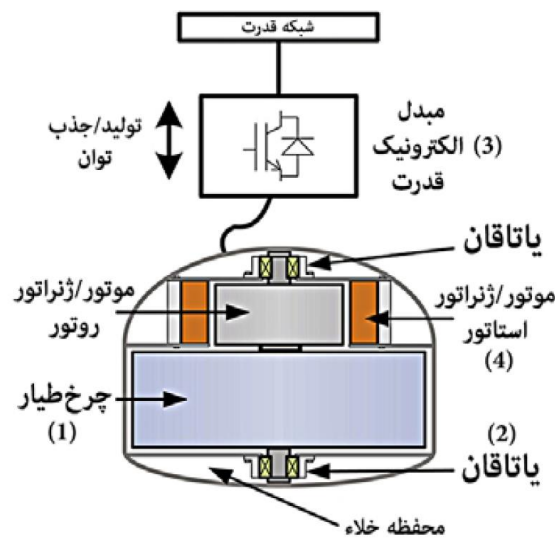
چرخ طیار یا چرخ لنگر یا فلاپویل یک وسیله مکانیکی گردان سنگین است که برای ذخیره‌سازی انرژی دورانی به کار می‌رود. چرخ لنگرها دارای گشتاور لختی بالایی هستند و بنابر این در برابر تغییر سرعت دورانی مقاومت می‌کنند. میزان انرژی ذخیره شده در یک چرخ لنگر با توان دوم سرعت دورانی آن متناسب است. برای انتقال انرژی به چرخ لنگر به آن گشتاور اعمال می‌کنند که موجب بالا رفتن سرعت دورانی و در نتیجه بالا رفتن انرژی ذخیره شده در آن می‌شود. در حالت معکوس، چرخ لنگر می‌تواند انرژی گردشی را به بار مکانیکی منتقل کند که موجب پایین آمدن سرعت دورانی آن خواهد شد. تکنولوژی چرخ طیار در فاز تجاری سازی قرار دارد.

انرژی یک چرخ طیار با سرعت بالا (حداکثر تا ۶۰ هزار دور در دقیقه) دارای قدرت تخریب زیادی است. انرژی یک چرخ طیار یک کیلووات ساعتی، قادر است خودرویی با اندازه متوسط را بیشتر از ۳۰/۴۸ متر (۱۰۰ فوت) به طور عمودی در هوا بلند کند. در نتیجه، قسمت چرخنده آن باید در محفظه‌ای، محبوس شود [۵۳].

میزان ذخیره‌سازی انرژی در چرخ طیار با اینرسی (که خود با جرم و شکل ظاهری رابطه دارد) و توان دوم سرعت رابطه مستقیم دارد. لذا برای افزایش میزان انرژی ذخیره شده به نظر می‌رسد بهینه‌ترین راه افزایش سرعت است. اما افزایش سرعت علاوه بر پیچیده سازی فرآیند طراحی سیستم، هزینه مواد اولیه را نیز به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. بنابراین توجه به کاربرد سیستم، در طراحی چرخ طیار بسیار مهم می‌باشد.

۳-۳-۲- اجزاء چرخ طیار

سیستم چرخ طیار متعارف به طور معمول از چهار بخش کلی تشکیل می‌شود. در طراحی سیستم چرخ طیار با توجه به کاربرد، هرکدام از این چهار بخش مورد بهینه‌سازی قرار می‌گیرند. بخش اول بخش گردنده سیستم (چرخ طیار) می‌باشد. انتخاب شکل و جنس ماده به کار رفته در این بخش در عملکرد کلی سیستم بسیار تاثیر گذار است. بخش دوم یاتاقان‌های چرخ طیار است. بخش سوم مبدل الکترونیک قدرت است که وظیفه انتقال و دریافت انرژی الکتریکی (با توجه به دو سیکل کاری سیستم یعنی ژنراتوری و موتوری) را برعهده دارد. این بخش متناسب با ماشین الکتریکی انتخابی انواع گوناگونی دارد. بخش چهارم ماشین الکتریکی است که نقش مبدل انرژی (مکانیکی به الکتریکی و بالعکس) را ایفا می‌نماید. سه نوع ماشین آهنربای دائم، القایی و سوئیچ رلوکتانس مناسب سیستم چرخ طیار می‌باشند. در این بین ماشین سوئیچ رلوکتانس به دلیل ساختار ساده روتور قیمت مناسبی دارد و از نظر ملاحظات مکانیکی و کششی مناسب است. همچنین گشتاور بالایی دارد و خطر مغناطیس‌زدایی در آن وجود ندارد. شماتیک یک چرخ طیار در شکل (۳-۸) آورده شده است [۵۴].



شکل ۳-۸: شماتیک چرخ طیار به همراه اجزای آن

۳-۳-۳- انواع چرخ طیار یا فلاپویل

به طور کلی، چرخ طیارها به دو دسته سرعت پایین و سرعت بالا تقسیم می شوند. دسته اول سرعتی با چندین هزار دور بر دقیقه دارند. در این دسته از چرخ طیارها ماده مورد استفاده بیشتر از فلز تشکیل شده است و یاتاقان های مکانیکی کاربرد به صرفه تری دارند. سرعت عملکرد دسته دوم چند ده هزار دور بر دقیقه است. در این دسته از چرخ طیارها ماده مورد استفاده در جرم گردنده ماده کامپوزیتی مانند فیبر کربن است و به طور معمول از یاتاقان های مغناطیسی به منظور کاهش اصطکاک و تلفات مکانیکی استفاده می گردد [۵۵].

۳-۳-۴- مشخصات و ویژگی های چرخ طیار

برای چرخ طیار یا فلاپویل بازه توان بین ۰٫۰۱ تا ۰٫۲۵ مگاوات، بازه انرژی بین ۳ تا ۱۳۳ کیلووات ساعت، انرژی مخصوص ۵ تا ۸۰ وات ساعت بر کیلوگرم و توان مخصوص ۷۰۰ تا ۱۲۰۰ وات بر کیلوگرم گزارش شده است [۱۱]. چگالی حجمی توان و چگالی حجمی انرژی برای ذخیره ساز مذکور به ترتیب حداکثر تا ۲۰۰۰ کیلووات بر متر مکعب و بین ۲۰ تا ۸۰ کیلووات ساعت بر متر مکعب می باشد [۱۲].

زمان شارژ در حد چند دقیقه (کمتر از ۱۵ دقیقه)، زمان پاسخگویی کمتر از یک ثانیه، زمان دشارژ بین ۱۵ ثانیه تا ۱۵ دقیقه و بازه ذخیره سازی بین چند ثانیه تا چند دقیقه از جمله دیگر مشخصات چرخ طیار بشمار می روند. عمق دشارژ در این ذخیره ساز برابر ۱ یا ۱۰۰ درصد است. دشارژ خودی تا ۱۰۰ درصد در یک روز (گاهها بیش از ۲۰ درصد در یک ساعت) برای این ذخیره ساز گزارش شده است. بازه دمایی مربوط به کارکرد این سیستم بین ۲۰- تا ۴۰ درجه سانتیگراد می باشد [۱۱].



بازده ذخیره‌سازی در چرخ طیار بین ۹۰ تا ۹۵ درصد است. تداوم (شامل یک بار شارژ و دشارژ کامل) این نوع ذخیره‌ساز بین ۲۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ و طول عمر مفید آن بین ۱۵ تا ۲۰ سال می‌باشد. هزینه سرمایه‌گذاری برای این ذخیره‌ساز شامل هزینه مربوط به توان بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ دلار به ازای هر کیلووات و هزینه مربوط به انرژی بین ۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ دلار به ازای هر کیلووات ساعت می‌باشد. همچنین هزینه ثابت تعمیر و نگهداری این سیستم ۲۰ دلار بر کیلووات در سال و هزینه متغیر مربوطه ۰,۰۰۴ دلار بر کیلووات ساعت می‌باشد [۱۱].

فضای مورد نیاز برای ذخیره‌سازی یک کیلووات ساعت انرژی در چرخ طیار بین ۰,۲۸ تا ۰,۶۱ متر مربع می‌باشد. اثر حافظه در این نوع ذخیره‌ساز دیده نشده است. با در نظر گرفتن پارامترهای زیاد، متوسط، کم، خیلی کم و فاقد تاثیر برای تاثیرات مخرب زیست محیطی، اثر زیست محیطی این ذخیره‌ساز "کم" گزارش شده است. با در نظر گرفتن امتیازهای ۱ تا ۵ برای خاصیت بازیافت بگونه‌ای که ۱ بدترین و ۵ بهترین حالت باشد، امتیاز بازیافت چرخ طیار "۴" خواهد بود. چرخ طیار قابلیت کاربرد متحرک نیز دارد [۱۸].

با در نظر گرفتن سطوح خوب، معمولی و ضعیف برای شاخص‌های مقیاس‌پذیری و ایمنی و سطوح زیاد، متوسط و کم برای شاخص انعطاف‌پذیری، چرخ طیار در شاخص اول در سطح خوب، در شاخص دوم در سطح معمولی و در شاخص آخر در سطح زیاد قرار می‌گیرد [۱۹].

همانگونه که از مشخصات فوق الذکر پیداست، سیستم ذخیره‌ساز چرخ طیار از مزایایی همچون بازده بالا، تداوم زیاد و چگالی توان بالا برخوردار است. ولی متأسفانه تلفات خودی در چرخ طیار بالاست. به همین دلیل سیستم چرخ طیار برای ذخیره‌سازی طولانی مدت انرژی مناسب نمی‌باشد و بیشتر به عنوان ذخیره‌ساز کوتاه مدت مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد.

۳-۳-۵- کاربردهای چرخ طیار

سه کاربرد مهم چرخ طیار عبارتند از:

۱- فراهم آوردن انرژی پیوسته هنگامی که منبع انرژی ناپیوسته است. برای نمونه چرخ طیارهایی که در موتورهای رفت و برگشتی استفاده می‌شوند چنین کاربردی دارند، زیرا گشتاور حاصل از موتور ناپیوسته است.

۲- انتقال انرژی با سرعتی که از عهده یک منبع انرژی پیوسته بر نمی‌آید. برای اینکار انرژی را در طول زمان در چرخ طیار ذخیره می‌کنند و سپس به صورت ناگهانی آن را آزاد می‌کنند. این کاربرد به ذخیره‌سازی انرژی در چرخ طیار مربوط می‌شود.

۳- برای کنترل جهت یک سامانه مکانیکی. در چنین کاربردهایی تکانه زاویه‌ای چرخ لنگر را هنگام انتقال انرژی به / از چرخ لنگر عمداً به بار منتقل می‌کنند [۵۶].



به منظور کاهش اغتشاشات و تغییرات ناگهانی توان و همچنین کاهش سیکل روشن و خاموش شدن دیزل ژنراتور در سیستم‌های هیبرید یکی از بهترین روش‌ها استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی کوتاه مدت است. در میان سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی، سیستم ذخیره‌ساز چرخ طیار با توجه به توضیحات فوق‌الذکر مناسب است.

۳-۳-۶- تاریخچه پیدایش و تکامل چرخ طیار

چرخ طیار به عنوان وسیله ذخیره‌سازی انرژی از هزاران سال پیش مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده از چرخ طیار به اشیاء دوار مانند چرخ‌های آب، چرخ سفالگری، آسیاب‌های دستی و دیگر اجزای دوار مشابه برمی‌گردد. در چرخ سفالگری، با ضربه پای سفالگر چرخ شروع به چرخش می‌کند. به دلیل اصطکاک موجود در دستگاه و تماس دست با گل سفال، هرچند لحظه سفالگر با ضربه به چرخ باعث ثابت ماندن چرخش آن می‌شود. دلیل وجود چرخ ایجاد حرکت دایره‌ای است. هر چه وزن چرخ بیشتر باشد، یکدست بودن سرعت چرخش و تقارن سفال تولید شده بیشتر می‌شود.

در قرن هجدهم برای اولین بار چرخ طیار در موتورهای بخار مورد استفاده قرار گرفت. در آن زمان، پیشرفت در قالب‌گیری فلزات موجب شد، تا قطعاتی با دقت و اینرسی بیشتر تولید شوند که سهم بسزایی در توسعه چرخ طیار داشتند. در واقع کلمه "Flywheel" ابتدا با انقلاب صنعتی در سال ۱۷۸۴ ظاهر شد. در قرن هجدهم، چرخ طیار علاوه بر موتورهای بخار در قایق‌ها، قطارها و همچنین به عنوان باتری انرژی در کارخانه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. در اواسط قرن نوزدهم، پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای در ریخته‌گری فولاد و فلزات حادث شد. با پیشرفت‌های بوجود آمده، ساخت چرخ‌های طیار بسیار بزرگ امکان‌پذیر شد. با گذشت زمان، طرح‌های مختلفی اجرا شد، اما پیشرفت‌های عمده در اوایل قرن بیستم رخ داد. در این زمان تنش‌های چرخشی با استفاده از تکنیک‌های جدید به طور کامل تجزیه و تحلیل شدند و استفاده از چرخ طیار به عنوان سیستم ذخیره‌سازی انرژی مورد توجه ویژه قرار گرفت [۵۷].

در دهه ۱۹۵۰، سیستم چرخ طیار در اتوبوس‌های برقی در کشور سوئیس مورد استفاده قرار گرفت. وزن چرخ طیار مورد استفاده ۱۵۰۰ کیلوگرم بود. در دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی چرخ طیار در وسایل نقلیه برقی مورد استفاده قرار گرفتند. در سال‌های بعد، روتور کامپوزیت فیبر ساخته و آزمایش شد. ساخت این روتورها گام اول در زمینه ساخت چرخ‌های طیار با سرعت بالا بود. در دهه ۱۹۸۰، یاتاقان‌های مغناطیسی نسبتاً کم سرعت ظاهر شدند. از سال ۱۹۸۰ تاکنون تمامی تلاش‌ها بر روی ساخت چرخ‌های طیار با سرعت بالا (روتور از جنس ماده کامپوزیتی و یاتاقان‌های از نوع مغناطیسی) متمرکز شده است [۵۸].

طی سالیان قبل، استفاده از چرخ طیارها قابل توجه نبوده و با توسعه شبکه الکتریکی گاه‌گاهش نیز یافته است. با این حال، با توجه به پیشرفت‌های اخیر در زمینه مواد، یاتاقان‌های مغناطیسی و الکترونیک قدرت، سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ طیار به عنوان یک گزینه مناسب مورد توجه قرار گرفته است.



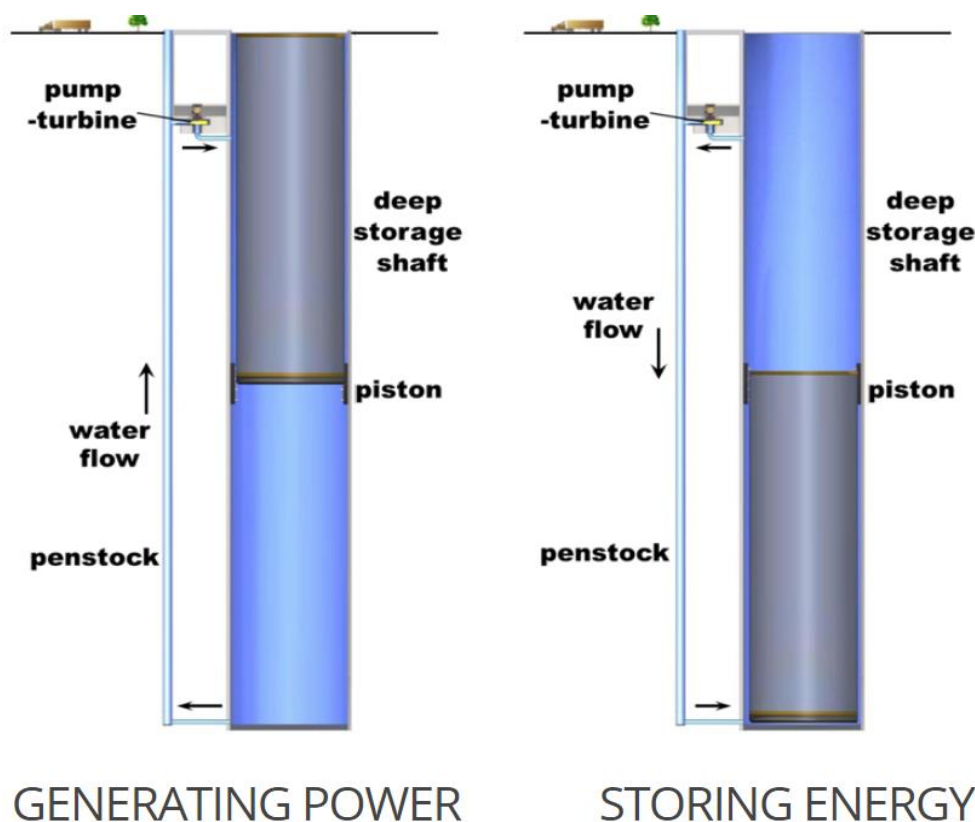
۳-۴- سیستم‌های مبتنی بر پتانسیل گرانشی

۳-۴-۱- اجزاء و نحوه عملکرد سیستم‌های مبتنی بر پتانسیل گرانشی

در سیستم‌های مبتنی بر پتانسیل گرانشی از مفهوم یا ایده سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای استفاده شده است. در این بین استفاده از سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای نیاز به شرایط خاص جغرافیایی دارد در حالی که سیستم‌های مبتنی بر پتانسیل گرانشی تقریباً در تمامی مکان‌ها قابل پیاده سازی است. این سیستم‌ها در حال حاضر با عنوان GPM (مخفف عبارت انگلیسی Gravity Power Module) در تعداد محدود ساخته و عرضه می‌شوند.

نحوه کارکرد سیستم‌های مبتنی بر پتانسیل گرانشی در دو مد ذخیره‌سازی و تولید برق در شکل (۳-۹) نشان داده

شده است [۵۹].



شکل ۳-۹: شماتیک کارکرد مازول قدرت گرانشی به همراه اجزای آن

GPM (ماژول قدرت گرانشی) از یک پیستون بسیار بزرگ استفاده می‌کند که در یک محور عمیق و از آب پر شده به حالت تعلیق است. در اطراف پیستون از سیستم عایق لغزشی به منظور جلوگیری از نشت استفاده می‌شود. یک لوله بازگشتی به توربین/پمپ در سطح زمین، سیستم را کامل می‌سازد. پیستون می‌تواند از سنگ تقویت شده یا بتن (با هزینه کمتر) ساخته شود. محور عمیق در داخل زمین یک بار در آغاز عملیات از آب پر شده و پس از آن مهر و موم

می شود و بدین ترتیب دیگر به آب نیاز ندارد. در GPM از سیستم پمپ-توربین فرانسیس استفاده می شود. سیستم فرانسیس در هد بالا (فشار بالا) در هر دو مد پمپ و توربین راندمان بالایی دارد [۵۹].

در فاز ذخیره سازی، آب از بالاترین نقطه سیستم به پایین ترین نقطه آن پمپ شده و پیستون به سمت بالا حرکت می کند تا تمامی حجم آب در پایین آن قرار گیرد. در فاز تولید پیستون رها شده و با حرکت آن به سمت پایین، جریانی از آب به سمت بالا شکل می گیرد که با عبور از مجموعه پمپ-توربین فرانسیس برق تولید می شود.

بهره برداری اقتصادی از GPM به طور قابل ملاحظه ای به هزینه ساخت محور بستگی دارد و نکته جالب این است که این هزینه کم و ناچیز است. این بدان دلیل است که GPM نیاز به حفاری کمتر نسبت به سیستم تلمبه ذخیره ای در ظرفیت یکسان دارد. علاوه بر این از فناوری های حفاری موجود مربوط به معادن روباز در آن استفاده می شود. از این سیستم ذخیره سازی حتی در مناطق متراکم شهری نیز می توان استفاده کرد. به اعتقاد بعضی از کارشناسان، ذخیره سازی انرژی مبتنی بر پتانسیل گرانشی در حال حاضر صرفاً در حد یک ایده یا مفهوم بوده و حتی به گام های اولیه توسعه و رشد نیز نرسیده است [۵۹].

۳-۴-۲- ویژگی ها و مشخصات سیستم های مبتنی بر پتانسیل گرانشی

برای GPM بازه توان بین ۴۰ تا ۱۵۰ مگاوات، انرژی مخصوص حدود ۱ وات ساعت بر کیلوگرم، توان مخصوص حدود ۳ وات بر کیلوگرم، طول عمر بیش از ۳۰ سال، زمان پاسخ دهی در حد چند ثانیه، بازده بین ۷۵ تا ۸۰ درصد و هزینه سرمایه گذاری به ازاء هر کیلووات توان ۱۰۰۰ دلار گزارش شده است. در خصوص هزینه سرمایه گذاری مرتبط با انرژی و هزینه های تعمیر و نگهداری سیستم های مبتنی بر پتانسیل گرانشی اطلاعات دقیق و معتبری وجود ندارد. زمان دشارژ این سیستم ها حداقل ۳۰ ثانیه است. بازه ذخیره سازی این سیستم ها نیز از چند ساعت تا چند ماه می باشد [۶۰].

ماژولار بودن، استفاده از تکنولوژی های موجود، سازگاری زیست محیطی، محل انعطاف پذیری، ساخت سریع، هزینه کم، طول عمر طولانی و بازدهی بالا مزایای سیستم های مبتنی بر پتانسیل گرانشی بشمار رفته و پیش بینی می شود استفاده از این سیستم ها در آینده به طرز قابل ملاحظه ای افزایش یابد [۵۹].

۳-۴-۳- تاریخچه پیدایش و تکامل سیستم های مبتنی بر پتانسیل گرانشی

سیستم های مبتنی بر پتانسیل گرانشی سیستم های نوینی بوده و تاریخچه چندانی نمی توان برای آنها مطرح نمود. برای اولین بار بکارگیری از این سیستم ها در مقالات علمی ۵ سال اخیر (۲۰۱۵ به بعد) مطرح شد. اولین کتاب در خصوص این سیستم ها نیز ماه می سال ۲۰۱۹ توسط Elsevier با عنوان "Gravity Energy Storag" چاپ و منتشر شد.



۳-۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این فصل از گزارش روش‌های مکانیکی ذخیره‌سازی انرژی و تجهیزات مورد استفاده در هر یک از آنها مورد بررسی قرار گرفت. سیستم‌های هوای فشرده (CAES)، سیستم‌های هیدروالکتریکی تلمبه ذخیره‌ای (PHES)، چرخ طیار یا فلاپیول و سیستم‌های مبتنی بر انرژی پتانسیل گرانشی سیستم‌هایی هستند که در آنها از روش‌های مکانیکی جهت ذخیره‌سازی انرژی استفاده می‌شود. موارد مذکور به ترتیب معرفی شدند و مشخصات هر یک از سیستم‌ها و تاریخچه پیدایش و تکامل آنها تشریح گردید.



فصل ۴

روش‌های الکتروشیمیایی

ذخیره‌سازی انرژی و فناوری‌های

مربوطه



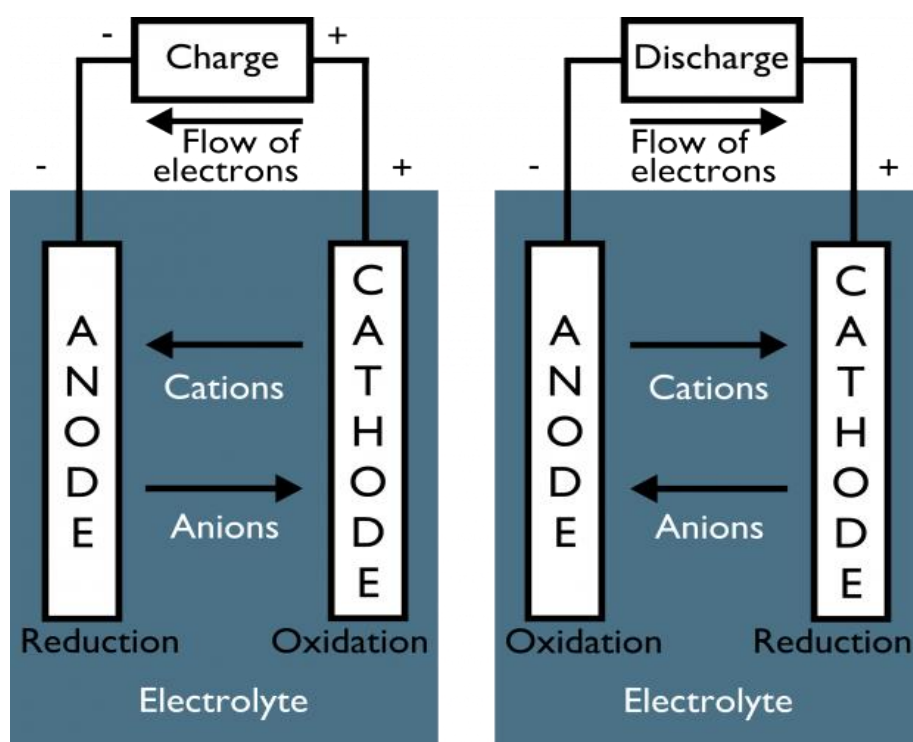
مقدمه

در این فصل از گزارش به تشریح روش الکتروشیمیایی ذخیره‌سازی انرژی پرداخته می‌شود. در این روش از انواع باتری‌های قابل شارژ جهت ذخیره‌سازی استفاده می‌شود. لیست کامل از باتری‌های قابل شارژ موجود و در دست توسعه بیش از ۳۰ گروه اصلی (بعضی از این گروه‌ها دارای چندین زیرگروه هستند) را شامل می‌شود که بررسی همه آنها خارج از حوصله این ضابطه است. به منظور تامین نیازهای موجود و آتی در حوزه ذخیره‌سازی بخصوص در مقیاس بزرگ (ظرفیت تا چند مگاوات)، تحقیق و توسعه بر روی پنج گروه از باتری‌های قابل شارژ شامل باتری‌های لیتیم-یونی، باتری‌های سرب-اسیدی، باتری‌های جریان، باتری‌های مبتنی بر نیکل یا پایه نیکل و باتری‌های دما بالا در حال انجام است [۶۱]. با توجه به اهمیت موضوع، پنج گروه ذکر شده به ترتیب معرفی شده و مشخصات هر یک به صورت اجمالی مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت. در گام اول به معرفی باتری‌های قابل شارژ و نحوه عملکرد آنها در حالت کلی (بدون در نظر گرفتن انواع آن) پرداخته می‌شود.

۴-۱- باتری‌های قابل شارژ

یک باتری قابل شارژ یا باتری ذخیره‌ساز یا سلول ثانویه یا انباشتگر یک باتری الکتریکی است که برخلاف باتری‌های ابتدایی یک بار مصرف، می‌تواند به دفعات شارژ و دشارژ شود. به تعریف دیگر، باتری‌های قابل شارژ گروهی از پیل‌های الکتروشیمیایی هستند که از لحاظ الکتریکی قابلیت شارژ مجدد را دارند. باتری‌های قابل شارژ از یک یا چند سلول الکتروشیمیایی تشکیل می‌شوند. واژه انباشتگر از این جهت برای باتری‌های قابل شارژ استفاده می‌شود که این باتری‌ها انرژی را از طریق یک واکنش الکتروشیمیایی برگشت‌پذیر، ذخیره می‌کنند. باتری‌های قابل شارژ در شکل‌ها و اندازه‌های مختلف ساخته می‌شوند و بازه پوشش توانی آنها از مقیاس‌های بسیار کوچک (باتری ساعت) تا سیستم‌های چند مگاواتی به منظور پایدارسازی شبکه‌های توزیع برق را شامل می‌شود. ترکیبات مختلفی از مواد جهت تهیه الکترودها و الکترولیت‌ها در این باتری‌ها استفاده می‌شود و همین مساله موجب شده انواع مختلفی از این باتری‌ها ساخته و روانه بازار شود. شماتیک عملکرد باتری‌های قابل شارژ در دو مد شارژ و دشارژ در شکل (۴-۱) آورده شده است [۶۲].

همانگونه که از شکل (۴-۱) نیز پیداست در مد دشارژ، حرکت الکترون‌ها در مدار خارجی (تغذیه کننده بار) از آند (قطب منفی) به کاتد (قطب مثبت) است. در این مد، یون‌های منفی (Anions) در الکترولیت به سمت آند حرکت می‌کنند. در نقطه مقابل، یون‌های مثبت (Cations) به سمت کاتد حرکت می‌کنند. مجموعه واکنش‌های شیمیایی رخ داده در این مد موجب می‌شود که آند الکترون از دست دهد و کاتد الکترون بدست آورد. از دست دادن الکترون موجب اکسیداسیون (Oxidation) و بدست آوردن آن موجب احیاء (Reduction) می‌شود. در مد شارژ دقیقاً عکس آنچه در مد دشارژ رخ می‌دهد، حادث می‌شود. در واقع آنچه موجب بهره‌گیری از فناوری باتری‌های قابل شارژ شده است، وجود فرایندهای شیمیایی برگشت‌پذیر می‌باشد [۶۲].



شکل ۴-۱: شماتیک نحوه کارکرد یک باتری قابل شارژ در دو مد شارژ و دشارژ

۲-۴- باتری های لیتیم-یونی

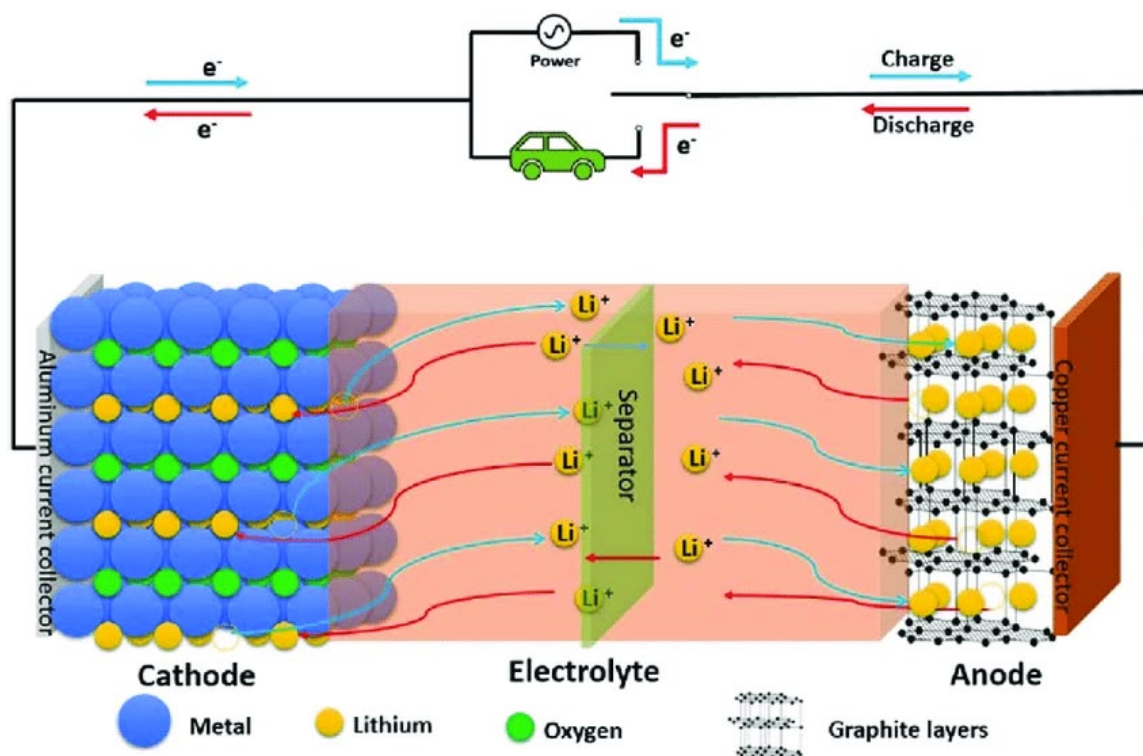
۴-۲-۱- اجزاء و نحوه کارکرد باتری های لیتیم-یونی

باتری های لیتیوم-یونی (Lithium-ion battery) (مخفف انگلیسی: Li-ion) یک خانواده از باتری های قابل شارژ هستند که در آنها در زمان دشارژ، یون های لیتیم از الکترود منفی به سمت الکترود مثبت و در هنگام شارژ شدن وارونه حرکت می کنند [۶۳].

در باتری های لیتیم یونی، الکترود مثبت یا کاتد از یک ترکیب لیتیم مانند لیتیم کبالت اکسید و الکترود منفی یا آنود از کربن ساخته شده و یک لایه جداکننده در بین آنها قرار دارد. وجود لایه جداکننده به منظور اطمینان از عبور یون های مورد نظر در فرایند الکتروشیمیایی مربوطه است. الکترولیت در باتری های لیتیمی از نمک لیتیم در یک حلال آلی ساخته شده است. استفاده از حلال آلی در نقش الکترولیت به دلیل اشتعال زا بودن نیازمند انجام پاره ای از اقدامات ایمنی است. نقص در عملکرد هر یک از اجزای الکترولیت باعث نقص در عملکرد کل باتری می شود. باتری های لیتیمی مجهز به مدارهای الکترونیکی محافظ و فیوزهایی جهت جلوگیری از عکس شدن قطبیت، اعمال ولتاژ بیش از حد، گرم شدن بیش از حد و موارد ایمنی دیگر هستند. شماتیک کارکرد باتری های لیتیم-یونی در شکل (۴-۲) آورده شده است [۶۴].

باتری های لیتیم-یونی در اشکال و اندازه های مختلف ساخته می شوند. چهار شکل اصلی و غالب جهت ساخت این باتری ها شامل استوانه ای کوچک، استوانه ای بزرگ، شبه مکعب مستطیل (به عنوان مثال باتری تلفن همراه) و

پوشش‌های پلاستیکی سخت (مجموعه باتری در خودروهای برقی) می‌باشد. باتری‌های لیتیم-یونی در فاز تجاری‌سازی قرار دارند [۶۴].



شکل ۴-۲: شماتیک نحوه کارکرد یک باتری لیتیم-یونی در دو مد شارژ و دشارژ

۴-۲-۲- انواع باتری‌های لیتیم-یونی

با توجه به مواد انتخابی برای الکترودها و همچنین الکترولیت، انواع مختلفی از باتری‌های لیتیم-یونی ساخته شده و به عنوان محصول تجاری عرضه شده‌اند. بر این اساس دسته‌ها یا کلاس‌های گوناگونی نیز برای انواع باتری‌های لیتیم-یونی ارائه شده است. مبنای دسته‌بندی در کلاس‌های مذکور نوع الکتروود مثبت (کاتد)، نوع الکتروود منفی (آند) و نوع الکترولیت می‌باشد [۶۵]. انواع مختلف باتری‌های لیتیم-یونی بر اساس نوع الکتروود مثبت (کاتد) عبارتند از:

- ۱- باتری لیتیم کبالت اکسید
- ۲- باتری لیتیم نیکل اکسید
- ۳- باتری لیتیم منگنز اکسید
- ۴- باتری لیتیم آهن فسفات
- ۵- باتری لیتیم نیکل منگنز کبالت اکسید
- ۶- باتری لیتیم نیکل کبالت آلومینیوم اکسید

انواع مختلف باتری‌های لیتیم-یونی بر اساس نوع الکتروود منفی (آند) عبارتند از:



- ۱- باتری پایه کربنی
 - ۲- باتری لیتیم تیتانته
 - ۳- باتری لیتیم فلز
 - ۴- باتری پایه آلیاژی
 - ۵- باتری پایه سیلیکونی
 - ۶- باتری تبدیلی
- انواع مختلف باتری های لیتیم- یونی بر اساس نوع الکترولیت عبارتند از :

- ۱- باتری با الکترولیت آبی
- ۲- باتری با الکترولیت مایع ارگانیکی
- ۳- باتری با الکترولیت پلیمری
- ۴- باتری با الکترولیت سرامیکی
- ۵- باتری با الکترولیت جامد

۴-۲-۳- مشخصات و ویژگی های باتری های لیتیم-یونی

برای باتری های لیتیم- یونی بازه توان بین ۰,۰۵ تا ۱۰ مگاوات، بازه انرژی بین ۵۰ کیلووات تا ۲,۵ مگاوات ساعت، انرژی مخصوص ۱۰۰ تا ۲۶۵ وات ساعت بر کیلوگرم و توان مخصوص ۱۵۰ تا ۲۰۰۰ وات بر کیلوگرم گزارش شده است. چگالی حجمی توان و چگالی حجمی انرژی برای ذخیره ساز مذکور به ترتیب بین ۱۳۰۰ تا ۱۰۰۰۰ کیلووات بر متر مکعب و بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ کیلووات ساعت بر متر مکعب می باشد [۱۱].

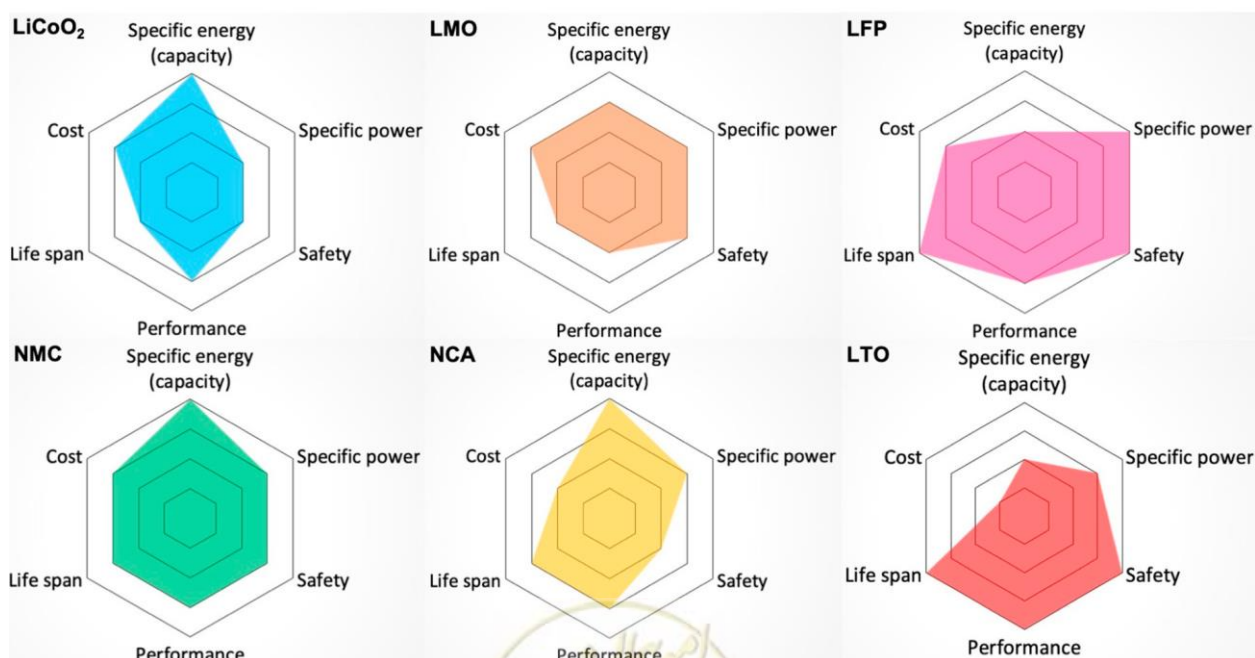
زمان شارژ در حد چند دقیقه تا چند ساعت، زمان پاسخگویی معادل چند میلی ثانیه، زمان دشارژ چند دقیقه تا چند ساعت، بازه ذخیره سازی بین چند دقیقه تا چند روز (کمتر از یک ماه توصیه شده است)، عمق دشارژ برابر ۰,۸ یا ۸۰ درصد و دشارژ خودی ۰,۱۵ تا ۰,۳ درصد در یک روز از جمله مشخصات دیگر باتری های لیتیم- یونی بشمار می روند. بازه دمایی مربوط به کارکرد این سیستم ها بین ۲۰- تا ۶۰ درجه سانتیگراد می باشد. ولتاژ نامی هر سلول از این ذخیره ساز بین ۳,۶ تا ۴,۲ ولت قرار دارد [۱۲].

بازده باتری های لیتیم- یونی بین ۸۵ تا ۹۵ درصد است. تداوم این ذخیره ساز (شامل یک بار شارژ و دشارژ کامل) بین ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ و طول عمر آن بین ۲۰ تا ۲۵ سال می باشد. هزینه سرمایه گذاری برای این ذخیره ساز شامل هزینه مربوط به توان بین ۱۲۰۰ تا ۴۰۰۰ دلار به ازای هر کیلووات و هزینه مربوط به انرژی بین ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ دلار به ازای هر کیلووات ساعت گزارش شده است. هزینه تعمیر و نگهداری این ذخیره ساز در برخی مطالعات و گزارشات ناچیز و صفر ذکر شده است [۱۲].

فضای مورد نیاز برای ذخیره‌سازی یک کیلووات ساعت انرژی در باتری‌های لیتیم-یونی حدود ۰.۰۱ متر مربع می‌باشد. اثر حافظه در باتری‌های لیتیم-یونی دیده نشده است. با در نظر گرفتن پارامترهای زیاد، متوسط، کم، خیلی کم و فاقد تاثیر برای تاثیرات مخرب زیست محیطی، اثر زیست محیطی این ذخیره‌ساز "خیلی کم" گزارش شده است. با در نظر گرفتن امتیازهای ۱ تا ۵ برای خاصیت بازیافت بگونه‌ای که ۱ بدترین و ۵ بهترین حالت باشد، امتیاز بازیافت باتری‌های لیتیم-یونی برابر "۴" خواهد بود. این باتری‌ها قابلیت کاربرد متحرک نیز دارد [۱۸].

با در نظر گرفتن سطوح خوب، معمولی و ضعیف برای شاخص‌های مقیاس‌پذیری و ایمنی و سطوح زیاد، متوسط و کم برای شاخص انعطاف‌پذیری، باتری‌های لیتیم-یونی در شاخص اول در سطح خوب، در شاخص دوم در سطح ضعیف و در شاخص آخر در سطح متوسط قرار می‌گیرد [۱۹].

در سال‌های اخیر استفاده از باتری‌های لیتیم-یونی در خودروها یا وسایل نقلیه برقی مورد توجه پژوهشگران و مهندسان قرار گرفته و تحقیقات فراوانی در این زمینه انجام شده است. این تحقیقات به منظور دستیابی به فناوری‌های برتر همچنان ادامه دارد. در شکل (۳-۴) انواع مختلف باتری‌های لیتیم-یونی به منظور استفاده در خودرو برقی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در واقع پنج گروه از باتری‌های لیتیم-یونی بر اساس نوع الکتروود مثبت شامل لیتیم کبالت اکسید (LiCoO_2)، لیتیم منگنز اکسید (LMO)، لیتیم آهن فسفات (LFP)، لیتیم نیکل منگنز کبالت اکسید (NMC)، لیتیم نیکل کبالت آلومینیوم اکسید (NCA) و لیتیم تیتانته (LTO) با یکدیگر مقایسه شده‌اند.



شکل ۳-۴: مقایسه انواع باتری‌های لیتیم-یونی مورد استفاده در خودروهای برقی با در نظر گرفتن معیارهای گوناگون

ملاک‌های مقایسه در شکل (۳-۴) عبارتند از :

- ۱- انرژی مخصوص یا ظرفیت که نشان دهنده میزان انرژی قابل ذخیره در باتری به ازای واحد وزن آن است. به نوعی این ملاک یا معیار، تعیین کننده میزان مسافت جهت رانندگی است.
 - ۲- توان مخصوص که بیانگر حداکثر جریان قابل برداشت از باتری به منظور شتاب دادن به خودرو برقی است.
 - ۳- ایمنی که همواره یکی از مهمترین ملاک ها می باشد. یک حادثه کوچک می تواند تاثیر قابل ملاحظه ای بر روی افکار عمومی داشته باشد.
 - ۴- عملکرد که انعکاسی از شرایط باتری خودرو بخصوص در شرایط سخت دمایی است.
 - ۵- چرخه عمر که نشان دهنده تعداد دفعات شارژ و دشارژ باتری است.
 - ۶- هزینه که علاوه بر قیمت در برگیرنده مواردی همچون گارانتی، خدمات پس از فروش و غیره نیز می باشد. زیاد بودن در این معیار حالت بهینه بشمار می رود.
- همانگونه که از شکل (۳-۴) نیز پیداست، باتری های لیتیم نیکل منگنز کبالت اکسید، لیتیم آهن فسفات و لیتیم منگنز اکسید بهترین انتخاب ها برای استفاده در خودرو برقی هستند [۶۴].

۴-۲-۴- مزایا و معایب باتری های لیتیم-یونی

در حالت کلی، مزایای باتری های لیتیم-یونی در مقایسه با سایر باتری های مشابه عبارتند از [۶۵]:

- ۱- چگالی انرژی بالا (۶ تا ۷ برابر باتری های سرب- اسید)
- ۲- تداوم بالا (امکان استفاده تا ۶ سال با در نظر گرفتن استفاده نرمال)
- ۳- ولتاژ نامی بالا در مقایسه با باتری های نیکل-کادمیم یا نیکل- هیدرید فلز (با در نظر گرفتن ۳,۷ ولت تقریباً سه برابر)
- ۴- نرخ شارژ و دشارژ بالا که زمینه را برای استفاده از این باتری ها در وسایلی همچون خودرو برقی فراهم می سازد (به غیر از لیتیم کبالت اکسید).
- ۵- دشارژ خودی کم
- ۶- وزن کم
- ۷- امکان استفاده در بازه دمایی گسترده (۲۰- تا ۶۰ درجه سانتیگراد). در برخی کاربردها دمای ۴۵- درجه سانتیگراد نیز گزارش شده است.

۸- دوستدار محیط زیست بدون داشتن فلزات سنگین همچون سرب، جیوه، کادمیم و غیره

در نقطه مقابل، معایب باتری های لیتیم-یونی عبارتند از [۶۵]:

- ۱- ایمن نبودن و در برخی موارد رخ دادن انفجار (در نمونه های اخیر تا حد زیادی بر این مشکل غلبه شده است).
- ۲- عدم امکان دشارژ باتری های لیتیم کبالت اکسید با جریان بالا

۳- نیاز به مدار و تجهیزات حفاظتی

۴- قیمت تمام شده بالا در مواردی همچون باطری لیتیم تیتانته

۴-۲-۵- کاربرد باطری‌های لیتیم-یونی

باطری‌های لیتیم-یونی می‌توانند یک منبع تغذیه با چگالی انرژی بالا برای طیف قابل توجهی از دستگاه‌ها باشند. برای تغذیه ادوات و تجهیزات در اندازه‌های بزرگ، تعداد زیادی از باتری‌های لیتیم-یونی را در مدارهای موازی به هم متصل می‌کنند که کارآمدتر از اتصال یک باتری بزرگ است. از جمله این دستگاه‌ها می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد [۶۶]:

✓ دستگاه‌های قابل حمل یا پرتابل شامل تلفن‌های همراه، لپ‌تاپ‌ها و تبلت‌ها، دوربین‌های عکاسی دیجیتال و دوربین‌های فیلمبرداری، کنسول‌های دستی و چراغ قوه

✓ ابزار کار شامل مته‌های شارژی، دستگاه‌های برش و اره شارژی و انواع تجهیزات باغبانی مجهز به باطری‌های قابل شارژ

✓ وسایل نقلیه برقی و هیبریدی شامل خودروهای هیبریدی، موتور سیکلت‌های برقی، اسکوتر، دوچرخه‌های الکتریکی، صندلی‌های چرخدار پیشرفته، تجهیزات رادیوکنترل، هواپیماهای مدل و فضاپیماها

باتری‌های لیتیم-یونی کاربردهای مخابراتی عمده دارند. باتری‌های لیتیم-یونی با الکترولیتی به غیر از آب، توانایی پشتیبانی از تجهیزات در شبکه‌های مخابراتی را دارند و در واقع یک منبع تغذیه قابل اعتماد برای آنها بشمار می‌روند. باتری‌های لیتیم-یونی همچنین با رعایت برخی نکات فنی می‌توانند تامین کننده انرژی در محیط‌ها و ساختارهای کنترل نشده باشند.

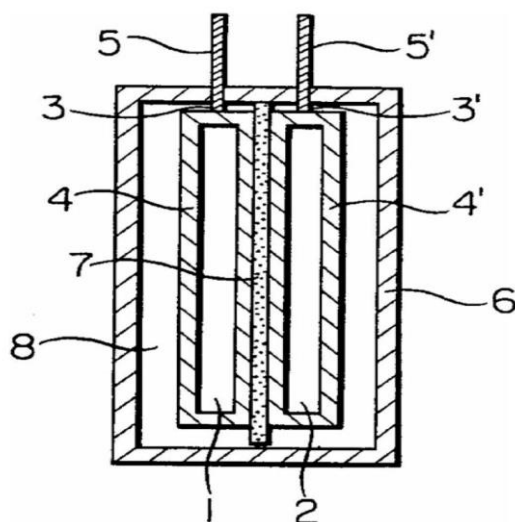
۴-۲-۶- تاریخچه پیدایش و تکامل باطری‌های لیتیم-یونی

برای نخستین بار، ایده طراحی و ساخت باطری قابل شارژ لیتیم-یونی با استفاده از لایه‌های دی سولفید تیتانیم (TiS_2) به عنوان کاتد و آندی از جنس فلز لیتیم توسط شخصی به نام Whittingham در سال ۱۹۷۶ مطرح شد. این شخص در شرکت Exxon (شرکت معروف آمریکایی فعال در زمینه نفت و گاز در آن زمان) مشغول به کار بود. شرکت Exxon تلاش بسیار زیادی کرد تا طرح Whittingham را به یک محصول تجاری تبدیل کند اما مشکلات فنی مشتمل بر تشکیل دندریت‌های (ساختار شاخه‌ای از کریستال‌ها) لیتیم، مشکلات مربوط به اتصال کوتاه و نبود ایمنی لازم مانع از انجام این کار شد. در همین سال ایده حرکت یون‌های مثبت لیتیم (اساس کار باطری‌های لیتیم-یونی) به سمت گرافیت و اکسید به ترتیب به عنوان آند و کاتد توسط Besenhard مطرح شد [۶۴].

برای اولین بار در سال ۱۹۸۱، Goodenough ایده استفاده از لیتیم اکسید کبالت به جای کاتد در باطری‌های لیتیم-یونی را مطرح نمود. این ایده علیرغم مزیت‌های آن (انرژی و ولتاژ بالای حاصل از آن) در ابتدا چندان مورد استقبال قرار نگرفت. Goodenough همچنین در سال ۱۹۸۳، منگنز اکسید را به عنوان یک کاتد ارزان قیمت جهت استفاده در

باتری های لیتیم-یونی شناسایی کرد. با وجود پیشرفت های مذکور، نبود یک ماده ایمن جهت استفاده در آند، بکارگیری کبالت اکسید، منگنز اکسید و نیکل اکسید در باتری های لیتیم - یونی را محدود کرد. در همین سال ها بود که گرافیت با ساختار لایه ای به عنوان یک کاتد بسیار خوب قابل استفاده در باتری های لیتیم - یونی توسط Yazami, Besenhard و Basu شناسایی شد [۶۴].

در سال ۱۹۸۷، Yoshino ژاپنی یک سلول نمونه از یک باتری لیتیم-یونی را با استفاده از آند کربنی و LiCoO_2 به عنوان کاتد طراحی نموده و ساخت. شماتیک این سلول نمونه به همراه اجزای آن در شکل (۴-۴) آورده شده است [۶۴].



شکل ۴-۴: شماتیک سلول نمونه از باتری لیتیم-یونی ساخته شده توسط Yoshino ژاپنی در سال ۱۹۸۷ به همراه اجزای آن

در شکل مذکور اجزاء با توجه به شماره اختصاص داده شده عبارتند از :

- ۱- الکتروود مثبت (کاتد)
- ۲- الکتروود منفی (آند)
- ۳- میله جمع کننده جریان
- ۴- شبکه معلق
- ۵- ترمینال خارجی
- ۶- محفظه یا پوشش سلول
- ۷- جداساز
- ۸- الکتروولیت

آند کربنی و LiCoO_2 به عنوان کاتد در هوا بسیار پایدار هستند. این مساله از دیگه ساخت و تولید و جنبه های مهندسی بسیار حائز اهمیت است. طرح ارائه شده توسط Yoshino موجب شد تا سازندگان بزرگ باتری در اوایل دهه ۹۰ میلادی به ساخت باتری های لیتیم-یونی روی بیاورند. در واقع موفقیت این دانشمند ژاپنی نقطه آغاز طراحی،

ساخت و توسعه باتری‌های مدرن لیتیم-یونی به شکل تجاری بود. سرانجام شرکت Sony در سال ۱۹۹۱ اولین نمونه از باتری‌های لیتیم-یونی را تجاری نموده و روانه بازار کرد [۶۷].

در طی سال‌های ۱۹۹۱ تاکنون انواع مختلفی از باتری‌های لیتیم-یونی ساخته و به بازار عرضه شده‌اند. همچنین چندین پیشرفت عمده در زمینه طراحی و ساخت باتری‌های لیتیم-یونی صورت پذیرفته که با توجه به حجم سرمایه‌گذاری به نظر می‌رسد این پیشرفت‌ها در آینده با سرعت و میزان بیشتری ادامه یابد. از جمله این پیشرفت‌ها می‌توان به معرفی LiFePO_4 به عنوان یک کاتد ارزان قیمت توسط Goodenough در سال ۱۹۹۶ و معرفی C-Sn-Co به عنوان یک آند با ظرفیت بالا توسط شرکت Sony در سال ۲۰۰۵ اشاره کرد. پیشرفت‌های سال‌های اخیر این حوزه نیز بیشتر بر استفاده از نانوساختارهای سیلیکونی به عنوان آند استوار بوده است. سه جزء باتری‌های لیتیم-یونی شامل کاتد، آند و الکترولیت بستر پیشرفت‌های این حوزه و موضوعی درخور توجه برای محققان و پژوهشگران در رشته‌های پایه و مهندسی مواد می‌باشد [۶۷-۶۸].

۴-۳- باتری‌های سرب-اسیدی

۴-۳-۱- اجزاء و نحوه کارکرد باتری‌های سرب-اسیدی

باتری سرب-اسید یا باتری اسیدی قدیمی‌ترین نوع از باتری‌های قابل شارژ است. این باتری علی‌رغم ذخیره انرژی کم نسبت به وزن و حجم آن، به دلیل هزینه پایین و عرضه زیاد در وسایل نقلیه موتوری مورد استفاده قرار می‌گیرد. بطور کلی می‌توان باتری سرب-اسید را متشکل از ۴ بخش دانست [۶۹]:

۱- الکترود یا صفحات مثبت که به آن‌ها آند نیز گفته می‌شود. الکترودها در حین دشارژ، جذب این قطب یا صفحات می‌شوند. در باتری‌های سرب-اسید، ماده شیمیایی عمده تشکیل دهنده صفحات مثبت، اکسید سرب (PbO_2) می‌باشد.

۲- الکترود یا صفحات منفی که به آن‌ها کاتد نیز گفته می‌شود. الکترودها در حین دشارژ از این قطب خارج می‌شوند. ماده شیمیایی عمده تشکیل دهنده الکترودهای منفی، سرب (Pb) است. لازم به ذکر است که سرب یا اکسید آن از لحاظ مکانیکی قابلیت فرم‌گیری مناسب ندارند و اغلب به کمک افزودن آلیاژهای مختلف و همچنین شبکه‌های نگهدارنده حالت‌دهی می‌شوند. ضمناً به این مواد، مواد فعال نیز گفته می‌شود زیرا در واقع، واکنش شیمیایی داخل باتری به کمک سرب و اکسید آن صورت می‌گیرد.

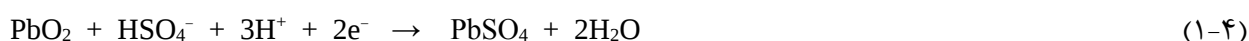
۳- الکترولیت که محیط مابین دو الکترود را پر می‌کند و در واقع بستری برای عبور شارژ بین الکترودهای مثبت و منفی را فراهم می‌آورد. در باتری‌های سرب-اسیدی هر دو قطب در محلولی از اسید سولفوریک (H_2SO_4) با غلظتی در حدود ۲۵ تا ۴۰ درصد و آب (H_2O) با غلظتی در حدود ۶۰ تا ۷۵ درصد، غوطه‌ور هستند. ترکیب آب و اسید سولفوریک باعث می‌شود که اسید سولفوریک به صورت یونیزه درآمده و به یون‌های H^+ و HSO_4^- تبدیل شود.

۴- جداکننده بخش دیگر باتری های سرب- اسید را تشکیل می دهد. وظیفه اصلی آن جداسازی و ایزوله کردن الکتریکی قطب های مثبت و منفی از یکدیگر است. بخشی از فناوری ساخت باتری های سرب- اسیدی مربوط به طراحی این ایزولاتور است. در بعضی از انواع باطری های سرب- اسیدی که از نظر حجم باتری محدودیتی وجود ندارد این ایزولاسیون به کمک ایجاد فاصله فیزیکی بین الکترودها ایجاد می شود که باعث ارزان تر شدن باتری ولی افزایش حجم آن می شود. انواع مختلفی از جداکننده ها تاکنون ابداع شده اند که مرسوم ترین آن ها عبارتند از:

- ❖ جداکننده های پلی وینیل کلرید (PVC)
- ❖ جداکننده های سلولزی
- ❖ جداکننده های پلی اتیلنی
- ❖ جداکننده های از جنس فایبر گلاس (Absorptive Glass Mat که به اختصار AGM نامیده می شود)
- ❖ جداکننده های ژله ای

در حالت کلی اختلاف ولتاژ ایجاد شده به کمک یک سلول از الکترودهای مثبت و منفی در باتری های سرب-اسیدی حدود ۲ تا ۲٫۱ ولت است. ولتاژهای بالاتر مثل ۱۲ ولت از اتصال سری چندین سری از الکترودهای مثبت و منفی تشکیل می شود. قطر صفحات مثبت و منفی نقش اساسی در تعیین ظرفیت باتری بازی می کنند. اغلب برای کاربردهای با ظرفیت معمول همچون باتری های استارتر خودرو، قطر این صفحات کمتر از ۲ میلیمتر است اما در کاربردهایی با قابلیت شارژدهی برای مدت طولانی، قطر الکترودها به ۶ میلیمتر نیز می رسد [۷۰].

در روند دشارژ، الکترود مثبت الکترون را از مدار بیرونی به خود جذب می کند. این الکترون ها با مواد فعال قطب مثبت و یون های موجود در الکترولیت، یک واکنش شیمیایی را آغاز می کنند. این واکنش در رابطه (۴-۱) نمایش داده شده است:



الکترون دریافت شده از مدار بیرونی و یون های موجود در الکترولیت اطراف الکترود مثبت باعث تولید سولفات سرب (PbSO_4) و آب در اطراف آن می شوند. در همین زمان در مجاورت الکترود منفی واکنش دیگری در حال اتفاق است. سرب موجود در قطب منفی با یون های HSO_4^- وارد واکنش می شود و نتیجه آن تولید سولفات سرب و الکترون آزاد مطابق واکنش ارائه شده در رابطه (۴-۲) است.



این واکنش را اکسیداسیون سرب نیز می نامند. شایان ذکر است مدار بار و باتری از نظر الکتریکی بسته محسوب می شوند و هر الکترون تولید شده در قطب منفی پس از عبور از بار به قطب مثبت وارد شده و هر دو واکنش (۴-۱) و (۴-۲) را کاملاً امکان پذیر می سازد. مطابق این واکنش ها، در انتهای پروسه دشارژ سطح هر دو قطب بطور کامل با

سولفات سرب (PbSO_4) پوشیده خواهد شد و محیط الکترولیت، خاصیت اسیدی خود را از دست می‌دهد. در این زمان دیگر باتری نقش خود به عنوان تامین کننده انرژی را از دست می‌دهد [۷۰].

روند شارژ کاملاً عکس روند دشارژ است، در الکتروود مثبت از ترکیب آب و سولفات سرب، اکسید سرب و یون‌های هیدروژن حاصل می‌شود. این واکنش مطابق رابطه (۳-۴) است.



در الکتروود منفی یون‌های هیدروژن تولید شده از رابطه (۳-۴) به همراه سولفات سرب وارد واکنش شده و مجدداً سرب و یون HSO_4^- تولید می‌شود. واکنش مربوطه مطابق رابطه (۴-۴) است.

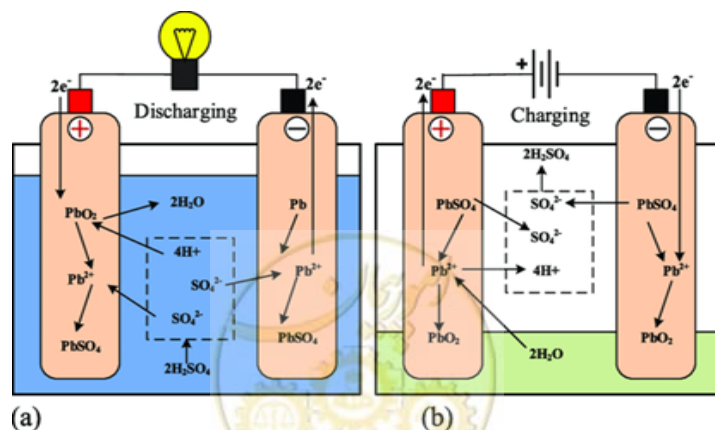


همانگونه که مشخص است روابط شارژ و دشارژ کاملاً عکس یکدیگر بوده که در نتیجه باتری از قابلیت شارژ و دشارژ مداوم برخوردار می‌شود و الکترون تولید شده در واکنش‌ها جهت ایجاد جریان مورد نیاز در مصرف‌کننده‌ها استفاده می‌شود.

در کنار دو واکنش فوق الذکر پدیده دیگری نیز در فاز شارژ رخ می‌دهد که منجر به تولید گاز هیدروژن در اطراف الکتروود منفی و گاز اکسیژن در مجاورت الکتروود مثبت می‌شود. این پدیده یا واکنش مطابق رابطه (۵-۴) است.



گازهای تولید شده برخلاف یون‌ها، فرار بوده و با خارج شدن از محیط باتری باعث کم شدن آب باتری خواهند شد. در واقع این مساله، مشکل اصلی باطری‌های سرب- اسیدی است که آنها را نیازمند به استفاده دوره‌ای از آب باطری می‌نماید. به منظور رفع این مشکل ساختارهای جدیدی طراحی و ارائه گردید که با کمک آنها بازترکیب هیدروژن و اکسیژن تولید شده امکان‌پذیر شد و بنابر این نیاز به آب باطری جدید مرتفع گردید. این پیشرفت و تغییر عمده باعث تقسیم‌بندی باطری‌های سرب- اسیدی به دو گروه باطری‌های سرب- اسیدی تر و باطری‌های سرب- اسیدی خشک شده است. شماتیک یک باطری سرب- اسیدی به همراه فرایندهای شارژ و دشارژ در شکل (۵-۴) آورده شده است [۷۰].

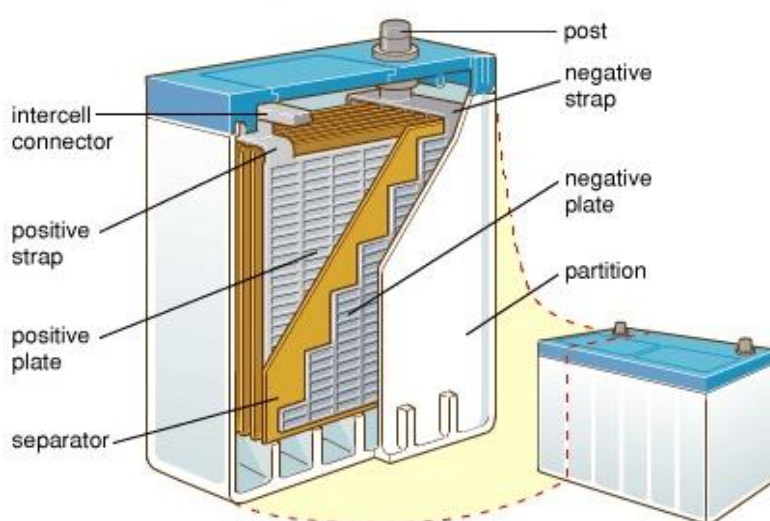


شکل ۵-۴: شماتیک فرایندهای شارژ و دشارژ در یک باطری سرب- اسیدی

۴-۳-۲- انواع باتری های سرب-اسیدی

همانگونه که در بخش قبلی گفته شد، باتری های سرب- اسیدی به دو گروه باتری های سرب- اسیدی تر (flooded lead acid battery یا vented lead acid) و باتری های سرب- اسیدی خشک (Valve Regulated Lead Acid یا Sealed Lead Acid Battery) تقسیم بندی می شوند.

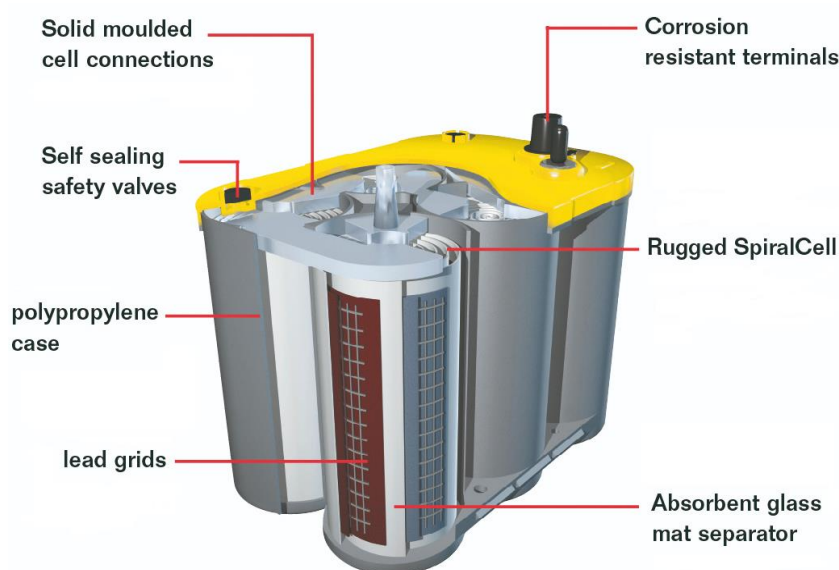
الکترولیت در باتری های سرب- اسیدی تر مایع است. لزوم حفظ آب باتری در سطح معین، استفاده از این نوع باتری ها برای مواردی که قرار نیست در آنها تعمیر و نگهداری صورت پذیرد را غیرممکن می سازد. به دلیل شناور بودن محلول الکترولیت، این نوع باتری ها فقط به صورت عمودی نصب می شوند. مورد مهم دیگر حساسیت این نوع باتری ها در تکان های شدید است. در صورت ضربه های مداوم و شدید امکان جدا شدن اتصال دهنده بین صفحات، جدا شدن مواد فعال و رسوب در محفظه و شکستن جداکننده بین صفحات مثبت و منفی وجود دارد. با توجه به خروج گازهای قابل اشتعال بخصوص هیدروژن در این نوع باتری ها هنگام شارژ، اطمینان از تهویه هوا و جلوگیری از گرمای بیش از حد پیرامون این باتری ها در زمان شارژ الزامی و اجتناب ناپذیر است. شکل (۴-۶) شماتیک یک باتری سرب- اسیدی تر به همراه اجزاء آن به غیر از الکترولیت را نشان می دهد.



شکل ۴-۶: شماتیک یک باتری سرب- اسیدی تر به همراه اجزای آن

باتری های سرب- اسیدی خشک به دو دسته باتری های AGM و Gel تقسیم بندی می شوند [۷۱]. AGM مخفف عبارت Absorbent Glass Mat و منظور از آن نوعی ماده فایبرگلاس ضخیم می باشد. Gel نیز مخفف Gell به معنای ژله یا خمیر است. در باتری های سرب- اسیدی خشک، الکترولیت اصطلاحاً Immobilise می شود. مفهوم آنست که الکترولیت بر یک بستر نشانده می شود تا از حالت مایع خارج شود یا به عبارت بهتر حرکت آزاد سیالاتی نداشته باشد. در باتری های AGM، بستر همان ماده فایبر گلاس است که بدان اشاره شد. در باتری های Gel، بستر سیلیکا یا سایر ذرات

ژله‌ای می‌باشد. انتخاب جداکننده در باتری‌های سرب-اسیدی خشک نیز منطبق بر بستر مذکور است. در باتری‌های AGM، جداکننده، Absorbent Glass Mat و در باتری‌های Gel جداکننده سیلیکا یا ماده ژله‌ای مناسب می‌باشد. وجود صفحات مثبت و منفی با طرح شبکه‌ای و استفاده از جداکننده‌های AGM و ژله‌ای موجب می‌شود تا جریان الکترون‌ها روان باشد و نفوذ اکسیژن از قطب مثبت به قطب منفی به راحتی صورت پذیرفته و آب تشکیل شود. باتری‌های سرب-اسیدی خشک را می‌توان مشابه باتری‌های سرب-اسیدی تر به شکل مسطح ساخت. علاوه بر این امکان ساخت این باتری‌های به شکل رولهای چرخشی به منظور تشکیل فرم سیلندری یا استوانه‌ای نیز وجود دارد. شکل (۷-۴) شماتیک یک باتری سرب-اسیدی خشک به شکل استوانه‌ای را نشان می‌دهد [۷۲].



شکل ۷-۴: شماتیک یک باتری سرب-اسیدی خشک سیلندری به همراه اجزای آن

تفاوت اصلی بین GEL و AGM در دمای کاری، حساسیت به شارژ، چرخه شارژ و دشارژ و قیمت است. باتری‌های GEL دارای عملکرد بهتری هستند ولی حساسیت بیشتری به نحوه شارژ و اضافه شارژ دارند و گرانتر هستند. باتری‌های سرب-اسیدی خشک نیاز به سرویس و تعمیر ندارند ولی در صورت بروز مشکل برای الکترولیت باتری، به راحتی نمی‌توان آن را تعمیر کرد.

در حالت کلی باتری‌های سرب-اسیدی خشک :

- ۱- قابلیت نصب در هر زاویه و جهتی دارند چرا که الکترولیت آنها حالت مایع ندارد و بنابر این بهترین گزینه برای کاربردهای متحرک هستند.
- ۲- در زمان کوتاه‌تری در مقایسه با باتری‌های سرب-اسیدی تر شارژ می‌شوند.
- ۳- در مقابل شارژ بیش از حد، آسیب‌پذیر بوده و بلافاصله خراب می‌شوند.
- ۴- در مقایسه با باتری‌های سرب-اسیدی تر (به شرط نگهداری مناسب باتری‌های تر) عمر مفید کمتری دارند.

۵- از ایمنی بالاتری نسبت به نمونه های تر برخوردار بوده و از این جهت برای محیط زیست و کاربران مناسب تر هستند.

۶- در یک سایز مشخص (ارائه شده توسط Battery Council International) قیمت نوع AGM دو برابر و قیمت نوع Gel پنج برابر قیمت باتری سرب- اسیدی تر مشابه می باشد.

۷- در مقایسه با باتری های سرب- اسیدی تر در مقابل انفجار حرارتی آسیب پذیرترند [۷۵-۷۳].

۴-۳-۳- مشخصات و ویژگی های باتری های سرب- اسیدی

برای باتری های سرب- اسیدی بازه توان تا ۲۰ مگاوات، بازه انرژی بین ۱۸ تا ۱۰۰ مگاوات ساعت، انرژی مخصوص ۳۰ تا ۵۰ وات ساعت بر کیلوگرم و توان مخصوص ۲۰۰ تا ۴۰۰ وات بر کیلوگرم گزارش شده است [۱۱]. چگالی حجمی توان و چگالی حجمی انرژی برای ذخیره ساز مذکور به ترتیب بین ۹۰ تا ۷۰۰ کیلووات بر متر مکعب و بین ۵۰ تا ۸۰ کیلووات ساعت بر متر مکعب می باشد [۱۲].

زمان شارژ در حد چند ساعت، زمان پاسخگویی معادل چند میلی ثانیه، زمان دشارژ چند ثانیه تا چند ساعت، بازه ذخیره سازی بین چند دقیقه تا چند روز (کمتر از یک ماه توصیه شده است)، عمق دشارژ برابر ۰,۸ یا ۸۰ درصد و دشارژ خودی ۰,۱ تا ۰,۴ درصد در یک روز از جمله مشخصات دیگر باتری های سرب- اسیدی بشمار می روند. بازه دمایی مربوط به کارکرد این سیستم ها بین ۳۰- تا ۵۰ درجه سانتیگراد می باشد. ولتاژ نامی هر سلول از این ذخیره ساز بین ۲ تا ۲,۳۵ ولت قرار دارد [۷۰].

بازده باتری های سرب- اسیدی بین ۷۰ تا ۹۰ درصد است. تداوم این ذخیره ساز (شامل یک بار شارژ و دشارژ کامل) بین ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ و طول عمر آن بین ۵ تا ۱۵ سال می باشد. هزینه سرمایه گذاری برای این ذخیره ساز شامل هزینه مربوط به توان بین ۱۷۵ تا ۶۰۰ دلار به ازای هر کیلووات و هزینه مربوط به انرژی بین ۴۰۰ تا ۱۵۰۰ دلار به ازای هر کیلووات ساعت گزارش شده است. هزینه تعمیر و نگهداری این ذخیره ساز ۵۰ دلار بر کیلووات در سال می باشد [۱۲].

فضای مورد نیاز برای ذخیره سازی یک کیلووات ساعت انرژی در باتری های سرب- اسیدی حدود ۰,۰۶ متر مربع می باشد. اثر حافظه در باتری های سرب- اسیدی دیده نشده است. با در نظر گرفتن پارامترهای زیاد، متوسط، کم، خیلی کم و فاقد تاثیر برای تاثیرات مخرب زیست محیطی، اثر زیست محیطی این ذخیره ساز "متوسط" گزارش شده است. با در نظر گرفتن امتیازهای ۱ تا ۵ برای خاصیت بازیافت بگونه ای که ۱ بدترین و ۵ بهترین حالت باشد، امتیاز بازیافت باتری های سرب- اسیدی برابر "۵" خواهد بود. این باتری ها قابلیت کاربرد متحرک نیز دارد [۱۸].

با در نظر گرفتن سطوح خوب، معمولی و ضعیف برای شاخص های مقیاس پذیری و ایمنی و سطوح زیاد، متوسط و کم برای شاخص انعطاف پذیری، باتری های سرب- اسیدی در شاخص اول در سطح معمولی، در شاخص دوم در سطح ضعیف و در شاخص آخر در سطح متوسط قرار می گیرد [۱۹].

شارژ کردن بیش از اندازه باطری‌های سرب- اسیدی منجر به الکترولیز و انتشار اکسیژن و هیدروژن می‌شود. این پروسه به عنوان Gassing شناخته می‌شود. سلول‌های باتری تر دارای شکاف تهویه برای خروج گازهای تولید شده هستند. در نمونه‌های خشک شیر اطمینان گاز را تخلیه می‌کند و فشار را به حالت طبیعی برمی‌گرداند. با این حال شیرها می‌توانند مشکل‌دار شوند. برای مثال اگر کثیفی و پسماندها روی هم انباشته شود. بنابراین باطری‌های سرب- اسیدی خشک نیز به طور کامل فارغ از بحث تعمیرات و نگهداری نیستند [۷۰].

باتری‌های سرب اسید اگر به مدت طولانی دشارژ باقی بمانند، به دلیل کریستال شدن سولفات سرب، ظرفیت خود را از دست می‌دهند و شارژ نمی‌شوند. دی اکسید سرب و سرب، مواد فعال بر روی صفحات باتری هستند. برای تشکیل سولفات، سرب با اسید سولفوریک در الکترولیت باتری واکنش می‌دهند. سولفات سرب در ابتدا به صورت بسیار ریز و نامنظم تشکیل می‌شود و وقتی که باتری دوباره شارژ می‌شود به راحتی به سرب، دی اکسید سرب و اسید سولفوریک تبدیل می‌شود. با افزایش تعداد شارژ و دشارژ باتری، مقداری از این سولفات سرب در جریان شارژ به الکترولیت و اکسید- سرب تبدیل نمی‌شود و به آرامی به شکل بلوری پایدار درمی‌آید. بنابراین در طول زمان، تمام سرب به صفحات باتری برنمی‌گردد و مقدار مواد فعال قابل استفاده برای تولید برق کاهش می‌یابد. باتری‌هایی که سولفات می‌شوند، مقاومت داخلی بالایی پیدا می‌کنند و تنها قسمت کوچکی از جریان نامی خود را می‌توانند ارائه دهند. سولفات شدن روی چرخه شارژ نیز تاثیر می‌گذارد. در نتیجه زمان شارژ افزایش می‌یابد، شارژ کمتر و بازدهی کم می‌شود و دمای باتری بالاتر می‌رود [۷۶].

تمامی باطری‌های سرب- اسیدی (فارغ از نوع آن) تا ۷۰ درصد ظرفیت خود به راحتی و در زمان مقرر شارژ می‌شوند. بعد از گذر از این مرحله، شارژ باطری اسیدی تا نزدیکی ظرفیت نامی به راحتی صورت نمی‌پذیرد و این مساله موجب می‌شود زمان بسیار بیشتری صرف شود. این مساله یک نقطه ضعف برای باطری‌های سرب- اسیدی بشمار می‌رود [۷۶].

۴-۳-۴- کاربرد باطری‌های سرب- اسیدی

بیشترین استفاده از باطری‌های سرب- اسیدی به استارت‌ر اتومبیل‌ها و صنایع روشنایی برمی‌گردد. در این بین در مراکز تلفن و سوئیچینگ، نیروگاه‌ها، سدها، منابع تصفیه آب و فاضلاب، معادن، پست‌های فشار قوی، سیستم‌های مخابراتی، سیستم‌های روشنایی اضطراری، منابع تغذیه بدون وقفه (UPS)، سیستم‌های استارت دیزل ژنراتورهای صنعتی، لوکوموتیوهای دیزل الکتریک، سیستم‌های روشنایی واگن‌های مسافری، کشتی‌های باری و مسافری و حتی زیردریایی‌های اتمی از باطری‌های سرب- اسیدی به منظور منابع تغذیه اصلی، پشتیبان و راه‌انداز استفاده می‌شود [۷۷].

۴-۳-۵- تاریخچه پیدایش و تکامل باطری‌های سرب- اسیدی

Gautherot دانشمند فرانسوی در سال ۱۸۰۱ مشاهده کرد سیم‌هایی که برای آزمایش الکترولیز بکار رفته‌اند بعد از اینکه از باتری اصلی جدا می‌شوند، دارای مقدار کمی جریان الکتریکی هستند [۷۸]. Gaston Plante در ۱۸۵۹، اولین

نمونه از باتری های سرب- اسیدی را ارائه کرد که با عبور جریان در جهت مخالف امکان شارژ آن وجود داشت. مدل اولیه باتری Plante از دو ورق سرب که با یک نوار پلاستیکی جدا شده و شکل مارپیچ به خود گرفته بودند تشکیل می شد. این باتری ها بیشتر در روشنایی واگن قطارها بکار رفت [۷۹]. در سال ۱۸۸۱ یک باطری بهبود یافته سرب- اسیدی توسط Camille Alphonse ارائه شد که در آن از ورقه های مشبک سرب استفاده می شد. این ساختار برای تولید انبوه مناسب تر بود. حداثال سال های ۱۸۸۱ تا اوایل دهه سی قرن بیستم میلادی باطری های سرب- اسیدی مختلفی طراحی و ساخته شد. تمامی این باطری ها از نوع تر بودند و بنابراین کاربرد آنها تنها به موارد ساکن مربوط می شد [۷۸].

اولین باتری سرب- اسیدی ژله ای توسط Fabrik Sonneberg در سال ۱۹۳۴ اختراع شد. در ادامه باطری های ژله ای مدرن به شکل امروزی توسط Otto Jache در سال ۱۹۵۷ اختراع و ثبت گردید. اولین سلول از باطری های AGM (مشابه آنچه که امروزه متداول است) Cyclon نام داشت که توسط Gates Rubber در سال ۱۹۷۲ اختراع و ثبت گردید. در حال حاضر باطری های AGM بر پایه همان تکنولوژی توسط شرکت EnerSys تولید می شود. Cyclon یک سلول مارپیچی با الکترودهای فویل سرب نازک بود. تلاش ها برای ساخت باطری با استفاده از سلول Cyclon ادامه پیدا کرد تا اینکه در اواسط دهه ۸۰، دو شرکت انگلیسی Chloride و Tungstone به طور همزمان باتری های AGM با عمر مفید نامی برابر ۱۰ سال را در ظرفیت های مختلف (تا ۴۰۰ آمپر-ساعت) به بازار معرفی کردند. این محصولات توسط شرکت مخابراتی British Telecom در مبدل های دیجیتال مورد استفاده قرار گرفت. در همان دوره، Gates Rubber امتیاز یک شرکت انگلیسی به نام Varley که در حوزه باتری های هواپیما و نظامی مشغول فعالیت بود را خریداری کرد. Varley موفق شد با استفاده از تکنولوژی Cyclon، باطری های صفحه مسطح با نرخ دشارژ استثنایی تولید نماید. این باطری ها در هواپیماهای مختلف مسافربری و جنگی از جمله BAe 125 و F16 به عنوان اولین جایگزین برای باتری های معمولی نیکل-کادمیم مورد استفاده قرار گرفت و نتایج مثبت بکارگیری آن تایید شد [۷۸].

تا سال ۱۹۹۷ حرکت به سمت طراحی و ساخت باتری های AGM با ظرفیت ۳۹۰۰ آمپر- ساعت ادامه یافت. در این سال محققان دریافتند که اضافه کردن کربن به باطری های سرب- اسیدی می تواند موجب افزایش کارایی و طول عمر این باطری ها شده و خرابی آنها را کاهش دهد [۷۸]. از آن زمان تاکنون تحقیقات بر روی باطری های سرب- اسیدی در قالب موارد

۱- استفاده از کربن در الکتروود منفی

۲- استفاده از کلکتورهای (جمع کننده ها) منفی کربنی

۳- استفاده از الکترودهای منفی کربنی

۴- ترکیب باطری سرب- اسیدی با یک سوپرکازن در الکتروولیت مشترک و تشکیل یک فرابطری

۵- ساخت باطری های سرب- اسیدی دوقطبی که در آنها یک سمت الکتروود حامل بار منفی و سمت دیگر آن حامل

بار مثبت باشد.

در دست انجام است. شایان ذکر است بحث استفاده از باتری‌های سرب-اسیدی دوقطبی از سال‌ها قبل مطرح بوده لکن به دلیل مشکلات فنی در آن زمان‌ها امکان پیاده‌سازی و ساخت این باتری‌ها وجود نداشته که در سال‌های اخیر بشر توانسته بر این مشکلات فائق آید. همچنین در حال حاضر بیشترین کاربرد باتری‌های سرب-اسیدی به باتری‌های AGM مربوط می‌شود و باتری‌های سرب-اسیدی تر نیز کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند [۷۷].

۴-۴- باتری جریانی

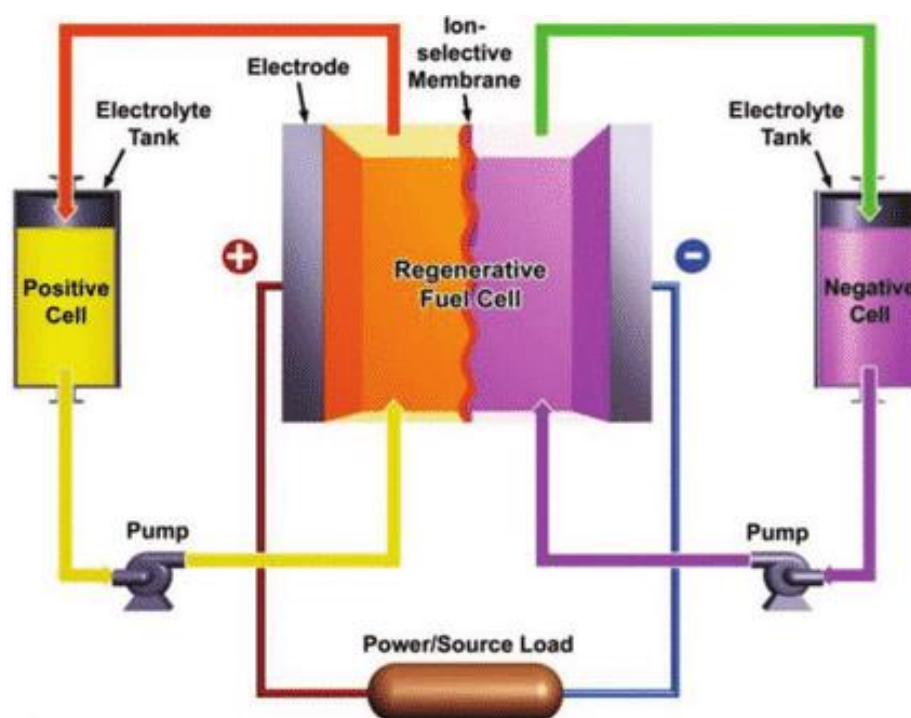
۴-۴-۱- اجزاء و نحوه کارکرد باتری‌های جریانی

باتری جریانی یک نوع پیل الکتروشیمیایی است که در آن انرژی شیمیایی بوسیله دو جزء شیمیایی حلال در مایع تولید می‌شود. این دو جزء در یک مدار بسته گردش نموده و جهت جداسازی آنها از غشاء استفاده می‌شود. تبادل یون (همراه شده با جریان الکتریکی در مدار خارجی) از طریق غشاء مذکور صورت می‌پذیرد. ولتاژ سلول در باتری جریانی با استفاده از معادله Nernst بدست می‌آید. این ولتاژ بین ۱ تا ۲٫۲ ولت است [۸۰].

پیل الکتروشیمیایی که در پاراگراف قبل از آن به عنوان باتری جریانی نام برده شد، با توجه به ساختار خود می‌تواند کاربردی دوگانه داشته باشد. در این خصوص اگر جزء شیمیایی یا به عبارتی سوخت مصرف شده از مدار خارج و سوخت جدید جایگزین شود، سلول الکتروشیمیایی مذکور یک پیل سوختی است. در نقطه مقابل اگر برای بازتولید سوخت از جریان الکتریکی استفاده شود، سلول الکتروشیمیایی مذکور یک باتری جریانی است. برتری فنی قابل ملاحظه باتری‌های جریانی به سایر ذخیره‌سازهای قابل شارژ عمر طولانی آن می‌باشد.

با توجه به آنچه که گفته شد، باتری جریانی نوعی باتری قابل شارژ است که در آن دو مایع با بار الکتریکی متفاوت (که در اصطلاح الکترولیت نام دارند) با یکدیگر یون مبادله کرده و از این تبادل یون، انرژی الکتریکی تولید می‌شود. الکترولیت‌ها با استفاده از ماده حائل به صورت مجزا از هم قرار گرفته و تامین آنها در صورت نیاز توسط پمپ‌ها و تانک‌های موجود در سیستم صورت می‌پذیرد. با تغییر میزان الکترولیت موجود می‌توان انرژی الکتریکی تولیدی را کنترل کرد. در این بین توان تولیدی تابعی از مساحت الکترودهای بکار گرفته شده می‌باشد. خروجی باتری‌های جریانی را از چند کیلووات تا چند مگاوات تغییر داد [۸۱]. باتری‌های جریانی هم اکنون در فاز رشد قرار دارند. شماتیک یک پیل الکتروشیمیایی در نقش پیل سوختی یا باتری جریانی به همراه اجزای آن در شکل (۴-۸) آورده شده است.





شکل ۴-۸: شماتیک یک پیل الکتروشیمیایی در نقش پیل سوختی یا باتری جریان‌ی به همراه اجزای آن

۴-۴-۲- انواع باتری‌های جریان‌ی

تاکنون انواع مختلفی از باتری‌های جریان‌ی که در آنها از مواد و ساختارهای شیمیایی متفاوت استفاده می‌شود توسعه داده شده‌اند. دسته‌بندی باتری‌های جریان‌ی شامل:

- ۱- باتری‌های اکسایشی-کاهش‌ی (در انگلیسی به اختصار Redox خوانده می‌شود که مخفف Reduction-Oxidation می‌باشد).
- ۲- باتری هیبریدی
- ۳- باتری بی‌غشاء
- ۴- باتری ارگانیک
- ۵- باتری متال هیدرید
- ۶- باتری نانو شبکه
- ۷- باتری نیمه جامد

می‌شود [۸۲]. باتری وانادیومی از گروه باتری‌های اکسایشی-کاهش‌ی و باتری روی-بروم از گروه باتری‌های هیبریدی در مقایسه با انواع باتری‌های جریان‌ی توسعه بیشتری یافته و امکان استفاده از آنها به عنوان ذخیره‌سازهای انرژی در حال و آینده به مراتب بیشتر است. نظر به این مهم در ادامه به معرفی موارد مذکور پرداخته می‌شود. جهت آشنایی با انواع دیگر باتری‌های جریان‌ی می‌توان به منابع مربوطه مراجعه نمود [۸۳].

۴-۲-۱-۴-۴- باتری‌های اکسایشی- کاهشی وانادیومی

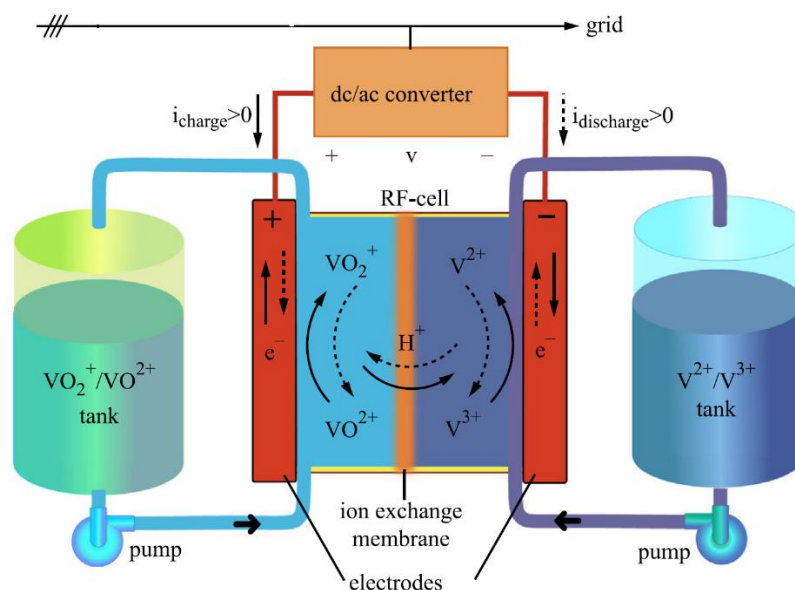
۴-۲-۱-۴-۴- اجزاء و نحوه کارکرد باتری‌های اکسایشی- کاهشی وانادیومی

در گروه باتری‌های اکسایشی-کاهشی انواع مختلفی از باتری‌ها از جمله باتری وانادیومی، باتری پلی‌سولفید برمید، باتری اورانیومی و غیره قرار می‌گیرند که معروف‌ترین آنها باتری اکسایشی-کاهشی وانادیومی است. باتری وانادیومی مجموعه‌ای ساختار یافته از چندین سلول الکتروشیمیایی است که در آن دو الکترولیت با استفاده از غشای تبادل پروتونی (Proton Exchange Membrane) که به اختصار PEM خوانده می‌شوند) از یکدیگر جدا شده‌اند. الکترودهای کربن-پلیمر، ورقه کربن، صفحه کربن، کربن شیشه‌ای و ورقه گرافیت در باتری وانادیومی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این بین الکترودهای مبتنی بر نانوتیوب‌های کربنی نیز اخیراً مورد استفاده قرار گرفته‌اند. هر دو الکترولیت در این باتری‌ها وانادیوم پایه هستند. بخش مثبت سلول شامل یونهای VO_2^+ و VO^{2+} و بخش منفی سلول شامل یونهای V^{2+} و V^{3+} می‌باشد. برای تهیه الکترولیت مورد نیاز باتری‌های وانادیومی، پنتاکسید وانادیوم (V_2O_5) یا وانادیل سولفات ($VOSO_4$) در اسید سولفوریک (H_2SO_4) حل می‌شود. شایان ذکر است محلول حاصل باید خاصیت اسیدی قوی داشته باشد [۸۴].

در هنگام شارژ باتری‌های وانادیومی، با برداشتن الکترون از ترمینال مثبت باتری، یونهای VO^{2+} در بخش مثبت آن به یونهای VO_2^+ تبدیل می‌شوند. در همین زمان در بخش منفی تبدیل یونهای V^{3+} به یونهای V^{2+} در حال انجام است. در هنگام دشارژ این فرایندها معکوس شده که نتیجه آن تولید ولتاژ مدار باز ۱٫۴۱ ولت در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد است. شماتیک یک باتری جریانی وانادیومی به همراه فرایندهای مربوطه و اجزا در شکل (۴-۹) آورده شده است.

چرخش مایع الکترولیت در باتری‌های جریانی وانادیومی، کاربرد این باتری‌ها را به موارد ساکن محدود می‌سازد. در واقع این باتری‌ها در ابعاد بزرگ و به صورت ثابت مورد استفاده قرار می‌گیرند [۸۴].





شکل ۴-۹: شماتیک یک باتری جریان و انادیومی به همراه فرایندهای شارژ و دشارژ آن و اجزای مربوطه

۴-۴-۲-۱-۲- مشخصات و ویژگی های باتری های اکسایشی - کاهش و انادیومی

برای باتری های جریان و انادیومی بازه توان بین ۰,۰۱ تا ۱۰ مگاوات، بازه انرژی بین ۱۰ کیلووات ساعت تا ۱۰ مگاوات ساعت، انرژی مخصوص ۲۵ تا ۳۵ وات ساعت بر کیلوگرم و توان مخصوص حداکثر تا ۱۰ وات بر کیلوگرم گزارش شده است [۱۱]. چگالی حجمی توان و چگالی حجمی انرژی برای ذخیره ساز مذکور به ترتیب بین ۰,۵ تا ۲ کیلووات بر متر مکعب و بین ۲,۵ تا ۲۰ کیلووات ساعت بر متر مکعب می باشد [۱۲].

زمان شارژ در حد چند ساعت، زمان پاسخگویی معادل چند میلی ثانیه، زمان دشارژ بین ۱ تا ۱۰ ساعت، بازه ذخیره سازی بین چند ساعت تا چند ماه، عمق دشارژ برابر ۱ یا ۱۰۰ درصد و دشارژ خودی بسیار کم از جمله مشخصات دیگر باتری های جریان و انادیومی بشمار می روند. ولتاژ نامی هر سلول از این ذخیره ساز بین ۱,۱۵ تا ۱,۵۵ ولت قرار دارد [۱۲].

بازده باتری های جریان و انادیومی بین ۶۰ تا ۷۵ درصد است. تداوم این ذخیره ساز (شامل یک بار شارژ و دشارژ کامل) بین ۱۲۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ و طول عمر آن تا ۲۰ سال می باشد. هزینه سرمایه گذاری برای این ذخیره ساز شامل هزینه مربوط به توان بین ۱۴۰۰ تا ۳۷۰۰ دلار به ازای هر کیلووات و هزینه مربوط به انرژی بین ۵۰۰ تا ۸۰۰ دلار به ازای هر کیلووات ساعت گزارش شده است. هزینه تعمیر و نگهداری این ذخیره ساز ۷۰ دلار بر کیلووات در سال می باشد [۱۲].

فضای مورد نیاز برای ذخیره سازی یک کیلووات ساعت انرژی در باتری های جریان و انادیومی حدود ۰,۰۴ متر مربع می باشد. اثر حافله در باتری های جریان و انادیومی دیده نشده است. با در نظر گرفتن پارامترهای زیاد، متوسط، کم، خیلی کم و فاقد تاثیر برای تاثیرات مخرب زیست محیطی، اثر زیست محیطی این ذخیره ساز "کم" گزارش شده است.

با در نظر گرفتن امتیازهای ۱ تا ۵ برای خاصیت بازیافت بگونه‌ای که ۱ بدترین و ۵ بهترین حالت باشد، امتیاز بازیافت باطری‌های مذکور برابر "۵" خواهد بود. این باطری‌ها قابلیت کاربرد متحرک ندارند [۱۸].

با در نظر گرفتن سطوح خوب، معمولی و ضعیف برای شاخص‌های مقیاس‌پذیری و ایمنی و سطوح زیاد، متوسط و کم برای شاخص انعطاف‌پذیری، باطری‌های جریانی-وانادیومی در شاخص اول در سطح خوب، در شاخص دوم در سطح ضعیف و در شاخص آخر در سطح زیاد قرار می‌گیرد [۱۹].

۴-۴-۲-۱-۳- مزایا و معایب باطری‌های اکسایشی-کاهشی وانادیومی

مشخصه قابل توجه باطری‌های وانادیومی سرعت قابل توجه آنها در پاسخگویی به تغییرات بار و ظرفیت اضافه‌بار قابل توجه آنهاست. تحقیقات نشان داده است این باطری‌ها می‌توانند در ۰٫۵ میلی‌ثانیه به تغییر بار به طور کامل و ۱۰۰ درصدی پاسخ دهند. علاوه بر این تا ۱۰ ثانیه در برابر اضافه بار چهار برابری مقاوم هستند [۸۲].

نقطه ضعف قابل توجه باطری‌های جریانی وانادیومی گستره دمایی کم آنها (۱۰ تا ۴۰ درجه سانتیگراد) برای عملکرد قابل قبول و مطمئن می‌باشد [۸۲].

در نسل دوم باطری‌های جریانی وانادیومی که هم اکنون در حال توسعه است چگالی انرژی این باطری‌ها دو برابر شده و تلاش می‌شود بازه دمایی کارکرد این باطری‌ها نیز حداقل امکان افزایش یابد [۸۴].

۴-۴-۲-۱-۴- کاربرد باطری‌های اکسایشی-کاهشی وانادیومی

امکان ایجاد ظرفیت قابل توجه از باتری‌های وانادیومی باعث شده تا از آنها به عنوان ذخیره‌کننده‌های مقیاس بزرگ انرژی به منظور کمک به تولید از منابع متغیر مانند باد یا خورشید و یا کمک به بخش تولید در مقابله با افزایش بسیار زیاد تقاضا استفاده شود [۸۲].

دشارژ یا تخلیه اتوماتیک بسیار کم باتری‌های وانادیومی موجب بکارگیری این باطری‌ها در مواردی شده که نیاز است ذخیره‌ساز انرژی برای مدت طولانی در حالت آماده بکار باشد. از جمله این موارد می‌توان به تامین انرژی مورد نیاز در سیستم‌های الکترونیک نظامی اشاره کرد. قابلیت باطری‌های وانادیومی از لحاظ داشتن چرخه کامل (شارژ و دشارژ به میزان ۱۰۰ صد درصد) و ماندن در صفر درصد از شارژ بدون داشتن محدودیت قابل توجه، آنها را برای ذخیره‌سازی انرژی سیستم‌های خورشیدی که در آنها باتری باید هر روز خالی و با توجه به شرایط آب و هوایی پر شود، مناسب می‌سازد. در حالت مقایسه، باتری‌های لیتیوم-یونی معمولاً در مواقعی که به کمتر از ۲۰٪ حالت شارژ تخلیه می‌شوند، آسیب می‌بینند. بنابراین آنها معمولاً بین ۲۰٪ تا ۱۰۰٪ حالت شارژ کار می‌کنند و این بدان معناست که فقط از ۸۰٪ ظرفیت نامی خود استفاده می‌کنند [۸۳].

زمان پاسخ قابل قبول باطری‌های وانادیومی باعث می‌شود آنها گزینه مناسبی به عنوان منابع تغذیه وقفه‌ناپذیر باشند. جایی که می‌توان از آنها به عنوان جایگزین باتری‌های سرب-اسیدی و یا ژنراتورهای دیزلی استفاده کرد. از جمله

کاربردهای دیگر باتری های وانادیومی می توان به تنظیم فرکانس در شبکه برق بخصوص ریزشبکه ها اشاره کرد. در این بین هنوز استفاده از این ذخیره ساز برای کاربرد مذکور توجیه اقتصادی ندارد [۸۳].

۴-۲-۲-۴-۴ باتری های هیبریدی روی- بروم

۴-۲-۲-۴-۴-۱ اجزاء و نحوه کارکرد باتری های هیبریدی روی- بروم

عدم وجود حداقل یکی از اجزای اکسایش و کاهش به صورت حلال کامل وجه تمایز باتری های هیبریدی با باتری های اکسایشی و کاهش می تواند به صورت گاز یا جامد باشد. به عنوان مثال در باتری روی- بروم که معروف ترین باتری هیبریدی است، فلز روی به صورت یک لایه جامد بر روی الکتروود منفی نشانده می شود [۸۵]. انواع مختلف باتری های جریان هیبریدی عبارتند از [۸۵]:

۱- باتری روی- بروم

۲- باتری روی- سریم

۳- باتری جریانی سرب- اسید

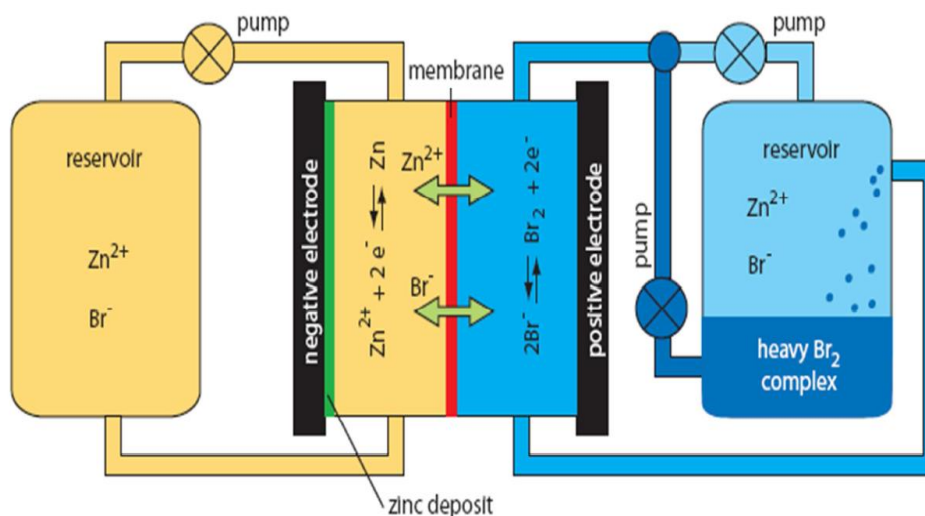
۴- باتری آهن- نمک

در باتری روی- بروم در حالت شارژ، جریان الکتریکی یک لایه از فلز روی را بر الکتروود منفی (غالباً پایه کربنی) می نشانند. در همین زمان در الکتروود مثبت، یون های بروم در حال اکسیداسیون (از دست دادن الکترون) بوده و به بروم تبدیل می شوند. در حالت دشارژ، عکس فرایندهای مذکور رخ می دهد و لایه فلز روی لحظه به لحظه نازک تر می شود. کل واکنش شیمیایی سلول مطابق معادله (۴-۶) خواهد بود. شماتیک یک باتری روی- بروم در شکل (۴-۱۰) آورده شده است. [۸۶].



مشکلاتی همچون زنگ زدگی فلز روی، خواص سمی بروم، تشکیل دندریته ها (شاخه های کریستالی) از جنس روی، تشکیل گاز هیدروژن و بازده نسبتاً پایین (بین ۶۵ تا ۷۵ درصد) در کنار خرابی باتری های روی- بروم بواسطه پلاریزه شدن، توسعه و بکارگیری هر چه بیشتر باتری های مذکور را محدود ساخته است [۸۶-۸۷].





شکل ۴-۱۰: شماتیک یک باطری روی-بروم نمونه به همراه اجزای آن

۴-۲-۲-۲-۴-۲- مشخصات و ویژگی‌های باطری‌های هیبریدی روی-بروم

برای باطری‌های روی-بروم بازه توان بین ۰,۰۲ تا ۱۰ مگاوات، بازه انرژی بین ۵۰ تا ۵۰۰۰ کیلووات ساعت، انرژی مخصوص ۶۵ تا ۷۵ وات ساعت بر کیلوگرم و توان مخصوص بین ۵۰ تا ۱۵۰ وات بر کیلوگرم گزارش شده است [۱۱]. چگالی حجمی توان و چگالی حجمی انرژی برای ذخیره‌ساز مذکور به ترتیب بین ۱ تا ۲۵ کیلووات بر متر مکعب و بیش از ۶۵ کیلووات ساعت بر متر مکعب می‌باشد [۱۲].

زمان شارژ بین ۳ تا ۴ ساعت، زمان پاسخگویی معادل چند میلی‌ثانیه، زمان دشارژ تا ۱۰ ساعت، بازه ذخیره‌سازی بین چند ساعت تا چند ماه، عمق دشارژ برابر ۱ یا ۱۰۰ درصد و دشارژ خودی بسیار کم از جمله مشخصات دیگر باطری‌های روی-بروم بشمار می‌روند. گستره دمایی کارکرد باطری‌های روی-بروم بین ۲۰ تا ۵۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. ولتاژ نامی متوسط هر سلول از این ذخیره‌ساز ۱,۸۲ ولت می‌باشد [۱۲].

بازده باطری‌های روی-بروم بین ۶۰ تا ۸۰ درصد است. تداوم این ذخیره‌ساز (شامل یک بار شارژ و دشارژ کامل) بیش از ۲۰۰۰ و طول عمر آن حداکثر ۱۰ سال می‌باشد. هزینه سرمایه‌گذاری برای این ذخیره‌ساز شامل هزینه مربوط به توان بین ۱۸۰۰ تا ۲۰۰۰ دلار به ازای هر کیلووات و هزینه مربوط به انرژی بین ۱۰۰ تا ۷۰۰ دلار به ازای هر کیلووات ساعت گزارش شده است [۱۲].

فضای مورد نیاز برای ذخیره‌سازی یک کیلووات ساعت انرژی در باطری‌های روی-بروم حدود ۰,۰۲ متر مربع می‌باشد. اثر حافظه در باطری‌های روی-بروم دیده نشده است. با در نظر گرفتن پارامترهای زیاد، متوسط، کم، خیلی کم و فاقد تاثیر برای تاثیرات مخرب زیست محیطی، اثر زیست محیطی این ذخیره‌ساز "کم" گزارش شده است. با در نظر گرفتن امتیازهای ۱ تا ۵ برای خاصیت بازیافت بگونه‌ای که ۱ بدترین و ۵ بهترین حالت باشد، امتیاز بازیافت باطری‌های مذکور برابر "۵" خواهد بود. این باطری‌ها قابلیت کاربرد متحرک دارند [۱۸].

با در نظر گرفتن سطوح خوب، معمولی و ضعیف برای شاخص های مقیاس پذیری و ایمنی و سطوح زیاد، متوسط و کم برای شاخص انعطاف پذیری، باطری های روی- بروم در شاخص اول در سطح خوب، در شاخص دوم در سطح ضعیف و در شاخص آخر در سطح زیاد قرار می گیرد [۱۹].

۴-۲-۳- مزایا و معایب باطری های هیبریدی روی- بروم

در حالت کلی، مزایای باطری های روی- بروم در مقایسه با سایر باطری های مشابه عبارتند از [۸۷]:

۱- دشارژ خودی بسیار کم

۲- عمق دشارژ برابر ۱ یا ۱۰۰ درصد

۳- دوستدار محیط زیست

۴- زمان شارژ مناسب

۵- آسانی ساخت و موجود بودن مواد مورد نیاز

در نقطه مقابل، معایب باطری های روی- بروم عبارتند از [۸۷]:

۱- امکان استفاده در بازه دمایی کم (۲۰ تا ۵۰ درجه سانتیگراد). در برخی مراجع دمای ۳۰ درجه سانتیگراد به

عنوان کران بالا گزارش شده است [۸۸].

۲- تغییرات شیمیایی مواد همچون زنگ زدن فلز روی، تشکیل دندریت ها و غیره که موجب کاهش عمر و تداوم

باطری می شود.

۴-۴-۳- تاریخچه پیدایش و تکامل باطری های جریانی

اولین باتری جریانی توسط دانشمند فرانسوی چارلز رنارد در سال ۱۸۸۴ اختراع شد. وی در باطری خود از روی و کلر به عنوان عناصر واکنش دهنده استفاده کرد و با استفاده از باطری یک موتور الکتریکی را به حرکت درآورد. این اختراع بلافاصله به فراموشی سپرده شد تا اینکه در سال ۱۹۵۴، دانشمند آلمانی، والتر کانگو، اختراع رنارد را مورد بررسی قرار داد و با استفاده از تیتانیوم کلرید و اسید هیدروکلریک، باطری جریانی جدیدی اختراع نمود [۸۸].

نوزده سال بعد سازمان ملی فضایی ایالات متحده (ناسا)، سال ۱۹۷۳، تحقیقاتی را در این زمینه آغاز کرد و اولین باتری جریانی اکسایشی-کاهشی از نوع آهن و کروم را برای ذخیره انرژی خورشیدی در پایگاه فضایی آینده یعنی کره ماه طراحی نموده و ساخت [۸۸].

با تغییر پایگاه فضایی از ماه به مریخ فضای تحقیق و توسعه در خصوص باطری های جریانی در ناسا دستخوش تغییر شد اما تحقیقات تجاری با رویکرد استفاده از اورانیوم در باطری های اکسایشی-کاهشی و طراحی و ساخت باتری های جریانی روی - بروم ادامه یافت. خطرناک بودن و سمی بودن مواد مورد استفاده، محدودیت های عمده ای بر سر راه توسعه و تجاری سازی باطری های جریانی مذکور بوجود آورد [۸۸].

در سال ۱۹۸۴، دانشگاه نیو ساوت ولز در استرالیا نمونه اولیه باتری جریانی وانادیومی را ساخت. این اولین بار بود که در هر دو طرف غشای باتری جریانی، مواد شیمیایی مشابه وجود داشت [۸۸]. از آن زمان تاکنون تحقیق و توسعه در خصوص طراحی و ساخت انواع باتری‌های جریانی فزونی یافته و همچنان در دست انجام است.

۴-۵- باتری‌های مبتنی بر نیکل یا پایه نیکل

۴-۵-۱- انواع باتری‌های مبتنی بر نیکل یا پایه نیکل

باتری‌های مبتنی بر نیکل یا پایه نیکل در مقایسه با سایر باتری‌های قابل شارژ قدمت قابل ملاحظه‌ای دارند. توسعه و بهبود این نوع باتری‌ها از ابتدای دهه ۹۰ میلادی آغاز شده و همچنان ادامه دارد. باتری‌های پایه نیکل در طیف گسترده‌ای از تجهیزات شامل منابع تغذیه بدون وقفه یا وقفه‌ناپذیر، دستگاه‌های ارتباط از راه دور و تجهیزات الکترونیکی استفاده می‌شوند. در باتری‌های پایه نیکل، آند، ماده فعال شامل نیکل اکسی‌هیدروکسید، الکترولیت هیدروکسید پتاسیم و کاتد هر یک از فلزات روی، آهن، متال هیدرید، کادمیم یا هیدروژن است. در میان باتری‌های پایه نیکل، باتری‌های نیکل-کادمیم (Ni-Cd) و نیکل-هیدرید فلز (Ni-MH) متداول‌تر بوده و به صورت کامل تجاری شده‌اند. در این بین سایر باتری‌های پایه نیکل همچون باتری نیکل-آهن (Ni-Fe)، نیکل-هیدروژن (Ni-H₂) و نیکل-روی (Ni-Zn) کاربردهای خاص داشته و کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند [۸۹].

به دلیل کم بودن انرژی خاص، ملاحظات تعمیر و نگهداری فراوان، تداوم کم و هزینه سرمایه‌گذاری بالا، باتری‌های Ni-Fe و Ni-Zn کاربردهای بسیار محدودی دارند [۸۹].

باتری Ni-H₂ قابلیت شارژ و دشارژ بیش از حد را داراست و بازه انرژی و توان قابل ملاحظه‌ای را پوشش می‌دهد. در نقطه مقابل، این باتری تداوم کمی داشته و بسیار گران است. دشارژ اتوماتیک بالا و چگالی انرژی حجمی کم به دلیل ترشح H₂ از دیگر نقاط ضعف این باتری بشمار می‌رود. این باتری به طور خاص برای کاربردهای فضایی و استفاده در هواپیماها طراحی و ساخته می‌شوند [۹۰-۹۱].

۴-۵-۲- باتری‌های نیکل-کادمیم

۴-۵-۲-۱- اجزاء و نحوه عملکرد باتری‌های نیکل-کادمیم

باتری Ni-Cd یا همان نیکل-کادمیم موفق‌ترین محصول از خانواده باتری‌های مبتنی بر نیکل است. در این باتری از اکسید نیکل به عنوان الکترود مثبت و از کادمیم فلزی به عنوان الکترود منفی استفاده می‌شود. قابلیت اطمینان بالا و عدم نیاز به تعمیرات و نگهداری منظم از مزایای این باتری بشمار می‌روند. تداوم این باتری بستگی زیادی به عمق دشارژ دارد. در طرح‌های پیشرفته جدید با عمق دشارژ ۱۰ درصد، تداوم بسیار بیشتری در مقایسه با باتری‌های نیکل-کادمیم (تداوم حداکثری ۲۵۰۰ گزارش شده است) متداول حاصل شده است. با این وجود، بزرگترین نقطه ضعف

باتری‌های نیکل-کادمیم، سمی بودن فلزات کادمیوم و نیکل است که مشکلات زیست-محیطی را به همراه دارد. در بسیاری از کشورهای اروپایی استفاده از باتری‌های نیکل-کادمیم فقط به کاربردهای ثابت ذخیره‌سازی محدود شده است [۷۶].

واکنش‌های الکتروشیمیایی دشارژ باتری نیکل-کادمیم به شرح زیر است:

در کاتد:



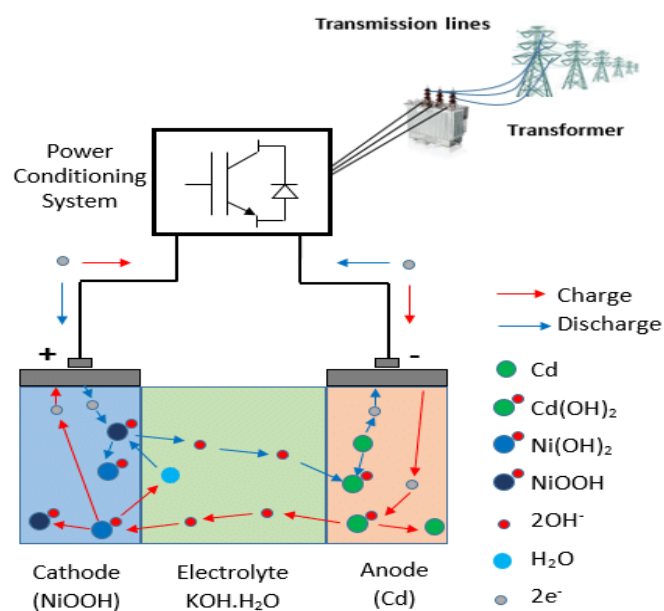
در آند:



پرواضح و مبرهن است که در فرایند شارژ، واکنش‌های صدرالذکر به صورت معکوس انجام می‌شوند. واکنش شیمیایی کامل مربوط به باتری‌های نیکل-کادمیم به صورت رابطه (۹-۴) می‌باشد.



در شکل (۱۱-۴) شماتیک فرایند شارژ و دشارژ باتری نیکل-کادمیم به همراه اجزاء مربوطه آورده شده است [۱۲].



شکل ۱۱-۴: شماتیک باتری نیکل-کادمیم به همراه اجزای آن

۴-۵-۲-۲- مشخصات و ویژگی‌های باتری‌های نیکل-کادمیم

برای باتری‌های نیکل-کادمیم بازه توان کمتر از ۴۰ مگاوات، بازه انرژی حداکثر تا ۷ مگاوات ساعت، انرژی مخصوص ۱۵ تا ۵۵ وات ساعت بر کیلوگرم و توان مخصوص بین ۱۵۰ تا ۳۵۰ وات بر کیلوگرم گزارش شده است [۱۱]. چگالی حجمی توان و چگالی حجمی انرژی برای ذخیره‌ساز مذکور به ترتیب بین ۷۵ تا ۷۰۰ کیلووات بر متر مکعب و کمتر از ۱۱۰ کیلووات ساعت بر متر مکعب می‌باشد [۱۲].

زمان شارژ ۱ تا ۲ ساعت، زمان پاسخگویی معادل چند میلی‌ثانیه، زمان دشارژ تا چند ساعت، بازه ذخیره‌سازی بین چند دقیقه تا چند روز، عمق دشارژ برابر ۱ یا ۱۰۰ درصد و دشارژ خودی بین ۰,۲ تا ۰,۳ درصد در روز از جمله مشخصات دیگر باتری‌های نیکل-کادمیم بشمار می‌روند. گستره دمایی کارکرد باتری‌های نیکل-کادمیم بین ۴۵- تا ۶۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. ولتاژ نامی متوسط هر سلول از این ذخیره‌ساز ۱,۲ ولت می‌باشد [۱۲].

بازده باتری‌های نیکل-کادمیم بین ۶۰ تا ۷۵ درصد است. تداوم این ذخیره‌ساز (شامل یک بار شارژ و دشارژ کامل) بین ۸۰۰ تا ۲۵۰۰ و طول عمر آن حداکثر ۲۰ سال می‌باشد. هزینه سرمایه‌گذاری برای این ذخیره‌ساز شامل هزینه مربوط به توان بین ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ دلار به ازای هر کیلووات و هزینه مربوط به انرژی بین ۶۰۰ تا ۲۴۰۰ دلار به ازای هر کیلووات ساعت گزارش شده است [۱۲].

فضای مورد نیاز برای ذخیره‌سازی یک کیلووات ساعت انرژی در باتری‌های نیکل-کادمیم حدود ۰,۰۳ متر مربع می‌باشد. با در نظر گرفتن پارامترهای زیاد، متوسط، کم، خیلی کم و فاقد تاثیر برای تاثیرات مخرب زیست محیطی، اثر زیست محیطی این ذخیره‌ساز "متوسط" گزارش شده است. با در نظر گرفتن امتیازهای ۱ تا ۵ برای خاصیت بازیافت بگونه‌ای که ۱ بدترین و ۵ بهترین حالت باشد، امتیاز بازیافت باتری‌های مذکور برابر "۴" خواهد بود. این باتری‌ها قابلیت کاربرد متحرک دارند [۱۸].

باتری‌های نیکل-کادمیم تقریباً ۱۰ برابر نسبت به باتری‌های سرب-اسیدی گرانتز هستند و علاوه بر این دارای اثر حافظه هستند. اثر حافظه در باتری به معنی کاهش حداکثر ظرفیت باتری و ولتاژ خروجی نامی آن است. این اثر، معلول شارژ مکرر باتری با عمق دشارژ کم است. به دلیل اثر حافظه، تجارب موفق از کاربرد باتری‌های نیکل-کادمیم در مقیاس بزرگ در صنعت برق وجود ندارد [۱۸].

۴-۵-۲-۳- کاربرد باتری‌های نیکل-کادمیم

باتری‌های Ni-Cd ممکن است بصورت جداگانه مورد استفاده قرار گیرند یا در بسته‌های باتری حاوی دو یا چند سلول مونتاژ شوند. سلول‌های کوچک برای وسایل الکترونیکی قابل حمل و اسباب‌بازی‌ها استفاده می‌شوند. هنگامی که باتری‌های Ni-Cd به جای باتری‌های غیرقابل شارژ مورد استفاده قرار می‌گیرند، ولتاژ ترمینال پایین‌تر و ظرفیت آمپر ساعت کوچکتر ممکن است عملکرد را در مقایسه با باتری‌های غیرقابل شارژ تحت تاثیر قرار دهد. باتری‌های دکمه‌ای مینیاتوری در تجهیزات عکاسی، لامپ‌های دستی (چراغ قوه یا مشعل) و غیره به طور غالب باتری‌های نیکل-کادمیم هستند [۹۲].

علاوه بر آنچه که گفته شد، باتری‌های Ni-Cd مخصوص در تلفن‌های بی سیم، روشنایی اضطراری و موارد مشابه کاربرد دارند. باتری‌های نیکل کادمیم با مقاومت نسبتاً کم در ترمینال‌های خود قادر به تامین جریان‌های بزرگ در مقاطع زمانی کوچک هستند. این مساله باعث می‌شود تا انتخاب اول برای هواپیماها، قایق‌ها و اتومبیل‌های مدل کنترل

از راه دور، ابزارهای بی سیم و فلاش دوربین عکاسی باشند. باتری استارت هواپیما، وسایل نقلیه الکتریکی و منابع تغذیه آماده بکار نیز از جمله تجهیزاتی هستند که باتری های نیکل-کادمیم در آنها کاربرد دارند [۹۲].

۴-۵-۲-۴- تاریخچه پیدایش و تکامل باتری های نیکل-کادمیم

اولین باتری Ni-Cd توسط والدمار یاگنر از سوئد در سال ۱۸۹۹ اختراع شد. در آن زمان، تنها رقیب باتری مذکور باتری سرب-اسیدی بود که از نظر فیزیکی و شیمیایی بر باتری نیکل-کادمیم برتری داشت. با پیشرفت های جزئی در نمونه های اولیه از باتری نیکل-کادمیم، انرژی مخصوص باتری های مذکور به حدود نیمی از باتری های غیر قابل شارژ رسید و از باتری های سرب-اسیدی به طرز قابل توجهی پیشی گرفت. یاگنر در ادامه تلاش کرد تا کادمیم را با آهن جایگزین نماید و به موفقیت هایی نیز دست یافت [۹۲].

توماس ادیسون در سال ۱۹۰۲ بدون اطلاع از فعالیت های یاگنر، باتری نیکل یا کبالت-کادمیم را به عنوان اختراع به ثبت رساند. ادیسون در ادامه ایده و طراحی خود را مورد بازبینی قرار داد و در همان سال باتری نیکل-آهن را به عنوان اختراع جدید در آمریکا به ثبت رساند [۹۲].

در سال ۱۹۰۶، یاگنر کارخانه ای را در نزدیکی اسکارشام سوئد تأسیس کرد تا باتری های Ni-Cd را تولید کند. در سال ۱۹۳۲، به منظور دستیابی به باتری نیکل-کادمیم با مشخصات بهتر، مواد فعال در داخل الکتروود نیکل اندود متخلخل نشانده شد اما طرح مذکور به دلایل مختلف فنی قابل استفاده نبود. تا سال ۱۹۴۶، باتری های نیکل-کادمیم باتری های جیبی با پوشش استیل بودند. در همین سال بود که طرح سال ۱۹۳۲، قابلیت تجاری شدن پیدا کرد و با بهره گیری از ایده مطرح شده، باتری های Ni-Cd با صفحات متصل ساخته و در مدت زمانی بسیار کوتاه فراگیر شد. از سال ۱۹۴۶ یا به عبارت بهتر اواسط قرن بیستم میلادی تاکنون طرح ها و ایده های مختلفی جهت طراحی و ساخت باتری های نیکل-کادمیم ارائه شده و این مساله همچنان نیز ادامه دارد هر چند که عده ای اعتقاد دارند این تکنولوژی به بلوغ کامل رسیده است [۹۲].

در حال حاضر تمام باتری های Ni-Cd از پیکربندی یا ساختار "رول سوئیسی" یا "رول" استفاده می کنند. این طرح شامل چندین لایه از مواد مثبت و منفی است که به شکل استوانه ای نورد شده اند. این طرح مقاومت داخلی باتری را کاهش می دهد و این مساله از اهمیت قابل توجهی برخوردار است [۹۲].

۴-۵-۳- باتری های نیکل-هیدرید فلز

۴-۵-۳-۱- اجزاء و نحوه عملکرد باتری های نیکل-هیدرید فلز

به اعتقاد عده ای از خبرگان و کارشناسان صنعت باتری، باتری های نیکل-متال هیدرید یا نیکل-هیدرید فلز نمونه پیشرفته باتری نیکل-هیدروژن هستند. عده ای دیگر بر این باورند که باتری های نیکل-هیدرید فلز، به منظور

جایگزینی باطری‌های نیکل-کادمیم توسعه داده شده‌اند. در حالت کلی، باطری‌های نیکل-هیدرید فلز تمامی مشخصات و ویژگی‌های فنی مثبت باطری‌های نیکل-کادمیم را دارند. ضمن آنکه اثر حافظه در آنها با شدت کمتری بروز نموده و اثرات مخرب زیست محیطی آنها نیز به مراتب کمتر است [۷۶].

در باطری‌های نیکل-هیدرید فلز، الکتروود مثبت یک الکتروود اکسید نیکل استاندارد است. هیدروژن به صورت برگشت‌پذیر به شکل هیدرید فلز ذخیره می‌شود که الکتروود منفی باطری را تشکیل می‌دهد. الکتروولیت باطری‌های نیکل-هیدرید فلز به طور معمول هیدروکسید پتاسیم و از خانواده الکتروولیت‌های آلکالین است. در این بین ممکن است از سایر ترکیبات با خواص مشابه نیز استفاده شود. یک انتخاب مناسب برای جداساز نیز می‌تواند پلی‌فین هیدروکلریک باشد [۸۹].

واکنش‌های الکتروشیمیایی دشارژ باتری نیکل-هیدرید فلز به شرح زیر است:

در کاتد:



در آنود:



پرواضح و مبرهن است که در فرایند شارژ، واکنش‌های صدرالذکر به صورت معکوس انجام می‌شوند. با جمع کردن طرفین رابطه‌های (۱۰-۴) و (۱۱-۴) با یکدیگر و حذف موارد معادل و یکسان واکنش شیمیایی کامل مربوط به باطری‌های نیکل-هیدرید فلز به صورت رابطه (۱۲-۴) می‌باشد.



در شکل (۱۲-۴) شماتیک فرایند شارژ و دشارژ باطری نیکل-هیدرید فلز به همراه اجزاء مربوطه آورده شده است.

برای فراهم کردن محیط ذخیره موثر برای هیدروژن، هیدرید باید ویژگی‌های ذیل را داشته باشد [۸۹]:

۱- ظرفیت ذخیره زیاد

۲- تشکیل و تجزیه آسان با سرعت مناسب

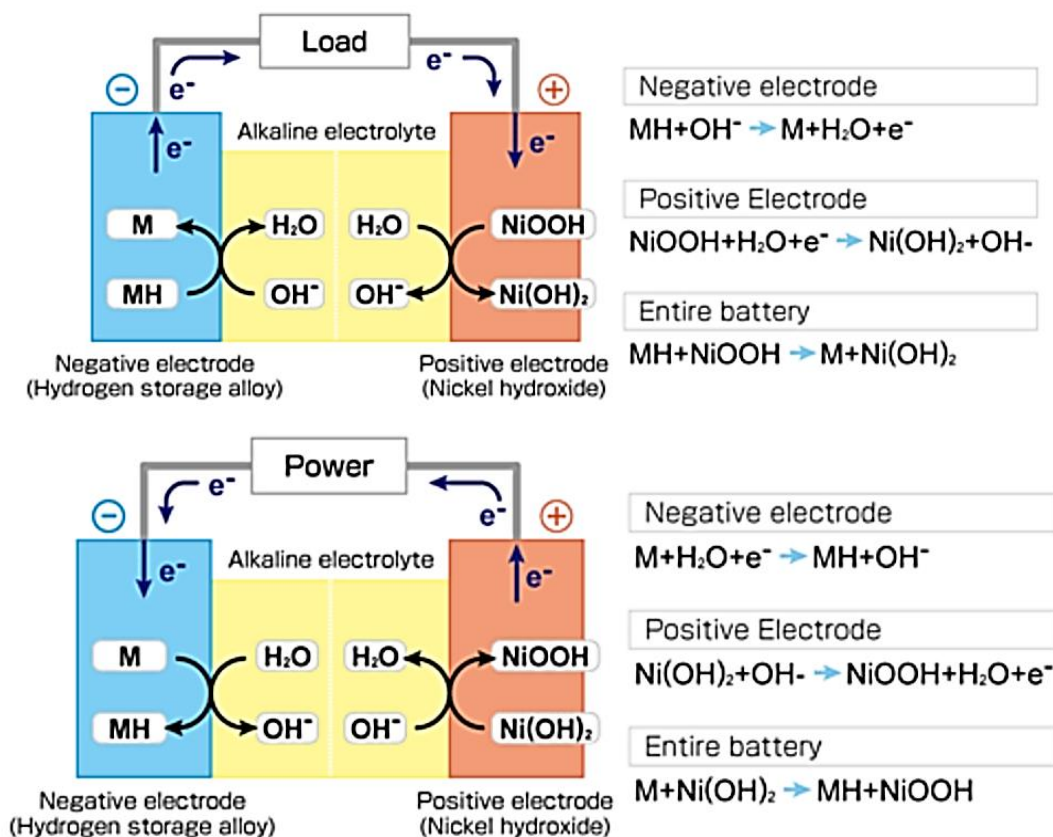
۳- قابلیت تکرار چرخه بدون تغییر مشخصات فشار و دما با پسماند اندک

۴- مقاومت مناسب در برابر خوردگی

۵- ایمنی در استفاده

۶- هزینه اندک





شکل ۴-۱۲ شماتیک باتری نیکل-هیدرید فلز و نحوه دشارژ و شارژ آن

در باتری های نیکل-هیدرید فلز اولیه از آلیاژ $LaNi_5$ به عنوان الکترود منفی استفاده می شد که هیدروژن را به صورت برگشت پذیر در دمای محیط برای تشکیل $LaNi_5H_6$ مورد استفاده قرار می داد. در نسل های بعدی این باتری ها، دو آلیاژ جدید جهت ذخیره هیدروژن مورد استفاده قرار گرفت. این دو آلیاژ عبارتند از :

۱- آلیاژ پیچیده مبتنی بر فلزات خاکی قابل اشتعال. این آلیاژ با نام AB_5 شناخته می شود که در آن A مخلوط فلزات خاکی نادر و B نیکل جایگزین شده است.

۲- آلیاژ با فرمول AB_2 که در آن A تیتانیوم یا زیرکونیوم و B همان نیکل جایگزین شده است.

ادعا شده که آلیاژ دوم ظرفیت بالاتری برای ذخیره هیدروژن دارد تا اکسیداسیون بهتر و مقاومت بیشتر در برابر خوردگی فراهم شود و کم هزینه تر باشد [۸۹].

۴-۳-۲- مشخصات و ویژگی های باتری های نیکل-هیدرید فلز

باتری های نیکل-هیدرید فلز با پیشی گرفتن از باتری های نیکل-کادمیم در مشخصات فنی قابل قبول، رقیب جدی برای باتری های لیتیم-یونی بشمار می روند. کاربردها و آزمایشات مختلف نشان می دهد باتری های نیکل-هیدرید فلز مقاوم تر از باتری های لیتیم-یونی هستند و در برخی موارد مشخصات به مراتب بهتری دارند.

برای باتری‌های نیکل-هیدرید فلز بازه توان کمتر از ۳ مگاوات، بازه انرژی حداکثر تا ۵۰۰ کیلووات ساعت، انرژی مخصوص ۶۰ تا ۸۰ وات ساعت بر کیلوگرم و توان مخصوص بین ۱۵۰ تا ۴۶۰ وات بر کیلوگرم گزارش شده است [۱۱]. چگالی حجمی توان و چگالی حجمی انرژی برای ذخیره‌ساز مذکور به ترتیب بین ۵۰۰ تا ۳۰۰۰ کیلووات بر متر مکعب و کمتر از ۳۵۰ کیلووات ساعت بر متر مکعب می‌باشد [۱۲].

زمان شارژ ۲ تا ۴ ساعت، زمان پاسخگویی معادل چند میلی‌ثانیه، زمان دشارژ تا چند ساعت، بازه ذخیره‌سازی بین چند دقیقه تا چند روز، عمق دشارژ برابر ۱ یا ۱۰۰ درصد و دشارژ خودی بین ۰,۴ تا ۱,۲ درصد در روز از جمله مشخصات دیگر باتری‌های نیکل-هیدرید فلز بشمار می‌روند. گستره دمایی کارکرد باتری‌های نیکل-کادمیم بین ۲۰- تا ۴۵ درجه سانتیگراد می‌باشد. ولتاژ نامی متوسط هر سلول از این ذخیره‌ساز ۱,۲ ولت می‌باشد [۱۲].

بازده باتری‌های نیکل-هیدرید فلز بین ۷۰ تا ۸۰ درصد است. تداوم این ذخیره‌ساز (شامل یک بار شارژ و دشارژ کامل) بین ۸۰۰ تا ۳۰۰۰ و طول عمر آن حداکثر ۱۰ سال می‌باشد. هزینه سرمایه‌گذاری برای این ذخیره‌ساز ۱,۲ برابر هزینه مربوط به باتری‌های نیکل-کادمیم است [۱۲].

فضای مورد نیاز برای ذخیره‌سازی یک کیلووات ساعت انرژی در باتری‌های نیکل-هیدرید فلز حدود ۰,۰۲ متر مربع می‌باشد. با در نظر گرفتن پارامترهای زیاد، متوسط، کم، خیلی کم و فاقد تاثیر برای تاثیرات مخرب زیست محیطی، اثر زیست محیطی این ذخیره‌ساز "کم" گزارش شده است. با در نظر گرفتن امتیازهای ۱ تا ۵ برای خاصیت بازیافت گونه‌ای که ۱ بدترین و ۵ بهترین حالت باشد، امتیاز بازیافت باتری‌های مذکور برابر "۴" خواهد بود. این باتری‌ها قابلیت کاربرد متحرک دارند [۱۸].

۴-۵-۳- کاربرد باتری‌های نیکل-هیدرید فلز

با توجه به جایگزینی باتری‌های نیکل-کادمیم با باتری‌های نیکل-هیدرید فلز، باتری‌های نیکل-هیدرید فلز به طور گسترده در وسایل نقلیه پلاگین، خودروهای هیبریدی، روبات‌ها، ابزار برقی، تلفن‌های همراه، روشنایی اضطراری، رایانه‌ها، لپ‌تاپ، تلفن‌های بی‌سیم، اسباب بازی‌ها، چراغ قوه، چاپگرهای قابل حمل، سیستم‌های GPS و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند و این استفاده در حال افزایش است [۹۳].

۴-۵-۳- تاریخچه پیدایش و تکامل باتری‌های نیکل-هیدرید فلز

کار روی باتری‌های Ni-MH پس از اختراع این فناوری در سال ۱۹۶۷ در مرکز تحقیقات Battelle-Geneva آغاز شد. تحقیق و توسعه در خصوص باتری‌های مذکور نزدیک به دو دهه توسط شرکت‌های بنز و فولکس واگن تامین مالی شد. طی این دو دهه، اختراعات متنوعی از باتری‌های نیکل-هیدرید فلز به ثبت رسید که در آنها انرژی خاص باتری‌های نیکل-هیدرید فلز به ۵۰ وات ساعت بر کیلوگرم، توان خاص در بهترین نمونه به ۵۰۰ وات بر کیلوگرم و تداوم به ۵۰۰ می‌رسید [۹۴].

در دهه ۱۹۷۰، تلاش ها جهت جایگزینی باتری های نیکل- هیدروژن با نمونه های بهتر به منظور استفاده در فعالیت های فضایی، کمک قابل توجهی به توسعه فناوری های مرتبط با باتری های نیکل- متال هیدرید کرد. در واقع فناوری هیدرید به عنوان فناوری جایگزین مورد استقبال بیشتری قرار گرفت. تحقیقات انجام شده توسط آزمایشگاه های فیلپس و CNRS فرانسه منجر به تولید آلیاژهای جدید شامل فلزات خاکی کمیاب برای الکتروده منفی در باتری های نیکل- هیدرید فلز شد. است. ناپایداری آلیاژهای مذکور در الکترولیت قلیایی و به تبع آن تداوم کم هنوز به عنوان یک نقصان مطرح بود. در سال ۱۹۸۷، Willems و Buschow با استفاده از فلزات خاکی کمیاب یک نمونه باتری نیکل- متال هیدرید ساختند که پس از ۴۰۰۰ چرخه شارژ و دشارژ، ۸۴٪ از ظرفیت شارژ خود را حفظ می کرد. در ادامه آلیاژهای جدیدی کشف و ساخته شد که استفاده از آنها در باتری های نیکل- متال هیدرید توجیه اقتصادی داشت. باتری های Ni-MH مدرن با استفاده از این مواد ساخته شد. اولین باتری های Ni-MH برای مصرف کنندگان در سال ۱۹۸۹ به صورت تجاری در دسترس قرار گرفت [۹۴].

از ابتدای سال های دهه ۹۰ استفاده از باتری های نیکل- متال هیدرید به شدت توسعه یافت. در سال ۱۹۹۸، شرکت باتری سازی Avonic ساختار و ترکیب آلیاژهای مورد استفاده در باتری های نیکل- هیدرید فلز را بهبود بخشید و باتری های جدیدی ارائه نمود [۹۴].

در سال ۲۰۰۸، بیش از دو میلیون اتومبیل هیبریدی در سرتاسر جهان با باتری های Ni-MH تولید شدند. در اتحادیه اروپا از سال ۲۰۱۰ به بعد، باتری های نیکل- هیدرید فلز جایگزین باتری های Ni-Cd برای مصرف قابل حمل شدند [۹۴]. در سال ۲۰۱۵ شرکت BASF آلمان ساختار اصلاح شده ای از باتری های Ni-MH با تداوم بالا ارائه کرد که باعث کاهش وزن قابل توجه باتری های نیکل- هیدرید فلز شد. انرژی مخصوص این باتری ها تا ۱۴۰ وات ساعت در کیلوگرم گزارش شده است [۹۴].

۴-۵-۴- باتری های دما بالا یا باتری های بتا سدیم

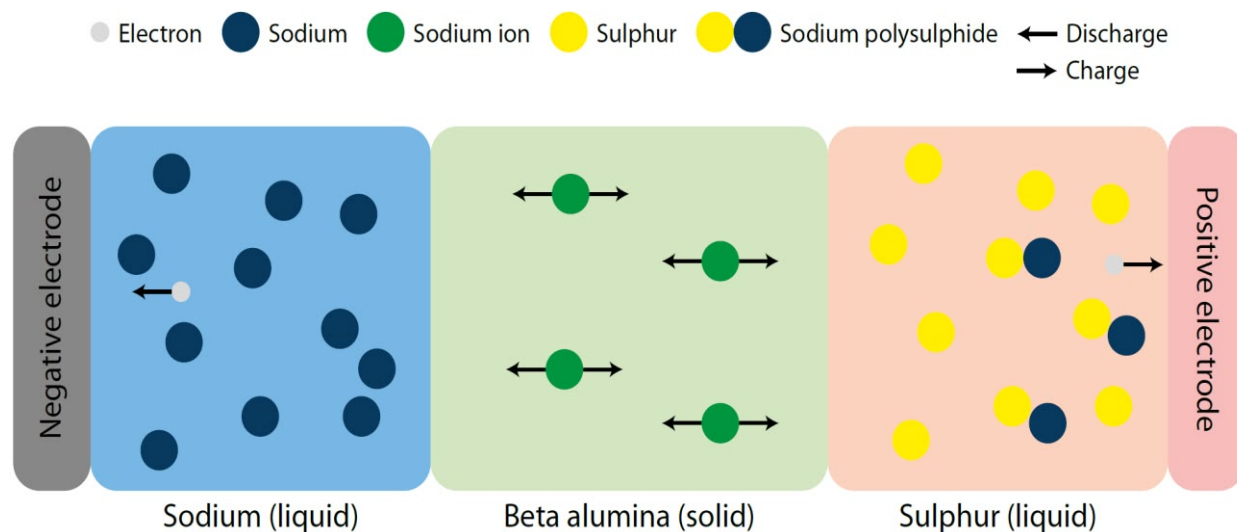
در صنعت ساخت باتری، سدیم جذابیت های زیادی به عنوان الکتروده منفی دارد. از یک طرف، نمک های سدیم در طبیعت فراوان بوده و غیر سمی هستند و فلز نیز به آسانی استخراج می شود و ارزان است. از طرف دیگر، سولفور یا همان گوگرد و عناصر مشابه که می توانند به عنوان الکتروده مثبت بکار روند، فراوان و تا حدی ارزان هستند. این ویژگی ها موجب شده ساخت باتری های ثانویه (قابل شارژ) از سدیم همواره مورد توجه باشد [۶۱].

در باتری های دما بالا یا بتا سدیم، سدیم یا به عبارت بهتر یون های سدیم بین الکترودها رد و بدل می شود. برای ایجاد تبادل مذکور ایجاد دمای بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتیگراد در باتری در دو فاز شارژ و دشارژ الزامی است. به همین دلیل باتری های بتا سدیم باطری های دما بالا نیز خوانده می شوند. در واقع دمای بالا لازم است تا مواد فعال در هر دو الکتروده باتری در حالت مایع باقی بمانند. انتقال یون های سدیم از طریق یک ماده سرامیکی به نام بتا آلومینا صورت

می‌پذیرد. بتا آلومینا یک عایق الکتریکی است اما رسانایی یونی زیادی برای یون‌های سدیم در دمای بیشتر از ۳۰۰ درجه سانتیگراد دارد. ماده مذکور یک اکسید آلومینیوم سدیم با ساختار کریستالی پیچیده است و در حالت کلی با فرمول β - Al_2O_3 شناخته می‌شود که در آن β می‌تواند ساختارهای متفاوت از جمله Na_2O_5 باشد. یک غشای ضخیم از بتا آلومینا به عنوان الکترولیت در باتری‌های دما بالا استفاده می‌شود. این ماده نقش جداساز را نیز دارد و ایزولاسیون الکتریکی بین الکترودها ایجاد می‌کند. آند مورد استفاده در باتری‌های دما بالا سدیم مذاب است. کاتد می‌تواند سولفور مذاب یا کلرید نیکل (NiCl_2) و یا حتی مخلوطی از کلرید نیکل و کلرید آهن (FeCl_2) باشد. استفاده از دو ماده مذکور به عنوان کاتد موجب دسته‌بندی باتری‌های بتا سدیم در دو گروه باتری‌های سدیم-سولفور و باتری‌های سدیم-فلز-کلرید شده است. در ادامه به معرفی هر یک از این باتری‌ها پرداخته می‌شود [۶۱].

۴-۵-۱- اجزاء و نحوه عملکرد باتری‌های سدیم-سولفور

در باتری‌های سدیم-سولفور از گوگرد مذاب در حالت مایع به عنوان کاتد، از سدیم مایع به صورت مذاب به عنوان آند و از سرامیک بتا آلومینا به عنوان الکترولیت و جداساز استفاده می‌شود. شماتیک این باتری و نحوه کار آن در شکل (۴-۱۳) نشان داده شده است [۶۱].



شکل ۴-۱۳: شماتیک فرایندهای شیمیایی مربوط به باتری سدیم-سولفور در دو حالت شارژ و دشارژ

در حالت دشارژ، قرار گرفتن واسط سدیم (Na) در کنار بتا آلومینا موجب اکسیداسیون سدیم مذاب و تولید یون‌های سدیم می‌شود. یون‌های سدیم از طریق الکترولیت سرامیکی جامد (بتا آلومینا) عبور می‌کنند و با گوگرد در آند ترکیب شده و در نتیجه پلی سولفید سدیم (Na_2S_5) تشکیل می‌شود. این فرایند در حالت شارژ به صورت معکوس رخ می‌دهد [۱۱].

واکنش‌های الکتروشیمیایی دشارژ باتری سدیم-سولفور به شرح زیر است:

در کاتد :



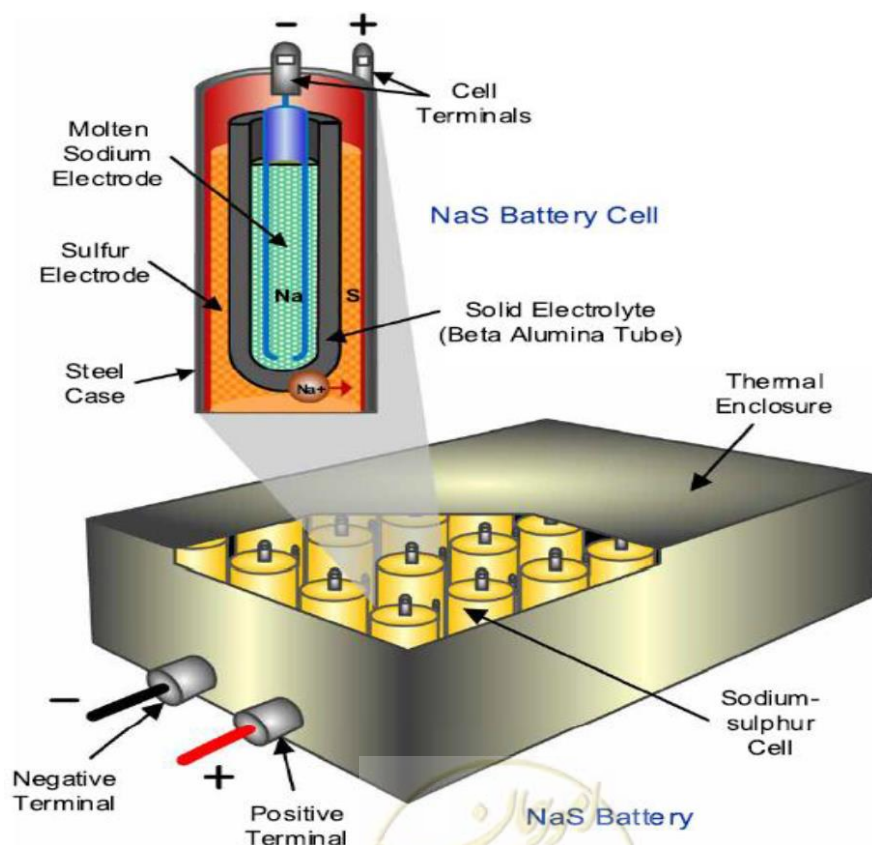
در آند :



پرواضح و مبرهن است که در فرایند شارژ، واکنش های صدرالذکر به صورت معکوس انجام می شوند. با جمع کردن طرفین رابطه های (۱۳-۴) و (۱۴-۴) با یکدیگر و حذف موارد معادل و یکسان واکنش شیمیایی کامل مربوط به باتری های سدیم- سولفور به صورت رابطه (۱۵-۴) می باشد.



در باتری های سدیم- سولفور همواره باید مراقبت های لازم در جهت حفظ میزان سدیم در مقایسه با پلی سولفید سدیم لحاظ گردد. در غیر این صورت پلی سولفید سدیم نامحلول در الکترولیت تشکیل می شود که این مساله عملکرد باتری را به طرز قابل توجهی تحت تاثیر قرار خواهد داد. باتری های سدیم- سولفور به طور معمول مطابق شکل (۱۴-۴) به حالت استوانه ای تولید شده و سپس این سلول ها در محفظه عایقی قرار گرفته و ترمینال های مثبت و منفی جهت استفاده از مجموعه در اختیار مصرف کننده قرار می گیرد [۱۲].



شکل ۱۴-۴: شماتیک باتری سدیم- سولفور به تفکیک اجزاء به همراه مجموعه مربوطه جهت استفاده

۴-۵-۴-۲- مشخصات و ویژگی‌های باتری‌های سدیم-سولفور

برای باتری‌های سدیم-سولفور بازه توان کمتر از ۵۰ مگاوات، بازه انرژی حداکثر تا ۲۴۵ مگاوات ساعت، انرژی مخصوص ۱۵۰ تا ۲۴۰ وات ساعت بر کیلوگرم و توان مخصوص بین ۹۰ تا ۲۳۰ وات بر کیلوگرم گزارش شده است [۱۱]. چگالی حجمی توان و چگالی حجمی انرژی برای ذخیره‌ساز مذکور به ترتیب بین ۱۲۰ تا ۱۶۰ کیلووات بر متر مکعب و کمتر از ۴۰۰ کیلووات ساعت بر متر مکعب می‌باشد [۱۲].

زمان شارژ تا ۹ ساعت، زمان پاسخگویی معادل چند میلی‌ثانیه، زمان دشارژ تا کمتر از ۷ ساعت، بازه ذخیره‌سازی بین چند دقیقه تا چند روز، عمق دشارژ برابر ۱ یا ۱۰۰ درصد و دشارژ خودی بین ۰,۵ تا ۱ درصد در روز از جمله مشخصات دیگر باتری‌های سدیم-سولفور بشمار می‌روند. ولتاژ نامی متوسط هر سلول از این ذخیره‌ساز ۲,۱ ولت می‌باشد [۱۲].

بازده باتری‌های سدیم-سولفور بین ۷۵ تا ۹۰ درصد است. تداوم این ذخیره‌ساز (شامل یک بار شارژ و دشارژ کامل) بین ۲۵۰۰ تا ۴۰۰۰ و طول عمر آن حداکثر ۱۵ سال می‌باشد. هزینه سرمایه‌گذاری برای این ذخیره‌ساز شامل هزینه مربوط به توان بین ۳۲۰۰ تا ۴۰۰۰ دلار به ازای هر کیلووات و هزینه مربوط به انرژی بین ۳۰۰ تا ۵۰۰ دلار به ازای هر کیلووات ساعت گزارش شده است [۱۲].

فضای مورد نیاز برای ذخیره‌سازی یک کیلووات ساعت انرژی در باتری‌های سدیم-سولفور حدود ۰,۰۲ متر مربع می‌باشد. با در نظر گرفتن پارامترهای زیاد، متوسط، کم، خیلی کم و فاقد تاثیر برای تاثیرات مخرب زیست محیطی، اثر زیست محیطی این ذخیره‌ساز "خیلی کم" گزارش شده است. با در نظر گرفتن امتیازهای ۱ تا ۵ برای خاصیت بازیافت گونه‌ای که ۱ بدترین و ۵ بهترین حالت باشد، امتیاز بازیافت باتری‌های مذکور برابر "۵" خواهد بود. این باتری‌ها قابلیت کاربرد متحرک دارند [۱۸].

با در نظر گرفتن سطوح خوب، معمولی و ضعیف برای شاخص‌های مقیاس‌پذیری و ایمنی و سطوح زیاد، متوسط و کم برای شاخص انعطاف‌پذیری، باتری‌های سدیم-سولفور در شاخص اول در سطح معمولی، در شاخص دوم در سطح متوسط و در شاخص آخر در سطح متوسط قرار می‌گیرد [۱۹].

انرژی مخصوص باتری‌های سدیم-سولفور در مقایسه با باتری‌های سرب-اسیدی و باتری‌های جریانی به مراتب بیشتر است و هم رده با باتری‌های لیتیم-یونی قرار می‌گیرد. از دیگر مزایای باتری‌های سدیم-سولفور می‌توان به دشارژ خودی بسیار کم و تداوم بهتر (در مقایسه با باتری‌های سرب-اسیدی و نیکل-کادمیم) اشاره کرد. استفاده از مواد غیرسمی و نرخ بالای بازیافت برابر با ۹۹ درصد از جمله مزایای دیگر باتری‌های سدیم-سولفور بشمار می‌رود [۱۸].

نکته قابل توجه در خصوص باتری‌های سدیم-سولفور بازه دمایی کارکرد آنهاست. برای داشتن عملکرد بهینه این دما باید بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتیگراد حفظ شود که کارچندان آسانی نیست. ایجاد دمای مذکور با استفاده از عایق‌های حرارتی پیشرفته و هیتر برقی انجام می‌شود. علاوه بر این باتری‌های سدیم-سولفور از مقاومت داخلی بالای برخوردار بوده و از فرسایش شدید در کاتد رنج می‌برند. علاوه بر موارد صدرالذکر چالش‌های ویژه‌ای در خصوص طراحی، ساخت و بکارگیری باتری‌های سدیم-سولفور وجود دارد. عمده این چالش‌ها عبارتند از :

- ۱- پیچیدگی ساختار سرامیکی بتا آلومینا و مشخصات خاص آن
- ۲- درزبندی باطری و اجزای آن
- ۳- خوردگی محفظه باطری
- ۴- خلوص سدیم بکار رفته
- ۵- ملاحظات ایمنی و بخصوص واکنش شیمیایی شدید سدیم مذاب و سولفور در صورتی که تیوب الکترولیت دچار شکست شود [۹۵].

۴-۵-۴-۳- کاربردهای باطری های سدیم- سولفور

با توجه به مشخصات و ویژگی های باطری های سدیم- سولفور، این باطری ها بهترین گزینه برای کاربردهای ثابت ذخیره سازی هستند.

باتری های NaS می توانند برای پشتیبانی از شبکه برق یا شبکه های الکتریکی مبتنی بر انرژی های تجدیدپذیر که مستقل از شبکه هستند بکار روند. حدفصل سال های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۰ از باطری های NaS به منظور پایداری سیستم های برق بادی و خورشیدی استفاده شد. در سال ۲۰۱۰، شرکت Presidio در ایالت تگزاس آمریکا بزرگترین باتری سدیم- سولفور جهان را ساخت که به تنهایی قادر به تامین ۴ مگاوات برق به مدت هشت ساعت می باشد. از باتری های NaS همچنین می توان به منظور پیک سایی و تنظیم ولتاژ استفاده کرد [۹۶].

باتری های NaS همچنین برای کاربردهای فضایی نیز پیشنهاد شده اند. نتایج بکارگیری این باطری ها در مأموریت های فضایی موفقیت آمیز بوده است [۹۷].

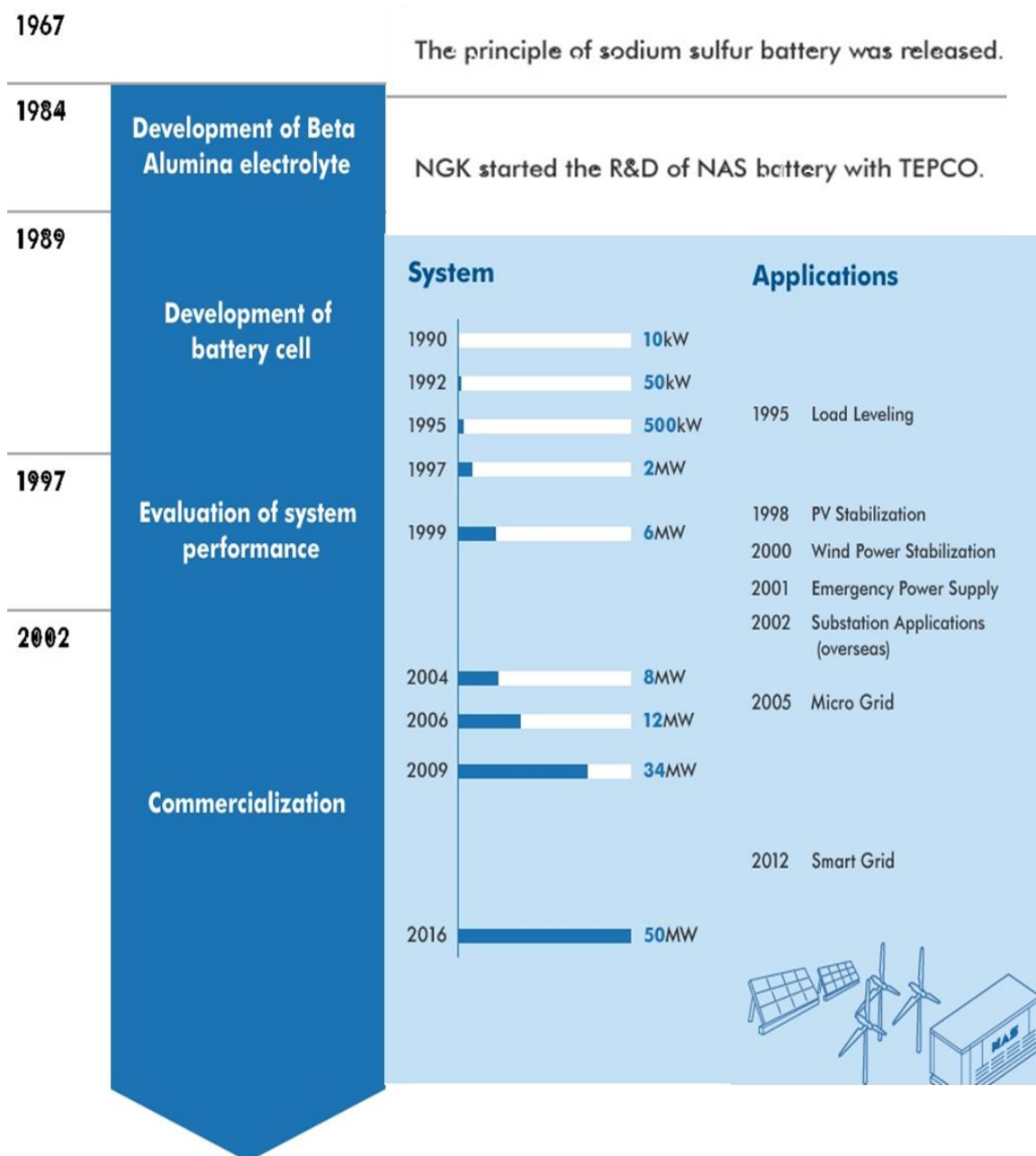
۴-۵-۴-۴- تاریخچه پیدایش و تکامل باطری های سدیم- سولفور

برای اولین بار ایده طراحی و ساخت باطری سدیم- سولفور در سال های ابتدایی دهه ۶۰ میلادی و در شرکت FORD آمریکا شکل گرفت. در سال ۱۹۶۶، متخصصان شرکت مذکور موفق به کشف ماده سرامیکی شدند که یک عایق الکتریکی بود اما رسانایی یونی زیادی برای یون های سدیم در دمای بیشتر از ۳۰۰ درجه سانتیگراد داشت. این ماده همان بتا آلومینا بود که مهمترین جزء باطری سدیم- سولفور بشمار می رود. در ادامه این ژاپنی ها بودند که فعالیت های عمده ای در زمینه طراحی، ساخت و تجاری سازی باطری های سدیم- سولفور انجام دادند. در سال ۱۹۸۴، شرکت NGK (شرکت ژاپنی سازنده عایق) و شرکت برق توکیو فعالیت های مشترکی را در زمینه طراحی و ساخت باطری های سدیم- سولفور آغاز کردند. فعالیت های آغازین در خصوص توسعه و تولید بتا آلومینا بود که در سال ۱۹۸۸ نتیجه داد [۹۸].

سال ۱۹۸۹، شرکت های مختلفی در سراسر جهان تحقیق و توسعه بر روی باطری های سدیم- سولفور را آغاز کردند. حدفصل سال های ۱۹۸۹ تا ۱۹۹۷ طراحی، ساخت و بکارگیری باطری های سدیم- سولفور مورد توجه ویژه قرار گرفت و اولین نمونه با ظرفیت ۱۰ کیلووات در سال ۱۹۹۰ ساخته شد. در سال ۱۹۹۵ یک باطری سدیم- سولفور به ظرفیت

۵۰۰ کیلووات به منظور متعادل‌سازی بار و تولید مورد استفاده قرار گرفت. حداثال سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۲، عملکرد باطری‌های سدیم- سولفور پیشرفت قابل ملاحظه‌ای نمود. در سال ۱۹۹۸، باطری سدیم- سولفور به منظور پایدارسازی سیستم‌های فتوولتائیک مورد استفاده قرار گرفت. در سال ۲۰۰۰، باطری‌های مذکور به عنوان پایدارساز مزارع بادی مورد استفاده قرار گرفتند. در سال ۲۰۰۱، برای اولین بار تامین برق اضطراری به این ذخیره‌ساز انرژی سپرده شد. در سال ۲۰۰۲، از باطری‌های سدیم- سولفور به منظور تامین برق در ایستگاه‌های دورافتاده و با فاصله زیاد از شبکه استفاده شد. در همین سال تکنولوژی مذکور تجاری شد. در سال ۲۰۰۵ و ۲۰۱۲ به ترتیب باطری سدیم- سولفور در ریزشکه و شبکه هوشمند نمونه مورد آزمایش قرار گرفت که نتایج آن مثبت بود. در حال حاضر بیشترین ظرفیت بکار گرفته شده از این تکنولوژی ۵۰ مگاوات می‌باشد. تحقیق و توسعه بر روی باطری‌های سدیم- سولفور از آن همچنان ادامه دارد و بواسطه چالش‌هایی که قبلا ذکر شد هنوز این تکنولوژی به بلوغ کامل نرسیده است. شکل (۴-۱۵) روند توسعه و پیشرفت باطری‌های سدیم- سولفور به همراه کاربرد و ظرفیت سیستم‌های ساخته شده از آن طی سال‌های ۱۹۶۷ تا ۲۰۱۶ را نشان می‌دهد [۹۸].





شکل ۴-۱۵: روند توسعه و پیشرفت باتری های سدیم- سولفور به همراه کاربرد و ظرفیت های ساخته شده از آن طی سال های ۱۹۶۷ تا ۲۰۱۶

۴-۵-۴ اجزاء و نحوه عملکرد باتری های سدیم- فلز- کلرید

باتری های سدیم- فلز- کلرید با فرمول شیمیایی Na-MeCl_2 که تحت عنوان باتری های ZEBRA^۱ نیز شناخته می شوند از لحاظ ساختاری و عملکردی مشابه باتری های سدیم- سولفور هستند. تفاوت عمده، در استفاده از کلرید فلزی فعال متخلخل نیمه جامد (MeCl_2) در کاتد به جای گوگرد همراه با الکترولیت ثانویه سدیم تترا کلرید آلومینیوم

^۱ Originally "Zeolite Battery Research Africa Project" later "Zero Emissions Batteries Research Activity"

مذاب (NaAlCl_4) است. کلرید فلزی می‌تواند NiCl_2 ، FeCl_2 یا Ni-FeCl_2 باشد. این تفاوت موجب می‌شود دمای کار باطری به به ۲۷۰ درجه سانتیگراد کاهش یابد. ضمن آنکه تعمیر و نگهداری باطری آسانتر شود [۶۱].

در حالت دشارژ، یون‌های سدیم از طریق بتا آلومینا و NaAlCl_4 مذاب به کاتد منتقل می‌شوند. آنچه در کاتد رخ می‌دهد موجب تشکیل فلز (به عنوان مثال Ni) و NaCl می‌شود. این روند در حین شارژ با اکسیداسیون فلز قابل برگشت است. در واقع در حین شارژ فلز واسطه (به عنوان مثال Ni) در کنار Cl قرار می‌گیرد و فلز اصلی (Na) نتیجه واکنش است [۶۱].

واکنش‌های الکتروشیمیایی دشارژ باتری سدیم-نیکل کلرید به شرح زیر است:

در کاتد:



در آند:



پرواضح و مبرهن است که در فرایند شارژ، واکنش‌های صدرالذکر به صورت معکوس انجام می‌شوند. با جمع کردن طرفین رابطه‌های (۱۳-۴) و (۱۴-۴) با یکدیگر و حذف موارد معادل و یکسان واکنش شیمیایی کامل مربوط به باطری سدیم-نیکل کلرید به صورت رابطه (۱۵-۴) می‌باشد.

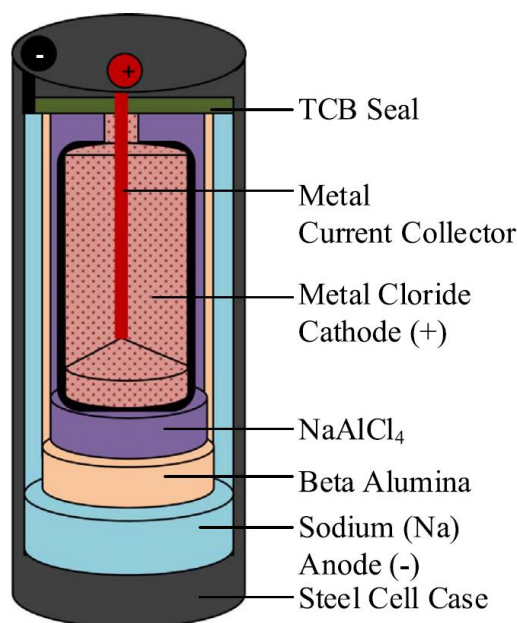


باطری‌های سدیم-فلز-کلرید از لحاظ برخی ویژگی‌های فنی بر باطری‌های سدیم-سولفور برتری داشته، ضمن آنکه اقتصادی‌تر نیز هستند و کاربردهای آنها متنوع‌تر است. شماتیک یک باطری نمونه باطری ZEBRA در شکل (۱۶-۴) آورده شده است. در شکل مذکور منظور از TCB Seal عایق حرارتی سرامیکی یا فلزی می‌باشد [۶۱].

۴-۵-۴-۶- مشخصات و ویژگی‌های باطری‌های سدیم-فلز-کلرید

انرژی مخصوص باطری‌های سدیم-فلز-کلرید در مقایسه با باطری‌های سدیم-سولفور بیشتر است لکن تفاوت مذکور زیاد نیست. فرسایش کمتر قطعات و قابلیت تاب‌آوری بیشتر در برابر اضافه شارژ و اضافه دشارژ در مقایسه با باطری سدیم-سولفور از جمله مزایای دیگر این گونه باطری‌ها بشمار می‌رود. ضمن آنکه تجربیات مربوط به آزمایشات و کاربردهای این باطری‌ها نشان داده که ذخیره‌ساز مذکور در تمام شرایط استفاده مناسب و غیرمناسب ایمن هستند. به عنوان مثال اگر تیوب الکترولیت ترک بردارد، سدیم مذاب ابتدا با الکترولیت کمکی (NaAlCl_4) واکنش می‌دهد و بنابر این مشکل خاصی بوجود نمی‌آید و حتی باطری با حفظ شرایطی قادر است به کار خود ادامه دهد [۹۹].





شکل ۴-۱۶: شماتیک یک نمونه باطری ZEBRA به همراه اجزای آن

برای باطری های سدیم- فلز-کلرید بازه توان بین ۵ کیلووات تا ۱ مگاوات، بازه انرژی حداکثر تا ۵ مگاوات ساعت، انرژی مخصوص ۸۶ تا ۱۴۰ وات ساعت بر کیلوگرم و توان مخصوص بین ۱۸۰ تا ۲۴۵ وات بر کیلوگرم گزارش شده است [۱۱]. چگالی حجمی توان و چگالی حجمی انرژی برای ذخیره ساز مذکور به ترتیب بین ۲۵۰ تا ۲۷۰ کیلووات بر متر مکعب و بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ کیلووات ساعت بر متر مکعب می باشد [۱۲].

زمان شارژ تا ۶ ساعت، زمان پاسخگویی معادل چند میلی ثانیه، زمان دشارژ از چند ثانیه تا چند ساعت، بازه ذخیره سازی بلند مدت، عمق دشارژ برابر ۱ یا ۱۰۰ درصد و دشارژ خودی کمتر از ۰,۰۵ درصد در روز از جمله مشخصات دیگر باطری های سدیم- فلز-کلرید بشمار می روند. ولتاژ نامی متوسط هر سلول از این ذخیره ساز ۲,۵۸ ولت می باشد [۱۲].

بازده باطری های سدیم- فلز-کلرید حداکثر ۹۰ درصد است. تداوم این ذخیره ساز (شامل یک بار شارژ و دشارژ کامل) بین ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰ و طول عمر آن حداکثر ۱۵ سال می باشد. هزینه سرمایه گذاری برای این ذخیره ساز شامل هزینه مربوط به توان بین ۱۵۰ تا ۳۰۰ دلار به ازای هر کیلووات و هزینه مربوط به انرژی بین ۲۳۰ تا ۳۴۵ دلار به ازای هر کیلووات ساعت گزارش شده است [۱۲].

فضای مورد نیاز برای ذخیره سازی یک کیلووات ساعت انرژی در باطری های سدیم- فلز-کلرید حدود ۰,۰۳ متر مربع می باشد. با در نظر گرفتن امتیازهای ۱ تا ۵ برای خاصیت بازیافت بگونه ای که ۱ بدترین و ۵ بهترین حالت باشد، امتیاز بازیافت باطری های مذکور برابر "۵" خواهد بود. این باطری ها قابلیت کاربرد متحرک دارند [۱۸].

با در نظر گرفتن سطوح خوب، معمولی و ضعیف برای شاخص‌های مقیاس‌پذیری و ایمنی و سطوح زیاد، متوسط و کم برای شاخص انعطاف‌پذیری، باتری‌های سدیم-فلز-کلرید در شاخص اول در سطح معمولی، در شاخص دوم در سطح متوسط و در شاخص آخر در سطح متوسط قرار می‌گیرد [۱۹].

نکته قابل توجه در خصوص باتری‌های سدیم-فلز-کلرید بازه دمایی کارکرد آنهاست. برای داشتن عملکرد بهینه، این دما باید بین ۲۷۰ تا ۳۵۰ درجه سانتیگراد حفظ شود که کارچندان آسانی نیست ولی به مراتب ساده‌تر از باتری‌های سدیم-سولفور است. ایجاد دمای مذکور با استفاده از عایق‌های حرارتی پیشرفته و هیتر برقی انجام می‌شود. برای باتری‌های مذکور سیستم مدیریت گرمایی خاصی طراحی می‌شود. بزرگترین عیب باتری ZEBRA، تولید محدود آن در چند شرکت در سراسر جهان است [۱۰۰].

۴-۵-۴- کاربرد باتری‌های سدیم-فلز-کلرید

باتری‌های سدیم-فلز-کلرید به دلیل چگالی انرژی قابل قبول، ایمنی بیشتر و سایر مشخصات فنی برتر (به ویژه در مقایسه با باتری‌های سدیم-سولفور) گزینه مناسبی برای استفاده در وسایل نقلیه برقی شامل خودرو، ون و اتوبوس‌های برقی هستند [۶۱].

استفاده از باتری‌های سدیم-فلز-کلرید در ساختمان‌های مسکونی و تجاری به منظور ماکزیمم نمودن خودمصرفی برق تولید شده توسط سیستم‌های فتولتائیک مقیاس کوچک رو به گسترش است. از باتری‌های سدیم-فلز-کلرید همچنان می‌توان به عنوان منابع تغذیه بدون وقفه استفاده کرد. باتری‌های مذکور می‌توانند در پیک‌سایه نیز مورد استفاده قرار گیرند. پشتیبانی از شبکه‌های مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر و شبکه‌های هوشمند از جمله نقش‌هایی است که می‌توان برای باتری‌های سدیم-فلز-کلرید در نظر گرفت. با افزایش ریز شبکه‌ها پیش بینی می‌شود پشتیبانی این شبکه‌ها در دو حالت متصل و مجزا از شبکه نیز به باتری‌های سدیم-فلز-کلرید واگذار شود [۶۱].

۴-۵-۴- تاریخچه پیدایش و تکامل باتری‌های سدیم-فلز-کلرید

اولین نمونه از باتری‌های سدیم-فلز-کلرید (سدیم-نیکل کلرید) در سال ۱۹۸۵ توسط گروه ZEBRA در^۱ CSIR کشور آفریقای جنوبی در شهر پرتوریا طراحی و ساخته شد. از همان زمان تاکنون، ساخت باتری‌های مذکور به صورت انحصاری دنبال شده و تغییرات شرکت‌های تولید کننده با توجه به خریداری یک شرکت توسط شرکت‌های بزرگتر یا خرید امتیاز فنی مربوطه صورت پذیرفته است [۱۰۱].

در حال حاضر شرکت FIAMM Sonick و شرکت‌های وابسته به آن، میراث‌دار امتیاز فنی اولیه باتری‌های سدیم-نیکل کلرید و تنها تولید کننده تجاری آن بشمار می‌روند. شرکت‌های بزرگ دیگری نیز در این حوزه ورود کرده‌اند لکن این ورود با موفقیت همراه نبوده است. به عنوان مثال شرکت جنرال الکتریک در سال ۲۰۱۰، پروژه‌ای را جهت دستیابی

^۱ Council for Scientific and Industrial Research

به تکنولوژی باطری سدیم- نیکل کلرید با طول عمر حداقل ۲۰ سال و سایر مشخصات فنی قابل قبول آغاز کرد اما در سال ۲۰۱۵، پروژه بدون دستیابی به نتایج قابل قبول، نیمه کاره رها شد [۱۰۱].

۴-۶- مقایسه انواع باطری ها

مشخصات فنی و اقتصادی انواع باطری ها که در قسمت های قبلی به آنها پرداخته شد در جدول (۴-۱) آورده شده است.

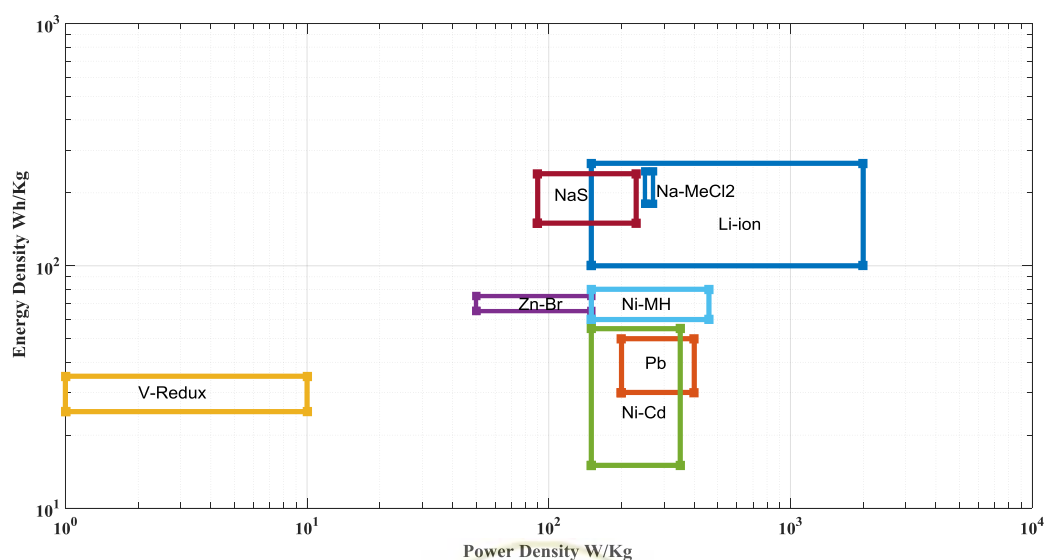
جدول ۴-۱: مشخصات فنی و اقتصادی انواع باطری ها

مشخصات		نوع باطری	لیتیم یونی	سرب- اسیدی	جریانی		پایه نیکل		دما بالا	
					وانادیومی	روی- بروم	نیکل- کادمیم	نیکل- هیدرید فلز	سدیم- سولفور	سدیم- فلز- کلرید
بازه توان (مگاوات)			۰.۰۵-۱۰	≤۲۰	۰.۰۱-۱۰	۰.۰۲-۱۰	≤۴۰	≤۳	≤۵۰	۰.۰۰۵-۱
بازه انرژی (مگاوات ساعت)			۰.۰۵-۲.۵	۱۸-۱۰۰	۰.۰۱-۱۰	۰.۰۵-۵	≤۷	≤۰.۵	≤۲۴۵	≤۵
انرژی مخصوص (وات ساعت بر کیلوگرم)			۱۰۰-۲۶۵	۳۰-۵۰	۲۵-۳۵	۶۵-۷۵	۱۵-۵۵	۶۰-۸۰	۱۵۰-۲۴۰	۸۶-۱۴۰
توان مخصوص (وات بر کیلوگرم)			۱۵۰-۲۰۰۰	۲۰۰-۴۰۰	≤۱۰	۵۰-۱۵۰	۱۵۰-۳۵۰	۱۵۰-۴۶۰	۹۰-۲۳۰	۱۸۰-۲۴۵
چگالی حجمی انرژی (کیلووات ساعت بر مترمکعب)			۲۰۰-۴۰۰	۵۰-۸۰	۲.۵-۲۰	≥۶۵	≤۱۱۰	≤۳۵۰	≤۴۰۰	۱۵۰-۲۰۰
چگالی حجمی توان (کیلووات بر مترمکعب)			۱۳۰۰-۱۰۰۰۰	۹۰-۷۰۰	۰.۵-۲	۱-۲۵	۷۵-۷۰۰	۵۰۰-۳۰۰۰	۱۲۰-۱۶۰	۲۵۰-۲۷۰
زمان شارژ			دقیقه- ساعت	ساعت	ساعت	۳-۴ ساعت	۱-۲ ساعت	۲-۴ ساعت	۹ ساعت ≤	۶ ساعت ≤
زمان پاسخگویی			میلی ثانیه	میلی ثانیه	میلی ثانیه	میلی ثانیه	میلی ثانیه	میلی ثانیه	میلی ثانیه	میلی ثانیه
زمان دشارژ			دقیقه- ساعت	ثانیه- ساعت	۱-۱۰ ساعت	≤۱۰ ساعت	ساعت	ساعت	۷ ساعت ≤	ثانیه- ساعت
بازه ذخیره سازی			دقیقه تا روز	دقیقه تا روز	ساعت تا ماه	ساعت تا ماه	دقیقه تا روز	دقیقه تا روز	دقیقه تا روز	روز
عمق دشارژ (درصد)			۸۰	۸۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
دشارژ خودی (درصد در روز)			۰.۱۵-۰.۳	۰.۱-۰.۴	۰	۰	۰.۲-۰.۳	۰.۴-۱.۲	۰.۵-۱	۰.۰۵
بازه دمایی (درجه سانتیگراد)			۶۰ تا -۲۰	۵۰ تا -۳۰	۴۰ تا ۱۰	۵۰ تا ۲۰	۶۰ تا -۴۵	۴۵ تا -۲۰	۳۰۰-۴۰۰	۲۷۰-۳۵۰
ولتاژ نامی هر سلول (ولت)			۳.۶-۴.۲	۲-۲.۳۵	۱.۱۵-۱.۵۵	۱.۸۲	۱.۲	۱.۲	۲.۱	۲.۵۸
بازده (درصد)			۸۵-۹۵	۷۰-۹۰	۶۰-۷۵	۶۰-۸۰	۶۰-۷۵	۷۰-۸۰	۷۵-۹۰	≤۹۰
تداوم			۱۰۰۰-۱۰۰۰۰	۵۰۰-۲۰۰۰	۱۲۰۰۰-۲۰۰۰۰	≥۲۰۰۰	۸۰۰-۲۵۰۰	۸۰۰-۳۰۰۰	۲۵۰۰-۴۰۰۰	۱۰۰۰-۱۲۰۰
طول عمر (سال)			۲۰-۲۵	۵-۱۵	≤۲۰	۱۰	≤۲۰	≤۱۰	≤۱۵	≤۱۵
هزینه سرمایه- گذاری	توان (دلار بر کیلووات)	انرژی (دلار بر کیلووات ساعت)	۱۲۰۰-۴۰۰۰	۱۷۵-۶۰۰	۱۴۰۰-۳۷۰۰	۱۸۰۰-۲۰۰۰	۵۰۰-۱۵۰۰	۶۰۰-۱۸۰۰	۳۲۰۰-۴۰۰۰	۱۵۰-۲۰۰
هزینه تعمیر و نگهداری (دلار بر کیلووات در سال)			۰	۵۰	۷۰	--	--	--	--	--
فضای مورد نیاز (متر مربع بر کیلووات ساعت)			۰.۰۱	۰.۰۶	۰.۰۴	۰.۰۲	۰.۰۳	۰.۰۲	۰.۰۲	۰.۰۳
تأثیرات مخرب زیست محیطی			خیلی کم	متوسط	کم	کم	متوسط	کم	خیلی کم	--
امتیاز بازیافت			۴	۵	۵	۵	۴	۴	۵	۵
قابلیت تحرک			آری	آری	خیر	آری	آری	آری	آری	آری
مقیاس پذیری			خوب	معمولی	خوب	خوب	--	--	معمولی	معمولی
انعطاف پذیری			متوسط	متوسط	زیاد	زیاد	--	--	متوسط	متوسط
ایمنی			ضعیف	ضعیف	ضعیف	ضعیف	--	--	متوسط	متوسط

همانگونه که از جدول (۱-۴) نیز پیداست باتری‌های سدیم-سولفور و نیکل-کادمیم در بالاترین سطح از توان مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این بین، کمترین سطح توان به باتری‌های نیکل-هیدرید فلز و سدیم-فلز کلرید اختصاص دارد. باتری‌های سدیم سولفور و سرب-اسیدی در حال حاضر در بالاترین سطح از ذخیره‌سازی انرژی در مقایسه با دیگر باتری‌ها قرار می‌گیرند.

از لحاظ انرژی مخصوص، باتری‌های لیتیم یونی و باتری‌های سدیم-سولفور فعلاً پیش‌تاز هستند و باتری‌های سدیم-فلز کلرید در رتبه سوم قرار می‌گیرند. مقایسه بازه دمایی، بر اهمیت باتری‌های لیتیم یونی با انرژی مخصوص قابل قبول می‌افزاید. از لحاظ توان مخصوص، باتری‌های لیتیم یونی در حال حاضر تقریباً هیچ رقیبی ندارند و با فاصله قابل توجه نسبت به سایر انواع باتری‌ها قرار گرفته‌اند. نکته قابل توجه در خصوص این پارامتر، کم بودن آن برای باتری‌های وانادیومی است.

به منظور بررسی و مقایسه باتری‌ها از لحاظ انرژی مخصوص و توان مخصوص از نموداری تحت عنوان نمودار راگونی استفاده می‌شود. در این نمودار، توان مخصوص بر روی محور x و انرژی مخصوص بر روی محور y قرار گرفته و هر دو محور به منظور مقایسه اعداد و ارقام با اختلاف زیاد، لگاریتمی انتخاب می‌شوند. نمودار راگونی از این حیث که نشان می‌دهد چه مقدار انرژی ذخیره شده (محور y) و با چه سرعتی (محور x) رهاسازی می‌شود حائز اهمیت است. نمودار راگونی با توجه به مشخصات آن برای انواع ذخیره‌سازها و مقایسه آنها نیز قابلیت کاربرد دارد. شکل (۱۷-۴) نمودار راگونی باتری‌های آورده شده در جدول (۱-۴) را نشان می‌دهد.

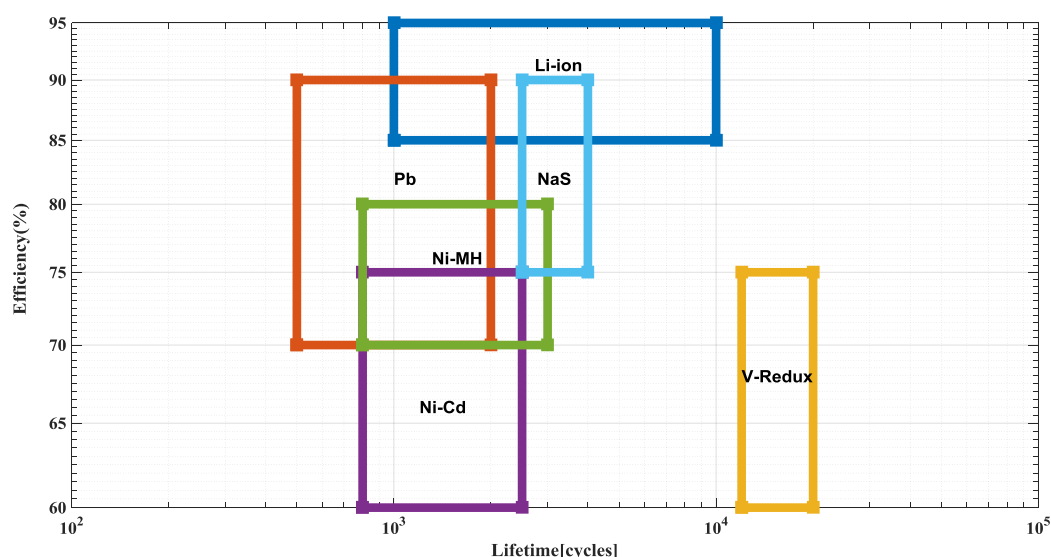


شکل ۱۷-۴: نمودار راگونی برای انواع باتری‌ها

در نمودار راگونی، باتری‌های لیتیم-یونی پیش‌تاز هستند و باتری‌های دما بالا نوعی رقیب برای آنها محسوب می‌شوند. در خصوص باتری‌های دما بالا، هنوز توان مخصوص بالا حاصل نشده است. باتری‌های نیکل-هیدرید فلز و

روی بروم نیز در وضعیت قابل قبولی قرار دارند. در این بین مشکل توان مخصوص باتری های جریان- و انادیمی همچنان پابرجاست و تلاش در جهت حل آن همچنان ادامه دارد.

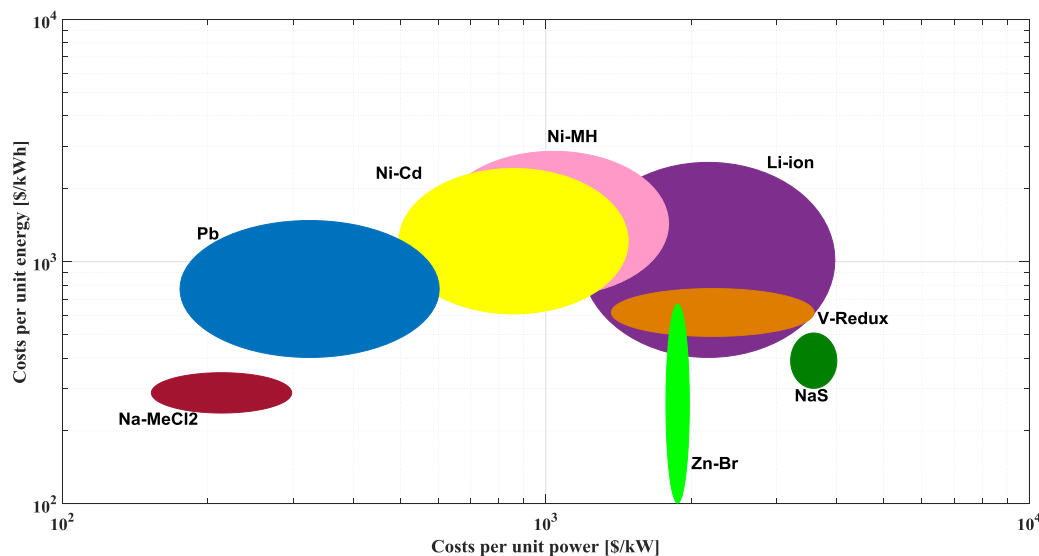
شکل (۴-۱۸) تداوم و بازده باتری های جدول (۴-۱) به غیر از باتری روی- بروم و باتری سدیم- فلز- کلرید (به دلیل نبودن اطلاعات دقیق و معتبر) را نشان می دهد.



شکل ۴-۱۸: تداوم و بازده انواع باتری ها

شکل (۴-۱۸) نشان می دهد باتری های لیتیم- یونی از لحاظ راندمان یا بازده ذخیره سازی و باتری های جریان و انادیمی از لحاظ تداوم پیشتر هستند. فاصله باتری های جریان و انادیمی با سایر باتری ها از لحاظ تداوم بسیار زیاد است. باتری های سدیم- سولفور رقیب جدی برای باتری های لیتیم- یونی بشمار می روند. کمترین میزان تداوم در باتری های سرب- اسیدی مشاهده شده است. باتری های نیکل- کادمیم از لحاظ تداوم وضعیت بهتری نسبت به باتری های سرب- اسیدی دارند لکن بازده ذخیره سازی در آنها کمتر است. باتری های نیکل- هیدرید فلز هم از لحاظ تداوم و هم از لحاظ بازده در وضعیت میانی قرار دارند.

شکل (۴-۱۹) هزینه سرمایه گذاری برای انواع باتری ها را نشان می دهد. محور x شکل مربوطه هزینه مربوط به توان و محور y هزینه انرژی را شامل می شود. مطابق شکل مذکور، باتری های سدیم- فلز کلرید فاصله قابل توجهی از لحاظ هزینه با سایر باتری ها دارند. رقیب آنها در هزینه مربوط به انرژی تنها باتری روی- بروم است. باتری های نیکل- هیدرید فلز بالاترین هزینه مربوط به انرژی و باتری های لیتیم- یونی در کنار باتری های سدیم- سولفور بالاترین هزینه مربوط به توان یک ذخیره ساز الکتروشیمیایی را به خود اختصاص داده اند. شکل (۴-۱۹) نشان می دهد باتری های لیتیم- یونی علی رغم پیشتر بودن در بسیاری از موارد از جمله توان و انرژی مخصوص، هزینه بالایی را به مصرف کننده تحمیل می کنند.



شکل ۴-۱۹: هزینه سرمایه‌گذاری به تفکیک توان و انرژی برای انواع باتری‌ها

سایر نکات ذیل از جدول (۴-۱) قابل استخراج است :

- ۱- زمان شارژ باتری‌ها در مقیاس چند دقیقه تا چند ساعت است. در این بین بالاترین کران شارژ به باتری‌های دما بالا اختصاص دارد.
- ۲- زمان پاسخگویی باتری‌ها به عنوان ذخیره‌ساز در مقیاس میلی‌ثانیه قرار دارد. در این بین برخی مراجع زمان پاسخگویی باتری‌های دما بالا را در مقیاس ثانیه گزارش کرده‌اند [۶۱].
- ۳- زمان دشارژ باتری‌ها همانند زمان شارژ در مقیاس چند دقیقه تا چند ساعت است. بر اساس اطلاعات موجود، باتری‌های جریانی و باتری‌های دما بالا، بالاترین کران دشارژ را داشته و دشارژ برخی از آنها تا ۱۰ ساعت نیز ممکن است به طول بیانجامد.
- ۴- دشارژ خودی باتری‌ها با طراحی و نگهداری مناسب هیچگاه از ۱ درصد در روز تجاوز نمی‌کند و این مساله آنها را جهت ذخیره‌سازی روزانه (به صورت حداقلی) مناسب می‌سازد. در باتری‌های جریانی دشارژ خودی به صفر میل می‌کند.
- ۵- هر چند عمق دشارژ ۱ یا ۱۰۰ درصد در خصوص انواع باتری‌ها به غیر از لیتیم-یونی و سرب-اسیدی قابل دستیابی است، در حالت کلی اضافه شارژ و اضافه دشارژ در خصوص باتری‌ها توصیه نمی‌شود. مدارات حفاظتی تا حد زیادی مشکلات مزبور را حل نموده‌اند.
- ۶- بیشترین ولتاژ نامی مربوط به هر سلول در باتری‌ها به میزان ۴٫۲ در باتری‌های لیتیم-یونی برمی‌گردد. کمترین میزان ولتاژ یک سلول نیز در باتری‌های جریانی و انادیومی و باتری‌های پایه نیکل دیده شده است.
- ۷- بیشترین طول عمر در باتری‌های لیتیم-یونی به میزان ۲۵ سال و کمترین طول عمر در باتری‌های سرب-اسیدی به میزان ۵ سال مشاهده شده است. سایر باتری‌ها عمری بین ۵ تا ۲۰ سال دارند.

- ۸- بیشترین فضای ذخیره سازی مربوط به باتری های سرب- اسیدی و کمترین فضای ذخیره سازی مربوط به باتری های لیتیم- یونی است.
- ۹- از دیدگاه زیست محیطی، باتری های لیتیم- یونی و سدیم- سولفور بهترین ذخیره سازهای الکتروشیمیایی و باتری های سرب- اسیدی و نیکل- کادمیم بدترین ذخیره سازهای الکتروشیمیایی بشمار می روند. سایر باتری ها در رده های میانی قرار می گیرند.
- ۱۰- امتیاز بازیافت باتری ها در رده های بالا قرار می گیرد و این مساله شاخصی مثبت برای آنها بشمار می رود.
- ۱۱- از همه باتری ها به غیر از باتری جریانی- وانادیومی می توان کاربرد متحرک انتظار داشت.
- ۱۲- طراحی، ساخت و بهره برداری از باتری های جریانی در مقیاس های متفاوت، به دلیل برخورداری این باتری ها از دو ویژگی مقیاس پذیری و انعطاف پذیری در سطوح مناسب، در مقایسه با سایر باتری ها آسانتر می باشد.
- ۱۳- نکات ایمنی در استفاده از باتری ها بخصوص در شرایط نامساعد و خطرناک محیطی همواره باید مد نظر قرار گیرد.

۷-۴- جمع بندی و نتیجه گیری

در این فصل از گزارش روش الکتروشیمیایی ذخیره سازی انرژی که در آن از انواع باتری ها جهت ذخیره سازی استفاده می شود مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور پنج گروه از باتری های قابل شارژ شامل باتری های لیتیم- یونی، باتری های سرب- اسیدی، باتری های جریانی، باتری های مبتنی بر نیکل یا پایه نیکل و باتری های دما بالا به ترتیب معرفی شده و مشخصات هر یک از گروه ها و باتری های زیرمجموعه آنها به همراه تاریخچه پیدایش و تکامل آنها تشریح گردید. بررسی انجام شده نشان داد در حال حاضر باتری های لیتیم- یونی با مشخصات فنی و البته هزینه بیشتر در زمینه ذخیره سازی انرژی پیشرو هستند و تحقیق و توسعه در خصوص این باتری ها و سایر باتری ها به منظور دستیابی به مشخصات فنی و اقتصادی برتر همچنان ادامه دارد.



فصل ۵

روش‌های حرارتی ذخیره‌سازی انرژی و فناوری‌های مربوطه

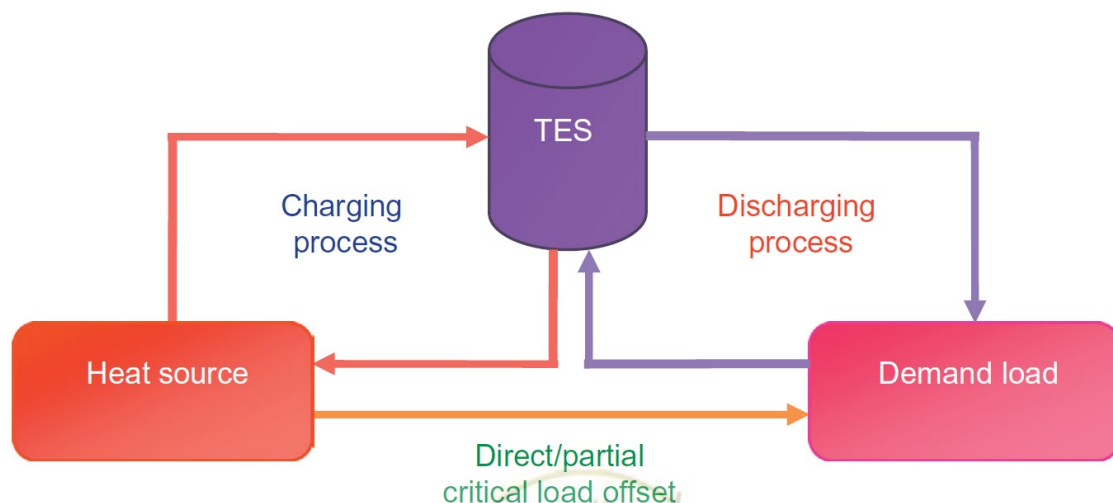


مقدمه

در این فصل از گزارش به تشریح روش‌های حرارتی ذخیره‌سازی انرژی پرداخته می‌شود. در حالت کلی، انرژی گرمایی یا حرارتی می‌تواند به شکل تغییر در انرژی درونی مواد به روش گرمای محسوس، گرمای نهان، گرمای ترموشیمیایی یا ترکیبی از آنها ذخیره شود. با توجه به اهمیت موضوع، سه روش ذکر شده و فناوری‌های وابسته به ترتیب معرفی شده و مشخصات هر یک به صورت اجمالی مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت. به منظور آشنایی هر چه بیشتر، در گام اول به مفهوم‌شناسی ذخیره‌سازی حرارتی و ویژگی‌های آن پرداخته می‌شود. شایان ذکر است در مطالعات مربوط به ذخیره‌سازی انرژی، ذخیره‌سازهای حرارتی به دو گروه دما پایین و دمای متوسط و بالا تقسیم‌بندی شده و مشخصات هر یک مورد بررسی قرار می‌گیرد. در پایان این فصل ضمن معرفی هر یک از گروه‌های مذکور به بررسی و تجزیه و تحلیل مشخصات آنها به عنوان ذخیره‌ساز انرژی پرداخته می‌شود.

۵-۱- ذخیره‌سازی انرژی حرارتی

ذخیره‌ساز انرژی حرارتی یا ذخیره‌ساز حرارتی یک فناوری پربازده و در دسترس است که از طریق توزیع مجدد انرژی، تقاضای انرژی نهایی را تامین می‌کند. انرژی به صورت گرما یا سرما برای مدت زمان مشخص در یک واسط ذخیره‌سازی قرار داده می‌شود و از همان واسط جهت استفاده‌های بعدی بازیابی می‌شود. در این بین، واژه حرارتی بسته به فعل و انفعالات انرژی بین واسط ذخیره‌سازی و منبع انرژی به گرما یا سرما اشاره دارد. شکل (۵-۱) شماتیک آنچه گفته شد را نشان می‌دهد [۱۰۲].



شکل ۵-۱: شماتیک سیستم تامین انرژی در حضور ذخیره‌ساز حرارتی و نحوه کارکرد آن

بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز حرارتی، بار حرارتی مور نیاز (سرمایش/گرمایش) توسط منبع حرارتی به طور مستقیم برآورده می‌شود. با اضافه شدن ذخیره‌ساز حرارتی کارکرد سیستم به صورت ذیل خواهد بود :

۱- هنگامی که تولید از تقاضا بیشتر است، مازاد آن به صورت انرژی در ذخیره‌ساز حرارتی انباشته می‌شود. این حالت که از آن با عنوان فرایند شارژ نام برده می‌شود در زمان‌های غیرپیک اتفاق می‌افتد.

۲- هنگامی که تقاضا از تولید بیشتر است، نیاز مازاد به وسیله ذخیره‌ساز حرارتی تامین می‌شود. این حالت که از آن با عنوان فرایند دشارژ یا تخلیه نام برده می‌شود در زمان‌های پیک اتفاق می‌افتد.

بررسی‌ها نشان داده که استفاده از ذخیره‌ساز به شکل منبع تامین موقت یا کمکی انرژی حرارتی باعث کاهش مصرف سوخت کل سیستم و به حداقل رساندن میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود.

مقدار انرژی حرارتی که می‌تواند ذخیره و سپس بازیابی شود بستگی به واسط ذخیره‌سازی و اثرات یا اختلاف دمای بین واسط و منبع گرما دارد. در این بین چگالی حجمی انرژی و بازه ذخیره‌سازی در خصوص ذخیره‌سازهای حرارتی از اهمیت خاصی برخوردار هستند. به طور خلاصه، هر چه حجم سیستم ذخیره‌سازی حرارتی کوچکتر باشد و مدت زمان نگهداری آن طولانی‌تر باشد، عملکرد ذخیره‌سازی حرارتی آن نیز بهتر است.

در ادامه به تشریح انواع روش‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی پرداخته می‌شود.

۵-۲- ذخیره‌سازی گرمای محسوس

در روش ذخیره‌سازی گرمای محسوس، انرژی حرارتی بوسیله بالا بردن دمای ماده مورد نظر ذخیره می‌شود. ظرفیت یا انرژی گرمایی ذخیره شده در سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی حرارتی به روش گرمای محسوس با ظرفیت گرمایی ماده (C_p)، جرم ماده (m) و همچنین تغییر دمای آن (ΔT) رابطه مستقیم دارد. رابطه فیزیکی بین موارد مذکور مطابق (۵-۱) خواهد بود.

$$Q = m \cdot C_p \cdot (T_h - T_l) \quad (۵-۱)$$

در رابطه (۵-۱)، T_h و T_l به ترتیب بیشترین دما و دمای اولیه هستند که ذخیره انرژی بین این دماها اتفاق می‌افتد.

۵-۲-۱- مواد ذخیره گرمای محسوس

مواد ذخیره‌کننده انرژی حرارتی در روش گرمای محسوس دچار هیچ گونه تغییر فازی در طول فرایند نمی‌شوند. تعدادی از جامدات و برخی از مایعات می‌توانند در این روش مورد استفاده قرار گیرند که در ادامه به آنها پرداخته می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که گازها ظرفیت گرمایی بسیار پایینی دارند و بنابراین برای ذخیره گرما و سرما به صورت محسوس استفاده نمی‌شوند.

۵-۲-۱-۱- جامدات مورد استفاده در روش ذخیره‌سازی گرمای محسوس

مواد ذخیره‌کننده جامد بیشتر در سیستم‌های گرمایی دما بالا (خورشیدی) و سیستم‌های ذخیره‌ساز حرارتی مرتبط با گرمایش ساختمان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. بسترهای سنگی/بتنی در بازه دمایی ۴۰ تا ۷۵ درجه سانتیگراد و

فلزات در دمای بیش از ۱۵۰ درجه سانتیگراد می‌توانند به عنوان جامدات ذخیره‌کننده انرژی در کاربردهای مذکور مورد استفاده قرار گیرند. تحقیق و توسعه در زمینه استفاده از جامدات به عنوان ذخیره‌ساز حرارتی با اهداف ذیل صورت می‌پذیرد [۱۰۲].

۱- کاهش خطرات ناشی از نشت مواد ذخیره‌ساز گرما که دچار افزایش درجه حرارت می‌شوند.

۲- بکارگیری جامدات به عنوان ذخیره‌ساز در دماهای بسیار بالا (نیروگاه‌های خورشیدی)

علی‌رغم پیشرفت‌های حاصله، محدودیت‌های مشخصی در ارتباط با بکارگیری جامدات به عنوان ذخیره‌ساز حرارتی وجود دارد. این محدودیت‌ها عبارتند از:

✓ ظرفیت حرارتی خاص (حاصل‌ضرب چگالی در ظرفیت گرمایی ویژه) نسبتاً کم که در حالت عملیاتی بروز داده

می‌شود. (به طور متوسط ۱۲۰۰ کیلوژول بر متر مکعب کلونین)

✓ چگالی ذخیره انرژی کمتر در مقایسه با مواد ذخیره‌سازی مایع

✓ خطرات ناشی از دشارژ اتوماتیک ذخیره‌ساز حرارتی در سیستم‌های ذخیره طولانی مدت

✓ خواص ترموفیزیکی واسط انتقال حرارت

✓ ایجاد لایه‌های مختلف در ذخیره‌ساز

✓ هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری از واحد ذخیره‌سازی مرتبط با ذخیره‌ساز جامد

در جدول (۵-۱) لیست مواد جامد (که به عنوان واسط ذخیره‌سازی حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرند) و مشخصات آنها آورده شده است [۱۰۲].

جدول ۵-۱: مواد جامد مورد استفاده به عنوان واسط ذخیره‌سازی حرارتی و مشخصات آنها

نام ماده	بازه دمایی (درجه سانتیگراد)	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	ظرفیت گرمایی ویژه (کیلوژول بر کیلوگرم کلونین)
آجر	۲۰-۷۰	۱۶۰۰	۰٫۸۴
بتن		۲۲۴۰	۱٫۱۳
صفحه سیمانی		۷۰۰	۱٫۰۵
گچ	--	۱۲۰۰	۰٫۸۳۷
گرانیت	۲۰-۷۰	۲۶۵۰	۰٫۹
سنگ مرمر		۲۵۰۰	۰٫۸۸
ماسه سنگ		۲۲۰۰	۰٫۷۱۲
صفحه خشتی	--	۱۹۰۰	۰٫۸۳۷
صفحه آسفالت	--	۲۳۰۰	۱٫۷
ورقه استیل	۲۰-۷۰	۷۸۰۰	۰٫۵۰۲
چوب پنبه	--	۱۶۰	۱٫۸۸۸
چوب		۸۰۰	۲٫۰۹۳

نام ماده	بازه دمایی (درجه سانتیگراد)	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	ظرفیت گرمایی ویژه (کیلوژول بر کیلوگرم کلون)
صفحه پلاستیکی	---	۱۰۵۰	۰,۸۳۷
صفحه لاستیکی		۱۶۰۰	۰,۲
صفحه پی وی سی		۱۳۷۹	۱,۰۰۴
ورق آزبست		۲۵۰۰	۱,۰۵
صفحه فرمالدئید		۳۰	۱,۶۷۴
صفحه ترمالیت		۷۵۳	۰,۸۷۳
صفحه فیبری		۳۰۰	۱
صفحه سیپورکس		۵۵۰	۱,۰۰۴
صفحه پلی‌اورتان		۳۰	۰,۸۳۷
آلومینیوم	۱۶۰ تا	۲۷,۷	۰,۸۹۶
اکسید آلومینیوم		۳۹۰۰	۰,۸۴
سولفات آلومینیوم		۲۷۱۰	۰,۷۵
چدن		۷۹۰۰	۰,۸۳۷
آهن خالص		۷۸۹۷	۰,۴۵۲
کلرید کلسیم		۲۵۱۰	۰,۶۷
مس		۸۹۵۴	۰,۳۸۳

۵-۲-۱-۲- مایعات مورد استفاده در روش ذخیره‌سازی گرمای محسوس

سیستم‌های ذخیره انرژی با استفاده از مایع جهت ذخیره‌سازی انرژی حرارتی در دماهای پایین تا دمای متوسط به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. در عمل، آب رایج‌ترین ماده مایع است. این مایع ظرفیت گرمایی قابل توجهی دارد. در مقیاس وسیع در دسترس است و علاوه بر اینها کم هزینه بشمار می‌رود. در جدول (۵-۲) لیست مواد جامد که به عنوان واسط ذخیره‌سازی حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرند و مشخصات آنها آورده شده است [۱۰۲].

جدول ۵-۲: مواد مایع مورد استفاده به عنوان واسط ذخیره‌سازی حرارتی و مشخصات آنها

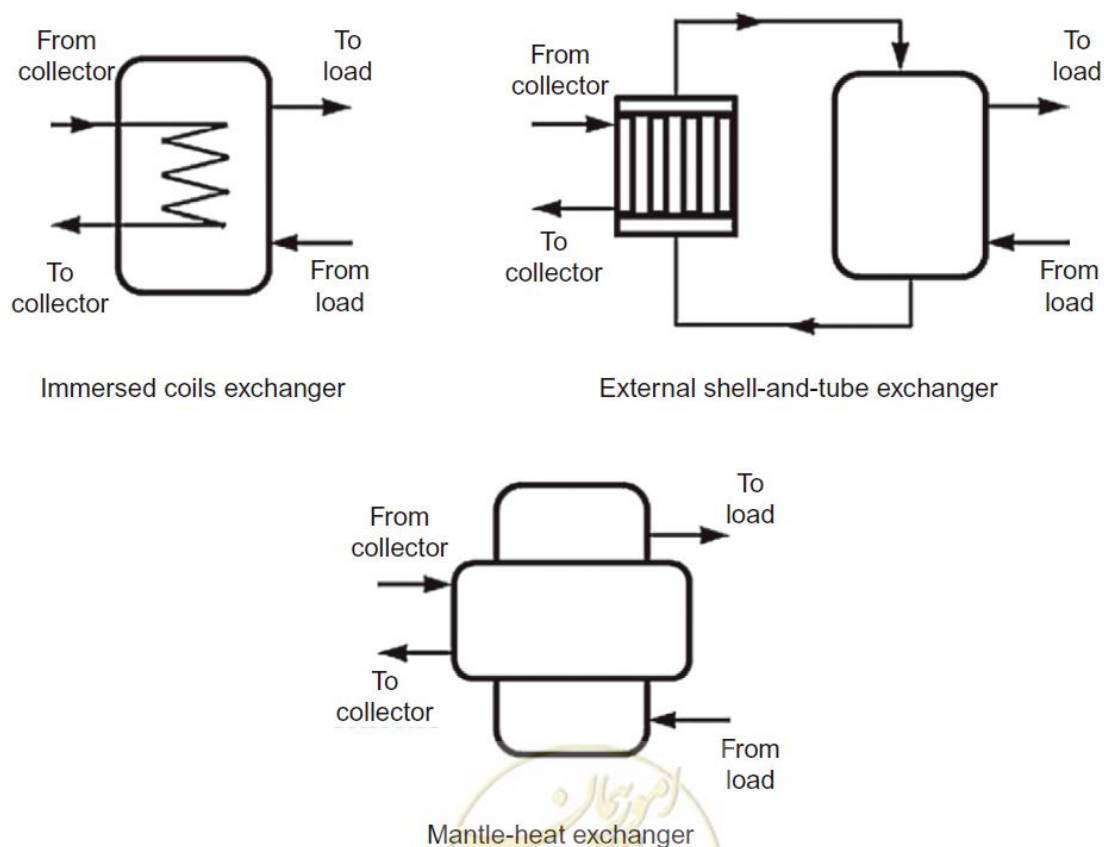
نام ماده	بازه دمایی (درجه سانتیگراد)	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	ظرفیت گرمایی ویژه (کیلوژول بر کیلوگرم کلون)
آب	۰-۱۰۰	۱۰۰۰	۴,۱۹
روغن حرارتی	۱۲-۲۶۰	۸۶۷	۲,۲
اتانول	۷۸ تا	۷۹۰	۲,۴
پروپانول	۹۷ تا	۸۰۰	۲,۵
بوتانول	۱۱۸ تا	۸۰۹	۲,۴
ایزوبوتانول	۱۰۰ تا	۸۰۸	۳
ایزوپنتانول	۱۴۸ تا	۸۳۱	۲,۲
اکتان	۱۲۶ تا	۷۰۴	۲,۴
روغن موتور	۱۶۰ تا	۸۸۸	۱,۸۸

۵-۲-۲- فناوری‌های مورد استفاده در روش ذخیره‌سازی گرمای محسوس

۵-۲-۲-۱- مخازن ذخیره‌سازی حرارتی با استفاده از آب

استفاده از آب به عنوان واسطه، در سیستم‌های مبتنی بر ذخیره‌سازی گرمای محسوس به عنوان روشی کارآمد جهت تامین تقاضا شناخته می‌شود. محدوده دمای عملیاتی آب (۸۰-۲۰ درجه سانتیگراد) برای برآورده کردن بیشتر نیازهای گرمایشی و بخصوص گرمایشی مسکونی کافی است. آب به دلیل ظرفیت گرمایی ویژه و خصوصیات انتقال حرارت همرفتی مناسب می‌تواند هم به عنوان ذخیره‌ساز حرارتی و هم به عنوان واسطه انتقال حرارت ایفای نقش کند [۱۰۲].

مخازن ذخیره آب معمولاً از موادی مانند فولاد، آلومینیوم، بتون مسلح و فایبرگلاس ساخته می‌شوند. این مخازن باید با موادی مانند پشم معدنی، پشم شیشه یا فوم پلی‌اورتان به منظور جلوگیری از دشارژ اتوماتیک و تلفات حرارتی عایق‌بندی شوند. آب را می‌توان به صورت ثابت در مخزن ذخیره کرد و یا از طریق مخزن به صورت دینامیکی جهت تزریق و استخراج مقدار حرارت لازم به گردش درآورد. سیستم‌های مختلف مخازن ذخیره‌سازی حرارتی با استفاده از آب به عنوان محیط ذخیره گرما در شکل (۵-۲) نشان داده شده است [۱۰۲].



شکل ۵-۲: شماتیک سیستم‌های مختلف مخازن ذخیره‌سازی حرارتی با استفاده از آب به عنوان محیط ذخیره گرما

در پیکربندی مبدل‌های کویلی غوطه‌ور، معمولاً کویل‌های مبدل حرارتی در پایین مخزن ذخیره‌سازی قرار می‌گیرند. اساساً این کار به منظور ایجاد انتقال حرارت حداکثری بین آب گرم ورودی از جمع‌کننده خورشیدی و واسط انتقال حرارت در سمت تقاضا صورت می‌پذیرد. علاوه بر این در این پیکربندی ذخیره‌سازی، اثرات مربوط به اختلاف دما بین قسمت‌های بالا و پایین مخزن ذخیره‌سازی (ناشی از اثرات متقابل گرما) را می‌توان با استفاده از مبدل‌های حرارتی ویژه به حداقل رساند. با این حال استفاده از مبدل‌های حرارتی ویژه، بر قیمت طرح خواهد افزود و استفاده از پیکربندی مذکور جهت تامین نیاز بلادرنگ به آبگرم در مصارف خانگی را با محدودیت‌هایی مواجه خواهد ساخت [۱۰۲].

در مقایسه با پیکربندی مبدل‌های کویلی غوطه‌ور، پیکربندی مبدل حرارتی خارجی به دلیل ساده بودن در طراحی و اجرا، همواره جذابیت بیشتری داشته و بر این جذابیت افزوده شده است. در این پیکربندی، انرژی گرمایی می‌تواند از جمع‌کننده خورشیدی به طور غیر مستقیم به مخزن ذخیره‌سازی منتقل شود. این انتقال با استفاده از ضد یخ و شبکه‌های هیدرولیک آب انجام می‌شود. ضد یخ گرما را از جمع‌کننده‌ها جمع می‌کند و آن را با آب ورودی به مبدل حرارتی پوسته و لوله خارجی، انتقال می‌دهد. آب گرم شده برای استفاده بیشتر به داخل مخزن ذخیره‌سازی پمپ می‌شود. بنابر این، در طول شب، انرژی حرارتی مورد نیاز را می‌توان با استفاده از واسط انتقال حرارت (هوا یا سیال) از مخزن ذخیره‌سازی تخلیه کرد. پیکربندی مبدل حرارتی خارجی مقرون به صرفه بوده و از قابلیت اطمینان بالایی برخوردار است [۱۰۲].

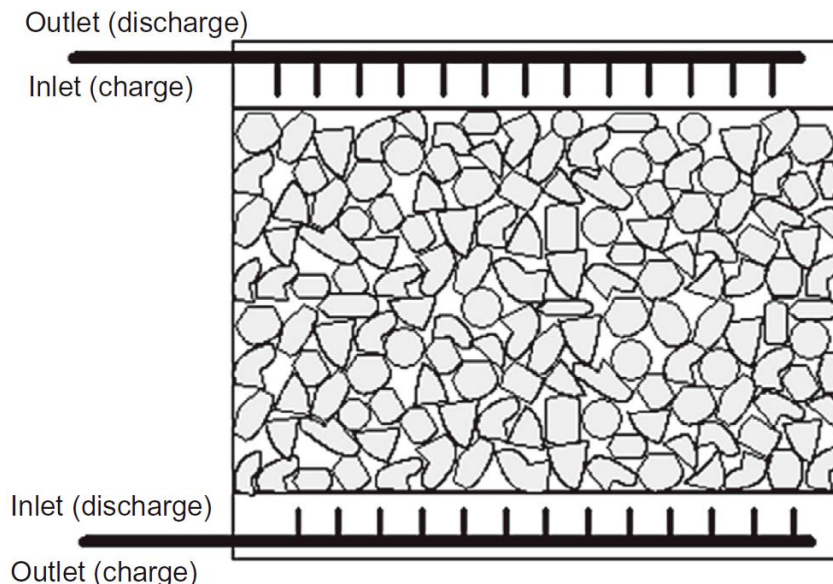
نوع دیگر پیکربندی مخازن ذخیره‌سازی حرارتی با استفاده از آب، شامل مبدل حرارتی جدارهای است که در آن سیال انتقال دهنده حرارت از جمع‌کننده خورشیدی می‌تواند گرما را به آب ذخیره شده در ساختار جدارهای یا تانک دو جدار منتقل کند. به دلیل افزایش سطح انتقال حرارت، اثربخشی تبادل گرما و عملکرد ذخیره‌سازی حرارتی در این نوع چیدمان قابل ملاحظه است. با این حال، محدودیت‌های مربوط به طراحی و اجرا، هزینه بکارگیری این نوع پیکربندی را افزایش داده و آن را گران می‌سازد [۱۰۲].

۵-۲-۲- ذخیره‌ساز حرارتی با بستر سنگی

ذخیره انرژی حرارتی در بستر سنگی یا سنگ هنگامی که با انرژی خورشیدی به عنوان منبع تامین گرما ترکیب می‌شود گزینه بسیار ایده‌آل برای مصارف مسکونی است. در این نوع ذخیره‌ساز، مواد سنگی در یک بستر مطابق شکل (۵-۳) قرار گرفته یا به اصطلاح بسته‌بندی می‌شوند. همچنین سیستم ذخیره‌سازی حرارتی با بستر سنگی به آرایش لوله‌ای یا داکتی جهت ورود و خروج واسط حرارتی مجهز می‌شود [۱۰۳].

در یک چرخه شارژ معمولی، واسط انتقال حرارت (عمدتاً هوا) گرمای جمع‌کننده خورشیدی را حمل کرده و از طریق مسیر هوایی فوقانی وارد بستر سنگی می‌شود. به دلیل تأثیرات گرادیان چگالی در بستر سنگی، هوای داغ گرمای خود را از دست داده، سرد شده و دوباره به جمع‌کننده جهت چرخه شارژ بعدی برمی‌گردد. در طول دوره تخلیه (شبانه)، هوای

سرد ناشی از بار خارجی از طریق مسیره‌وایی زیرین جریان یافته و گرما را از بستر سنگی می‌گیرد. بواسطه گرادیان چگالی و اثرات همرفتی، هوای سرد گرم شده و به دمای مورد نظر می‌رسد.



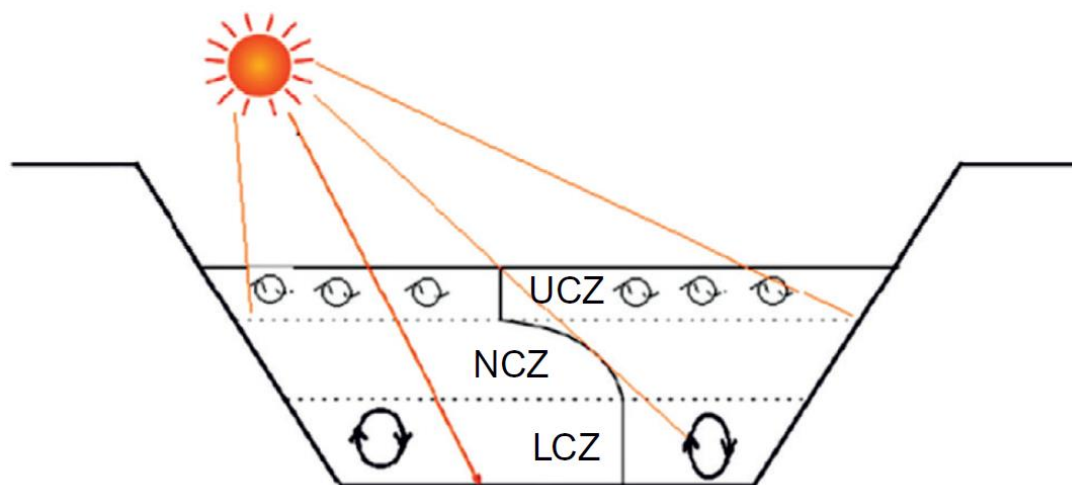
شکل ۵-۳: شماتیک سیستم ذخیره‌ساز حرارتی با بستر سنگی و اجزای آن

بعد از اینکه حرارت یا گرمای موجود در بستر سنگی برداشته شد، سیستم برای سیکل شارژ بعدی که دریافت انرژی از خورشید در روز است، آماده می‌باشد.

از آنجا که در سیستم ذخیره‌سازی در بستر سنگی، هوا به عنوان واسط انتقال حرارت مورد استفاده قرار می‌گیرد، انتظار می‌رود عملکرد این سیستم در مقایسه با سیستم ذخیره‌سازی مایع (آب) برای بار حرارتی یکسان ضعیف‌تر باشد. این امر به این دلیل است که هوا و همچنین سنگ از ظرفیت گرمایی ویژه کمتری برخوردار هستند. با تقاضای گرمایشی مشخص، فضای اشغال شده توسط سیستم ذخیره‌ساز حرارتی با بستر سنگی گاهی می‌تواند تا سه برابر بزرگتر از سیستم ذخیره‌سازی گرمای مایع باشد (خصوصاً برای مقیاس بزرگ ذخیره سازی حرارتی فصلی). با این حال، هزینه ساخت و بهره‌برداری از سیستم با بستر سنگی کمتر از سیستم ذخیره‌سازی مبتنی بر آب است. همچنین، سیستم با بستر سنگی را می‌توان در گرادیان دمایی بالا استفاده کرد در حالی که سیستم‌های ذخیره‌ساز حرارتی مبتنی بر آب محدود به اختلاف دمای مشخصی هستند [۱۰۳].

۵-۲-۲-۳- دریاچه یا حوضچه خورشیدی

ذخیره انرژی حرارتی با استفاده از حوضچه یا دریاچه خورشیدی می‌تواند کارآمدتر باشد چرا که مقدار قابل توجهی انرژی حرارتی در دسترس است. مبنای علمی ذخیره‌سازی انرژی حرارتی در دریاچه یا حوضچه خورشیدی بر تاثیرات گرادیان شوری بستر موجود (دریاچه یا حوضچه) استوار است. گرادیان شوری نیروی محرک جهت ذخیره‌سازی و استخراج انرژی گرمایی از یک حوضچه خورشیدی است. شکل (۵-۴) شماتیک یک دریاچه خورشیدی را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۵: شماتیک یک دریاچه خورشیدی به همراه لایه‌های آن

همانطور که در شکل (۴-۵) نشان داده شده است، لایه‌های آب حوضچه شامل سه ناحیه همرفتی فوقانی (^۱ UCZ)، غیرهمرفتی میانی (^۲ NCZ) و همرفتی زیرین (^۳ LCZ) می‌باشد. وجود این سه ناحیه نقش مهمی در فرآیندهای ذخیره‌سازی و استفاده از انرژی گرمایی دارد. UCZ حاوی غلظت کمی از نمک است یا تقریباً شور نیست. NCZ به طور طبیعی نمکی است و این مساله موجب ایجاد گرادیان شوری بین UCZ و NCZ می‌شود. به عبارت بهتر، سطح آب ناحیه UCZ مقدار نمک کمتری در مقایسه با NCZ دارد. گرادیان شوری بین NCZ و LCZ نیز بسیار زیاد است به گونه‌ای که LCZ در مقایسه با NCZ بسیار شور است [۱۰۴].

به طور معمول، تابش خورشیدی که وارد حوضچه می‌شود تحت تأثیر سه منطقه قرار می‌گیرد لکن غلظت زیاد نمک در ناحیه LCZ باعث می‌شود انرژی گرمایی در این لایه ذخیره شود. در همین زمان، گرادیان شوری در برابر همرفت طبیعی بین لایه‌های آب ایجاد مقاومت می‌کند. بدین ترتیب، UCZ به عنوان عایق برای لایه‌های زیرین NCZ و LCZ عمل می‌کند. در نتیجه، انرژی گرمایی بیشتری از تابش خورشیدی بدست می‌آید و در کف حوضچه یا ناحیه LCZ خورشیدی ذخیره می‌شود. جهت بازیافت گرمای ذخیره شده می‌توان از یک مبدل حرارتی بهره برد [۱۰۴].

حوضچه خورشیدی را می‌توان به صورت مصنوعی ایجاد کرد. نکات اصلی در ایجاد دریاچه خورشیدی با استفاده از

مواد نمکی خارجی به شرح زیر است:

- ✓ میزان حلالیت مواد نمک باید به اندازه کافی بالا باشد تا غلظت بالای محلول حفظ شود.
- ✓ میزان حلالیت مواد باید ثابت یا دارای حداقل تغییرات نسبت به دما باشد.
- ✓ محلول نمکی تولید شده باید واضح و شفاف باشد تا تابش خورشید به لایه LCZ انتقال داده شود.
- ✓ مواد نمکی مورد استفاده باید سازگار با محیط زیست بوده و مشکل ایمنی در کارکرد با آنها وجود نداشته باشد.

¹ Upper Convective Zone

² Middle Nonconvective Zone

³ Lower Convective Zone

✓ مواد نمکی انتخاب شده برای استفاده در حوضچه خورشیدی باید به آسانی در دسترس باشند.

✓ استفاده از مواد نمکی انتخاب شده باید مقرون به صرفه باشد.

مواد نمکی ذیل با خواص ترموفیزیکی مناسب در ساخت دریاچه خورشیدی مصنوعی مورد استفاده قرار می‌گیرند
[۱۰۲]:

• کلرید سدیم (NaCl_2)

• آب نمک طبیعی سدیم، پتاسیم، منیزیم، کلسیم و غیره

• کربنات سدیم (Na_2CO_3)

• کلرید منیزیم (MgCl)

• نیترات پتاسیم (KNO_3)

• نیترات آمونیوم (NH_4NO_3)

• اوره ($\text{NH}_2\text{CO.NH}_2$)

در این بین گزارش‌های موجود نشان داده که محلول نمکی کلرید سدیم (NaCl_2) با دمای متوسط ۵۵ درجه سانتیگراد عملکرد بهتری در مقایسه با سایر نمک‌ها دارد. بر اساس مطالعات تجربی انجام شده توسط گروه‌های مختلف پژوهشی، می‌توان چنین استنباط کرد که بازده حوضچه خورشیدی بسته به انتخاب مبدل حرارتی و گرادیان شوری بین لایه‌های LCZ و NCZ از ۲۰ تا ۵۰ درصد قابل افزایش است [۱۰۲].

۵-۲-۲-۴- ذخیره‌سازی حرارتی در مصالح ساختمانی

انرژی حرارتی می‌تواند به صورت سرما یا گرما در مصالحی که برای ساخت سازه‌ها و ساختمان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، ذخیره شود. مصالح ساختمانی شامل بتن، آجر، گچ یا ترکیبی از این موارد می‌توانند واسطه جهت ذخیره‌سازی حرارتی باشند و این مساله بر راحتی و آسایش ساکنان ساختمان از لحاظ تامین نیازهای گرمایشی و سرمایشی تأثیری ندارد. مصالح مذکور که جهت ساخت سقف، کف، دیوارها و پارتیشن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند به اندازه کافی جهت جذب و رهاسازی سرما و گرما خوب بوده و باید از این خواص به صورت مناسبی بهره برد.

بر اساس نحوه عملکرد می‌توان دو نوع ذخیره‌سازی اکتیو (فعال) و پسیو (غیرفعال) را در خصوص ذخیره‌سازی حرارتی در مصالح ساختمانی تمیز داد. به عنوان مثال، ذخیره انرژی از طریق اثرات گرادیان چگالی (همرفت طبیعی) بین محیط داخل (هوا به عنوان واسطه) و مصالح ساختمانی را می‌توان به عنوان ذخیره حرارتی پسیو (غیرفعال) در نظر گرفت. در نقطه مقابل اگر در سیستم ذخیره‌سازی توسط یک تجهیز مکانیکی (پنکه، دمنده و غیره) استفاده شود، آن سیستم را می‌توان در گروه ذخیره‌سازهای اکتیو (فعال) جای داد [۱۰۵].

به طور کلی، میزان انتقال حرارت در روش ذخیره‌سازی حرارتی در مصالح ساختمانی بستگی به موارد زیر دارد:

- جرم ماده یا مصالح مورد استفاده
- ظرفیت گرمایی ویژه و ظرفیت گرمایی واسط انتقال حرارت
- گرادیان دما بین مصالح و واسط انتقال حرارت (در ذخیره‌سازی اکتیو) یا محیط (در ذخیره‌سازی پسیو)
- دبی سیال انتقال حرارت (در صورت وجود سیستم ذخیره‌سازی اکتیو)
- هدایت حرارتی مصالح و واسط انتقال حرارت
- تلفات حرارتی مواد و مصالح مورد استفاده

۵-۲-۲-۴-۱- ذخیره‌سازی حرارتی در صفحات مورد استفاده در کف و سقف ساختمان

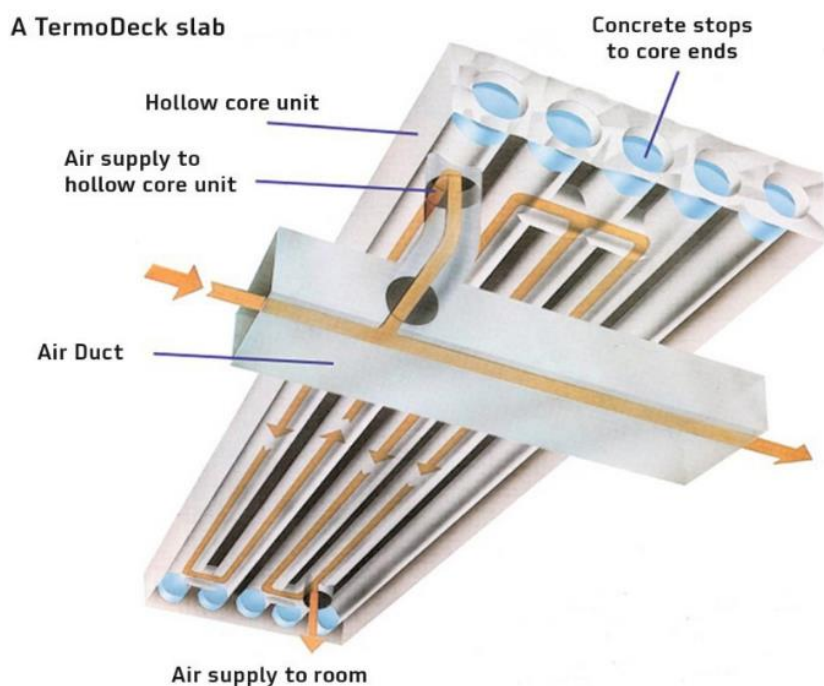
ذخیره‌سازی حرارتی با استفاده از صفحات مورد استفاده در کف و سقف روشی جذاب است که در آن از ترکیب تهویه طبیعی و مکانیکی استفاده می‌شود. به زبان ساده در این سیستم، هوای سرد داخل ساختمان در طول شب (ساعات غیرپیک) در صفحات تشکیل‌دهنده سقف ذخیره می‌شود. در طول روز و در ساعات پیک هوای گرم محیط داخلی در صفحات سقف به گردش درآمده و گرمای آن مبادله می‌شود. مکانیسم مشابهی با تغییر زمان‌ها (شب دشارژ و روز شارژ) برای حالت گرمایش می‌توان در نظر گرفت. اختلاف دما بین هوای اتاق و سقف در این روش بین ۲ تا ۴ درجه سانتیگراد است. استفاده از فن یا دمنده می‌تواند عملکرد این سیستم را از طریق همرفت اجباری بهبود بخشد و امکان انتقال حرارت بهتر بین هوای اتاق و صفحات سقف را فراهم آورد [۱۰۲].

با استفاده از صفحات کف نیز دستیابی به ذخیره‌سازی گرما از طریق همرفت طبیعی یا اجباری امکان‌پذیر است. در این حالت، هوای داخلی از دیفیوزرهای هوای زیرزمین تأمین می‌شود و هوای بازگشتی در سطح سقف جمع می‌شود. به دلیل حرکت عمودی هوا از طریق دیفیوزرهای کف به فضای داخلی، انرژی حرارتی را می‌توان به طور موثری در کف ساختمان ذخیره کرد و بواسطه طبقه‌بندی دمایی ایجاد شده، شرایط آسایش برای زندگی ساکنان در فضای داخلی نیز فراهم می‌شود. به روش مشابه می‌توان سرمایش یا تهویه مطبوع مورد نیاز فضای داخلی ساختمان را از طریق صفحات مورد استفاده در کف سازه تأمین کرد. بررسی‌ها نشان داده استفاده از سیستم ذخیره‌سازی حرارتی در صفحات مورد استفاده در کف و سقف ساختمان، بازده انرژی ساختمان را ۵ تا ۱۰ درصد افزایش می‌دهد [۱۰۲].

۵-۲-۲-۴-۲- ذخیره‌سازی حرارتی در صفحات توخالی مورد استفاده در سقف

ذخیره‌سازی حرارت در مصالح توخالی صفحه‌ای در سال‌های اخیر توسعه قابل توجهی یافته است. از این روش با عنوان TermoDeck نیز یاد می‌شود. این سیستم در اصل از یک جزء توخالی (قابل استفاده جهت پوشش سقف ساختمان) تشکیل شده و به عنوان یک مرکز ذخیره‌سازی گرما عمل می‌نماید. استفاده از این سیستم موجب کاهش تقاضای بار سرمایشی یا گرمایشی در زمان‌های پیک و بهبود بهره‌وری انرژی در ساختمان می‌شود. در یک سیکل سرمایشی، انرژی سرمایشی موجود در هوای محیط داخلی یا هوای تهویه می‌تواند در قسمت‌های توخالی صفحه به دام

بیفتد و ذخیره شود. با گردش هوای گرم داخل ساختمان در داخل حفره‌ها، انرژی سرمایشی ذخیره شده، بازیافت شده و داخل ساختمان خنک می‌شود. شماتیک یک صفحه توخالی جهت استفاده در سقف ساختمان در شکل (۵-۵) آورده شده است [۱۰۲].



شکل ۵-۵: شماتیک یک صفحه توخالی مورد استفاده در سقف و گردش هوا در آن

Pitch یا همان فاصله مرکز تا مرکز حفره‌ها در یک صفحه به بار حرارتی فضای داخلی ساختمان وابسته است و باید بگونه‌ای انتخاب شود که حداکثر استخراج انرژی از هوای در حال گردش رخ دهد. مزایای استفاده از TermoDeck به قرار زیر است [۱۰۵]:

- کاهش تقاضای برق در زمان‌های پیک تا ۵۰٪ (۴ تا ۵ ساعت کار در طول شب) این مقدار می‌تواند تا ۷۰٪ افزایش یابد.
- کاهش در مصرف انرژی اولیه تا ۵۰٪
- حذف تجهیزات مکانیکی از جمله فن‌ها، چیلرها و غیره
- با توجه به انعطاف پذیری در طراحی، شرایط آسایش مناسب برای ساکنین با در نظر گرفتن بهره‌وری انرژی حاصل می‌شود.
- مصرف کم انرژی و در نتیجه کاهش انتشار کربن



۵-۲-۲-۳- ذخیره‌سازی حرارتی با استفاده از کویل‌های قرار داده شده در اجزای ساختمان

در این روش لوله‌ها به شکل کویل در داخل اجزای ساختمانی قرار داده می‌شوند. این عملیات در هنگام ساخت اجزای مذکور صورت می‌پذیرد. بواسطه اثرات همرفتی، جریان انتقال حرارت (در حالت گرم یا سرد) که از طریق کویل‌های مذکور برقرار می‌شود، انرژی حرارتی را به ساختمان منتقل می‌کند. به طور عمده، انرژی ذخیره شده در اجزای ساختمانی در این روش گرمای محسوس می‌باشد. در ادامه گرمای ذخیره شده با عبور هوای محیط داخل از روی اجزای ساختمانی به آن منتقل می‌گردد. علت اصلی این انتقال حرارت، همرفت طبیعی یا گرادیان چگالی بین هوای داخل و اجزای ساختمان است. نرخ انتقال جرم، ظرفیت گرمایی ویژه، گرادیان دما، ویسکوزیته و افت فشار اصطکاکی جریان پارامترهای اساسی هستند که باید در حین طراحی اجزای کویل‌دار در نظر گرفته شوند تا عملکرد سیستم به عنوان ذخیره‌ساز تضمین شود.

۵-۲-۲-۴- ذخیره‌سازی گرمای محسوس با استفاده از سیستم گرمایش برقی

در این روش، آجرهای توخالی ساخته شده از مگنتیت یا مگنیزیت تعبیه شده در یک حامل فلزی، در نقش مقاومت الکتریکی ظاهر می‌شوند. مقدار قابل توجهی از انرژی حرارتی از طریق اصل هدایت در این آجرها ذخیره می‌شود. انرژی حرارتی ذخیره شده را می‌توان از طریق عبور هوای داخل از میان این آجرها به محیط داخل انتقال داد. نکته قابل توجه در خصوص این سیستم ذخیره‌سازی آن است که دمای آجرها را می‌توان با انرژی الکتریکی تا ۷۶۰ درجه سانتیگراد بالا برد. در عین حال دمای سطح بیرونی بخاری آجری ساخته شده را می‌توان بین ۸۰ تا ۸۵ درجه سانتیگراد حفظ کرد [۱۰۲].

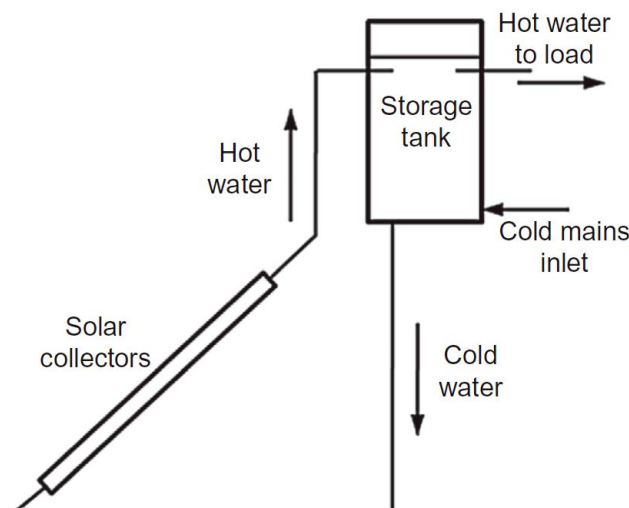
ظرفیت ذخیره حرارتی اجزای آجر می‌تواند از ۴۹ تا ۲۱۶ مگاژول باشد. مدت زمان شارژ شدن اجزای آجر با استفاده از جریان الکتریکی ۶ تا ۷ ساعت و دوره دشارژ آن بین ۴ تا ۵ ساعت است [۱۰۲].

۵-۲-۲-۵- ذخیره‌ساز حرارتی خورشیدی پسیو (غیرفعال)

در یک سیستم ذخیره‌سازی حرارتی خورشیدی پسیو، گرما مستقیماً از خورشید دریافت می‌شود. اساس کار ذخیره‌ساز حرارتی خورشیدی پسیو، مکانیسم ترموسیفونی است که در آن به دلیل گرادیان چگالی واسط انتقال حرارت (جریان یافته به وسیله کلکتور خورشیدی) انرژی گرمایی حاصله به مخزن ذخیره‌سازی منتقل می‌شود. شماتیک ذخیره‌ساز حرارتی خورشیدی پسیو در شکل (۵-۶) آورده شده است. این سیستم از جمع‌کننده خورشیدی، مخزن، واحدهای هیدرونیک جهت گرمایش و بار تشکیل شده است [۱۰۳].

در زمان تابش خورشید، آب ورودی به جمع‌کننده خورشیدی، گرمای لازم را از انرژی خورشیدی تابش یافته دریافت می‌کند. آب گرم به دلیل گرادیان چگالی به سمت بالا حرکت می‌کند و به داخل مخزن جریان می‌یابد. به دلیل اثر طبقه‌بندی حرارتی در مخزن، آب درون آن گرم شده و در نتیجه انرژی حرارتی ذخیره می‌شود. آب سرد تولید شده به

دلیل اثر جاذبه به جمع‌کننده برمی‌گردد و چرخه مذکور تکرار می‌شود. بسته به نیاز حرارتی، سیال انتقال حرارت ثانویه (آب یا آب نمک) به درون مخزن ذخیره‌سازی جریان می‌یابد و انرژی ذخیره شده را تخلیه می‌کند.



شکل ۵-۶: شماتیک یک ذخیره‌ساز حرارتی خورشیدی پسیو

جدا از اجزای ساختمانی، ذخیره‌سازی گرمای محسوس با استفاده از پوشش‌های لعابدار ساختمانی نیز امکان‌پذیر است.

پوشش‌های لعابدار در به دام انداختن تابش خورشید و حفظ گرمای محیط داخل کاربرد دارند. با بکارگیری این پوشش‌ها دو مزیت ذیل حاصل می‌شود:

(۱) زیبایی ساختمان

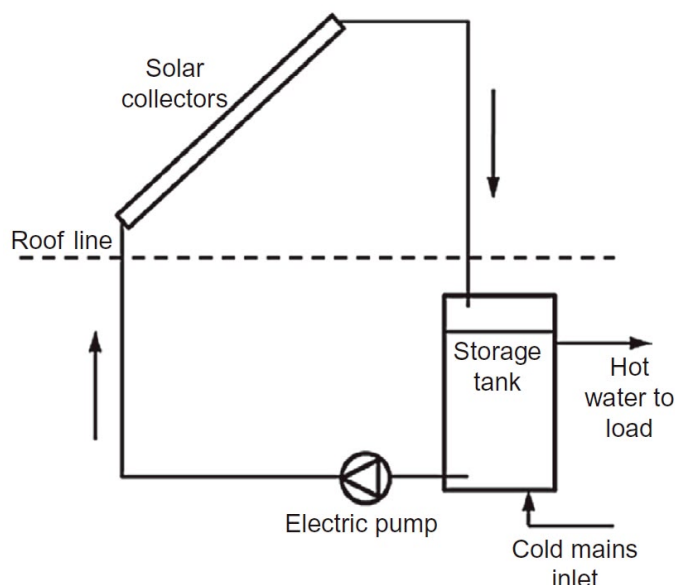
(۲) ذخیره‌سازی حرارتی

ساختمان‌های با پوشش لعابدار که سقف آنها با زاویه ۳۰ درجه به جهت جنوب قرار گرفته باشد به طور مؤثر از انرژی خورشیدی در طول روز استفاده می‌کنند. در صورت رعایت نسبت پوشش لعابدار به کل سطح بین ۷ تا ۱۰ درصد، بدون اینکه گرمای بیش از حدی در داخل ساختمان بوجود آید، انرژی حرارتی ناشی از تابش خورشید ذخیره می‌شود [۱۰۲].

۵-۲-۲-۶- ذخیره‌ساز حرارتی خورشیدی اکتیو (فعال)

در ذخیره‌ساز حرارتی خورشیدی اکتیو از یک تجهیز مکانیکی کمکی به منظور انتقال و ذخیره انرژی گرمایی مطابق شکل (۷-۵) استفاده می‌شود. همانطور که در شکل (۷-۵) نشان داده شده است، انرژی خورشیدی در ابتدا توسط صفحه جاذب یا جمع‌کننده خورشیدی از نوع لوله خلاء به دام می‌افتد. جریان واسط انتقال حرارت از طریق جمع‌کننده خورشیدی، امکان انتقال انرژی حرارتی از جمع‌کننده به مخزن را فراهم می‌کند. در ادامه، آب سرد برای چرخه بعدی به جمع‌کننده برگردانده می‌شود.

انرژی حرارتی که در مخزن ذخیره وجود دارد با انتقال حرارت ثانویه تخلیه می‌شود. گردش سیال به منظور انتقال حرارت و ذخیره انرژی گرمایی به وسیله یک پمپ انجام می‌پذیرد. برای دستیابی به سرعت بالاتر انتقال حرارت و ذخیره انرژی، استفاده از جمع‌کننده‌های سهموی و کانونی توصیه می‌شود.



شکل ۵-۷: شماتیک یک ذخیره‌ساز حرارتی خورشیدی اکتیو

صفحات جاذب یا جمع‌کننده‌های خورشیدی از نوع لوله خلاء از مشکلاتی همچون تلفات همرفتی و تابشی و استرس‌های حرارتی رنج می‌برند. علاوه بر این، دمای بالای ۸۵ درجه سانتیگراد می‌تواند برای آنها مضر باشد. به همین دلیل، انرژی خورشیدی که در هنگام تابش قابل حصول است، به طور کامل ذخیره نشده و مورد استفاده قرار نمی‌گیرد و در نتیجه پاسخگوی نیازهای گرمایشی یک ساختمان به طور کامل نیست [۱۰۲].

استفاده از جمع‌کننده‌های سهموی و کانونی می‌تواند مشکلات صدرالذکر را از میان بردارد. بخصوص آنکه با استفاده از این جمع‌کننده‌ها امکان رساندن دمای واسط انتقال حرارت به بیش از ۱۳۵ درجه سانتیگراد امکان‌پذیر است. مشابه پوشش‌های لعابدار، جمع‌کننده‌های سهمی یا کانونی می‌توانند با زاویه ۳۰ درجه نسبت به جنوب تراز شوند [۱۰۳]. به منظور تضمین عملکرد قابل قبول برای ذخیره‌ساز حرارتی خورشیدی، اطمینان از طبقه‌بندی بهینه دمایی در داخل مخزن و همچنین عایق بودن مخزن الزامی است.

۵-۲-۳- ذخیره‌سازی گرمای محسوس در دماهای بالا

ذخیره‌سازهای حرارتی گرمای محسوس با دمای بالا گزینه بسیار مناسبی برای تولید برق هستند. از انرژی حرارتی ذخیره شده در این روش برای تولید بخار با دمای بالا استفاده شده که نیروی محرکه یک توربین یا موتور جهت تولید برق است. منبع گرما در این روش نوع انرژی تجدیدپذیر است که با مواد مورد استفاده در ذخیره‌سازی گرمای

محسوس، سیستم ذخیره‌سازی گرمای محسوس در دمای بالا را تشکیل می‌دهد. با استفاده از روش‌های مدرن می‌توان راندمان حرارتی کلی سیستم ذخیره‌سازی گرمای محسوس با دمای بالا را تا حد قابل قبولی افزایش داد. برای دمای عملیاتی بالاتر از ۱۰۰ درجه سانتیگراد، انتخاب ماده ذخیره‌ساز گرما می‌تواند مایعات از جمله روغن یا نمک مذاب باشد. برای دمای کار بسیار بالا، (بالاتر از ۶۰۰ درجه سانتیگراد) انتخاب ماده ذخیره‌ساز می‌تواند جامدات از جمله بتن یا سرامیک باشد. بررسی فنی سیستم‌های ذخیره‌سازی گرمای محسوس با دمای بالا نیاز به درک عمیق از خواص مواد و تغییرات آنها در دما و فشارهای مختلف دارد [۱۰۲].

۵-۳- ذخیره‌سازی گرمای نهان

استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی گرمای نهان در ساختمان‌ها تا حد زیادی به ویژگی‌های تغییر فاز مواد مورد استفاده بستگی دارد. خاصیت ذاتی که موجب ذخیره‌سازی گرمای نهان می‌شود توانایی مواد در تغییر فاز در شرایط همدمای است.

تغییر فاز به چند حالت جامد-جامد، جامد-مایع، جامد-گاز، مایع-گاز و غیره قابل انجام است. در تغییر فاز جامد-جامد گرما به شکل تغییر ماده از یک حالت کریستالی به حالت کریستالی دیگر ذخیره می‌شود. این نوع تغییر فاز معمولاً گرمای نهان و تغییر حجم کمتری نسبت به حالت جامد-مایع دارد. در ذخیره‌سازی جامد-جامد شرایط نگهداری مواد ساده‌تر بوده و روش‌های طراحی سیستم از انعطاف لازم برخوردار است لکن انتقال حرارت بسیار کند بوده و پاسخگوی نیاز ذخیره‌سازی در زمان مناسب نیست. در حالت مقایسه، برای تغییر فاز جامد-مایع اغلب طراحی ظرف یا نگهدارنده دشوار است.

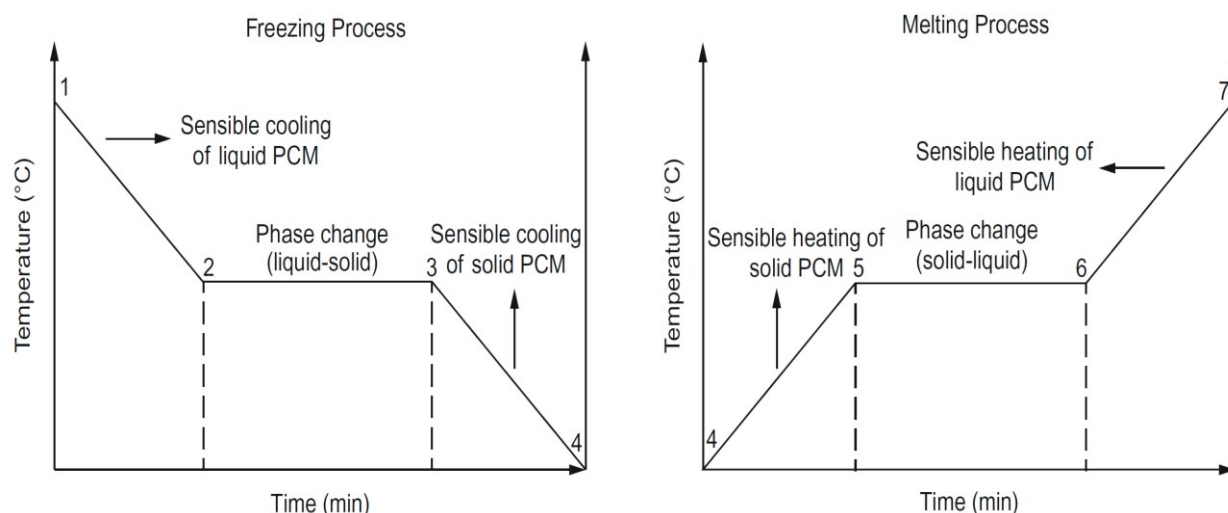
تغییر فازهای جامد-گاز و مایع-گاز اگرچه گرمای نهان زیادی دارند ولی تغییر حجم بالا ناشی از تغییر فاز در آنها مشکلاتی را در نگهداری به وجود می‌آورد و عملاً استفاده از آنها به همین دلیل امکان‌ناپذیر است. همچنین ذخیره انرژی حرارتی در آنها از قاعده مشخصی پیروی نمی‌کند. تغییر فاز مایع-گاز به طور عمده با تغییر زیاد آنتالپی همراه است، اما به دلیل ایجاد فشار زیاد در حجم ثابت و نیاز به فضای بزرگتر، برای تغییر فاز محدودیت دارد [۱۰۲].

تغییر فازهای جامد-مایع نسبت به مایع-گاز دارای گرمای نهان کمتر و همچنین دارای تغییر حجم کمتری (حدود ۱۰ درصد) می‌باشند لکن از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه هستند. استفاده از تغییر فاز جامد-مایع مواد، مناسب‌ترین روش ذخیره‌سازی گرما یا سرما است [۱۰۲].

مواد مورد نظر هنگامی که به پایین‌تر از دمای ذوب خنک می‌شوند، در دمای ثابتی شروع به انجماد (تبلور) می‌کند. پدیده مشابه زمانی اتفاق می‌افتد که این مواد در معرض دمایی بالاتر از نقطه ذوب خود قرار می‌گیرند.



نحوه انجماد یا ذوب شدن مواد ذخیره‌کننده انرژی حرارتی، مشخصات تغییر فاز آنها را مشخص می‌کند. در واقع در هنگام تغییر فاز، انرژی حرارتی به شکل گرمای نهان تفاضلی آزاد یا ذخیره می‌شود. برای درک بهتر، پدیده تغییر فاز یک ماده ذخیره‌کننده حرارت در شکل (۵-۸) نشان داده شده است [۱۰۲].



شکل ۵-۸: تغییرات دمایی ماده تغییر فازدهنده هنگام ذخیره‌سازی و آزادسازی انرژی حرارتی

در شکل ۵-۸ به وضوح دیده می‌شود که تغییر فاز در فرایند یخ زدن و ذوب شدن از سه مرحله تشکیل شده است. در فرایند انجماد (شارژ)، در گام اول درجه حرارت ماده کاهش می‌یابد (فرآیند ۱-۲). این مساله نشان دهنده خنک شدن محسوس ماده (در حالت مایع) با در نظر گرفتن واسط انتقال حرارت (خنک کننده) در اطراف آن می‌باشد. با تداوم خنک‌سازی، فاز ماده از مایع به جامد تغییر یافته بدون آنکه کوچکترین تغییری در دمای ماده ایجاد شود. (فرآیند ۲-۳). در این شرایط، انرژی حرارتی (سرمایشی) به شکل گرمای نهان از واسط انتقال حرارت به ماده ذخیره‌کننده انرژی حرارتی منتقل می‌شود. در ادامه دما دوباره شروع به کاهش بیشتر می‌کند (فرآیند ۳-۴)، که علت آن انتقال حرارت محسوس در ماده جامد با توجه به دمای واسط انتقال حرارت می‌باشد. هنگامی که تعادل حرارتی بین واسط انتقال حرارت و ماده ذخیره کننده برقرار می‌شود، دمای سیستم بدون تغییر باقی می‌ماند [۱۰۲].

در فرایند ذوب (دشارژ)، دمای ماده ذخیره‌کننده انرژی حرارتی در حالت جامد، به واسطه انتقال حرارت به واسط انتقال حرارت به تدریج افزایش می‌یابد (فرآیند ۴-۵) که در آن دمای واسط انتقال حرارت بالای دمای ذوب ماده ذخیره‌کننده حفظ می‌شود. در گام بعدی یک تغییر فاز جامد به مایع رخ می‌دهد که در نتیجه آن، انرژی سرمایشی ذخیره شده در ماده به واسط انتقال حرارت برگشت داده می‌شود (فرآیند ۵-۶). افزایش بیشتر دمای ماده ذخیره‌کننده انرژی حرارتی (حالت مایع) انتقال حرارت محسوس با واسط انتقال حرارت را به دنبال دارد که در نهایت منجر به شرایط تعادل حرارتی می‌گردد (فرایند ۶-۷).

به طور خلاصه، در طی فرآیند تغییر فاز (۲-۳ و ۵-۶) مقدار قابل توجهی از انرژی حرارتی در مواد ذخیره و آزاد می‌شود که متاثر از خصوصیات و شرایط ترموفیزیکی آنهاست [۱۰۲].

۵-۳-۱- انواع روش‌های ذخیره‌سازی گرمای نهان

اولین انتخاب برای بکارگیری سیستم‌های ذخیره‌سازی گرمای نهان، سیستم‌های سرمایش ساختمان‌ها است. با در نظر گرفتن کاربرد سرمایشی، سیستم‌های ذخیره‌سازی گرمای نهان به دو دسته سیستم‌های ذخیره‌ساز یخ و مواد تغییر فازدهنده (PCM^۱) تقسیم‌بندی می‌شوند. در سیستم‌های ذخیره‌ساز یخ از یخ (آب جامد) به شکل کریستال یا ماده آبکی استفاده می‌شود. مواد تغییر فازدهنده در سه گروه ارگانیک، غیرارگانیک و ترکیبات زود ذوب شونده (Eutectic Mixture) تقسیم‌بندی می‌شوند [۱۰۲].

در عمل سیستم‌های گرمای نهان مبتنی بر PCM بر سیستم‌های ذخیره‌ساز یخ ارجح هستند. دلیل این مساله خواص ترموفیزیکی بهتر این مواد است که موجب بروز ویژگی‌های مناسب تغییر فاز در چرخه‌های مکرر شارژ و تخلیه می‌شود. در حالت مقایسه، ظرفیت ذخیره انرژی در سیستم‌های گرمای نهان مبتنی بر PCM در مقایسه با سیستم‌های ذخیره‌سازی یخ پایین‌تر است (گرمای نهان ذوب یخ معادل با ۳۳۳ کیلوژول بر کیلوگرم) لکن بدلیل ظرفیت حجمی ذخیره‌سازی بالاتر مواد تغییر فازدهنده، این مواد در اولویت قرار می‌گیرند. علاوه بر اینها، PCM‌های ارگانیک از خواص ترموفیزیکی عالی، انجماد و ذوب متناوب، پایداری حرارتی، عدم خوردگی و قابلیت اطمینان بالا برخوردار بوده که سهولت در جنبه‌های عملیاتی و نگهداری را به همراه دارد [۱۰۶-۱۰۷].

۵-۳-۲- مواد مورد استفاده در سیستم‌های ذخیره‌سازی گرمای نهان و ویژگی‌های آنها

مواد مورد استفاده در سیستم‌های ذخیره‌سازی گرمای نهان (بخصوص PCM‌ها) باید از ویژگی‌های مشخص ترموفیزیکی، شیمیایی، جنبشی و اقتصادی برخوردار باشند. این ویژگی‌ها عبارتند از [۱۰۷]:

۱- ویژگی‌های ترموفیزیکی شامل:

- ❖ دمای ذوب در محدوده دمای کارکرد
- ❖ گرمای نهان ذوب بالا با توجه به حجم
- ❖ ظرفیت گرمایی ویژه بالا که امکان ذخیره حرارت اضافی را از طریق گرمای محسوس فراهم می‌کند.
- ❖ هدایت حرارتی بالا در فازهای جامد و مایع به منظور بهتر نمودن انتقال حرارت
- ❖ بازتولید در انجماد و ذوب متناوب برای کل چرخه عملیاتی
- ❖ تغییرات کم در ظرفیت حجمی و فشار بخار تا حد ممکن با توجه به دمای کارکرد

۲- خصوصیات جنبشی شامل:

- ✓ هسته‌زایی سریع، رشد و تفکیک هسته‌های پایدار در طی فرآیندهای انجماد و ذوب در دمای ثابت
- ✓ درجه نسبتاً کم فوق تبرید (Super Cooling)

^۱ Phase Change Materials



✓ انتقال حرارت مؤثر در دوره های شارژ و تخلیه برای ذخیره‌سازی و رهاسازی انرژی حرارتی در شرایط همدمای

۳- خواص شیمیایی عبارتند از :

- ضد خوردگی
- پایداری شیمیایی و حرارتی به منظور مقاومت در برابر گرما در دمای بالا
- قابلیت اطمینان حرارتی بالا در بازه زمانی بلند مدت
- غیرسمی، غیرقابل اشتعال و غیرقابل انفجار بودن

۴- ویژگی‌های اقتصادی شامل :

- ✚ سهولت دسترسی
- ✚ اثربخشی هزینه
- ✚ سهولت در بازیافت و تعمیر

۵- ویژگی‌های زیست محیطی :

♦ دوستدار محیط زیست

خصوصیات حرارتی برخی از مواد رایج مورد استفاده در ذخیره‌سازی گرمای نهان در جدول (۳-۵) آورده شده است. در جدول مذکور جرم نسبی و حجم نسبی در مقایسه با PCM‌های غیرارگانیک محاسبه شده است. برای سنگ و آب نیز اختلاف دما برابر ۱۵ درجه کلون می‌باشد [۱۰۷].

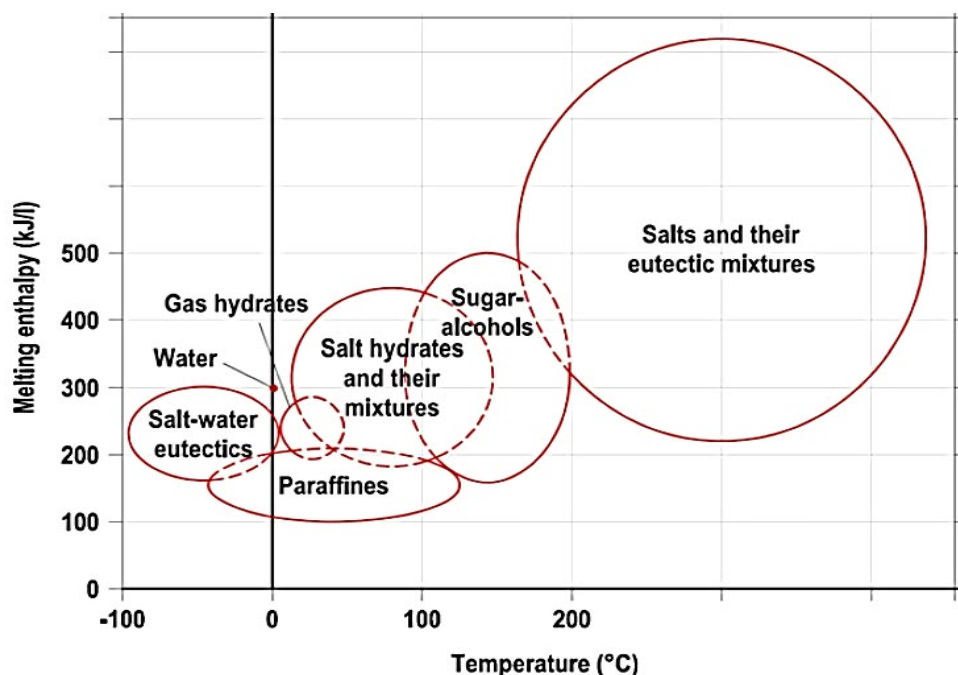
جدول ۳-۵: مواد رایج مورد استفاده در ذخیره‌سازی گرمای نهان و مشخصات ترموفیزیکی آنها

نام ماده	چگالی (Kg/m ³)	ظرفیت گرمایی ویژه (kJ/kg.K)	گرمای نهان جرمی (kJ/kg)	گرمای نهان جرمی (MJ/m ³)	جرم نسبی ذخیره‌ساز	حجم نسبی ذخیره‌ساز
سنگ	۲۲۴۰	۱	-	-	۱۵	۱۱
آب	۱۰۰۰	۴,۲	-	-	۴	۶
PCM‌های ارگانیک	۸۰۰	۲	۱۹۰	۱۵۲	۱,۲۵	۲,۵
PCM‌های غیرارگانیک	۱۶۰۰	۲	۲۳۰	۳۶۸	۱	۱

۵-۳-۲-۱- انواع مواد تغییر فازدهنده و ویژگی‌های آنها

همانگونه که در قسمت‌های قبلی نیز ذکر شد، مواد تغییر فازدهنده در سه گروه ارگانیک، غیرارگانیک و ترکیبات زود ذوب شونده (Eutectic Mixture) تقسیم‌بندی می‌شوند. هر گروه، بازه دمایی و آنتالپی ذوب خاص خود را دارد. موم‌های پارافین، هیدرات‌های نمکی، اسیدهای چرب و ترکیبات زود ذوب شونده ارگانیک- غیرارگانیک بیشترین استفاده را طی

۳۰ سال اخیر داشته‌اند. رابطه بین آنتالپی و دمای ذوب PCM در شکل (۵-۹) نشان داده شده است. این خصوصیات در استفاده و کاربرد مواد تغییر فازدهنده بخصوص در بخش ساختمان اهمیت بسیار دارند [۱۰۸].



شکل ۵-۹: رابطه بین آنتالپی و دمای ذوب PCM ها در گروه‌های مختلف

۵-۳-۱-۲-۱-۱- مواد تغییر فازدهنده ارگانیک

PCM های ارگانیک در دو گروه پارافینی و غیرپارافینی تقسیم‌بندی می‌شوند. در گروه دوم اسیدهای چرب، استر، الکل‌ها، گلیکول‌ها و غیره قرار می‌گیرند. خاصیت‌های PCM های ارگانیک، آنها را به گزینه‌ای مناسب جهت استفاده در ساختمان‌ها تبدیل می‌سازد. بازه دمایی وسیع، پایداری شیمیایی، عدم خوردگی و سمی نبودن از جمله خواص این مواد بشمار می‌روند. با مقدار کم یا بدون انجام عملیات فوق تبرید، این مواد منجمد می‌شوند. مواد مذکور افتراق‌ناپذیر بوده و گرمای ذوب بالا و نرخ هسته‌زایی مناسبی دارند. با این وجود، بیشتر PCM های ارگانیک در دماهای بالا به دلیل وجود پیوندهای کووالانسی پایدار نیستند. در حالت مقایسه، چگالی این مواد کمتر از چگالی مواد غیرارگانیک همچون آب و هیدرات‌های نمکی است [۱۰۸].

برای مواد پارافینی، بازه دمایی بین ۲۰ تا ۷۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. این گروه از مواد هدایت حرارتی پایینی دارند که کاربرد آنها را محدود می‌سازد. طی سیکل انجماد اگر نرخ انتقال حرارت بالا مورد نیاز باشد استفاده از مواد پارافینی با مشکلاتی همراه بوده و امکان‌پذیر نخواهد بود. علاوه بر این‌ها، مواد پارافینی حین تغییر فاز با تغییرات بسیار زیاد در حجم روبرو هستند. علی‌رغم تولید این گروه از مواد تغییر فازدهنده توسط سازندگان مختلف و عرضه آن به صورت

فراوان، همچنان قیمت پارافین‌ها از هیدرات‌های نمکی بیشتر بوده و گران بشمار می‌آیند. پارافین بیشترین کاربرد تجاری را در میان مواد تغییر فازدهنده ارگانیک دارد [۱۰۸].

اسیدهای چرب که با فرمول کلی $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$ شناخته می‌شوند ویژگی‌هایی شبیه پارافین‌ها داشته و در سیکل‌های شارژ و دشارژ پایدار هستند. ترکیبات مختلف از اسیدهای چرب رسیدن به دمای ذوب بین ۲۰ تا ۳۰ درجه سانتیگراد با دقت نیم درجه را امکان‌پذیر می‌سازد [۱۰۸].

۵-۳-۲-۱-۲- مواد تغییر فازدهنده غیرارگانیک

PCM‌های غیرارگانیک در دو گروه هیدرات‌های نمکی و فلزی تقسیم‌بندی می‌شوند. این مواد هدایت حرارتی خوب و گرمای نهان ذوب بالایی دارند، گران نبوده و غیر قابل اشتعال نیز هستند. چالش استفاده از این مواد، سازگاری آنها با فلزات و در نتیجه خوردگی است که قابلیت افزایش دارد. PCM‌های غیرارگانیک به ظرف یا حامل یا بستر نیاز دارند و بنابر این آنها را نمی‌توان به صورت مستقیم در خلل و فرج مصالح ساختمانی بارگذاری کرد [۱۰۸].

گزینه جذاب در میان مواد تغییر فازدهنده غیرارگانیک، هیدرات‌های نمکی است. این مواد چگالی ذخیره بالا (۲۴۰ کیلوژول بر کیلوگرم)، تغییر حجم کم در حین تغییر فاز و هدایت حرارتی نسبتاً بالایی دارند. نقطه ضعف این گروه از مواد غیرارگانیک، فوق تبرید، تفکیک‌پذیری و خوردگی آنهاست [۱۰۸].

شایان ذکر است PCM‌های غیرارگانیک فلزی، با توجه به بازه دمایی خود قابلیت کاربرد در بخش ساختمان را ندارند.

۵-۳-۲-۳- مواد تغییر فازدهنده زود ذوب شوند

ترکیبات زود ذوب‌شونده، ترکیباتی از جامدات مختلف به منظور رسیدن به خواص بهتر همچون گرمای نهان ذوب بالاتر و یا نقطه ذوب مشخص جهت کاربردی خاص هستند. افتراق‌ناپذیری ویژگی عمده این مواد است. با توجه به ترکیبات مورد استفاده، این گروه از مواد در سه دسته ارگانیک- غیرارگانیک- ارگانیک و غیرارگانیک- غیرارگانیک تقسیم‌بندی می‌شوند [۱۰۸].

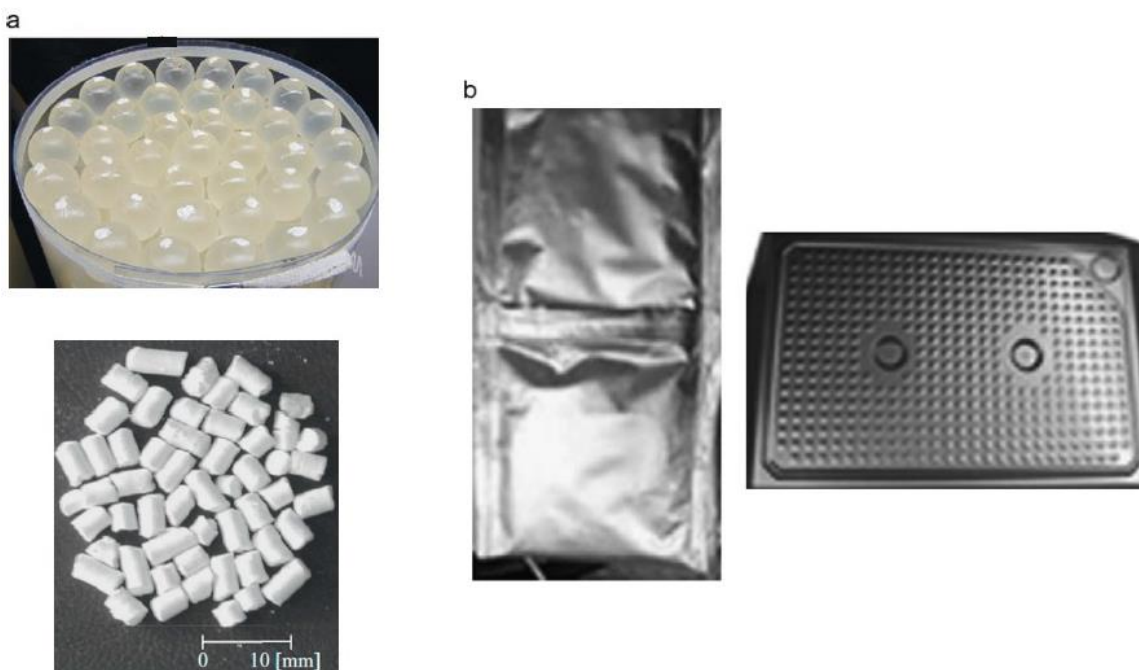
۵-۳-۲-۲- فرم‌های گوناگون مواد تغییر فازدهنده

مواد تغییر فازدهنده در سه فرم ماده خام، میکرو و ماکرو می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. اما از آنجا که کاربرد این مواد به صورت خام با توجه به نوع ماده تغییر فازدهنده می‌تواند معایبی در پی‌داشته باشد و نیز با توجه به قابلیت جاری شدن مواد تغییر فازدهنده در فاز مایع، نیاز به محفظه‌هایی خواهد بود که در فاز مایع به عنوان ظرف یا حامل حاوی این مواد عمل نماید [۱۰۲].

معمولاً مواد تغییر فازدهنده به صورت بسته‌هایی از دو نوع میکرو و ماکرو در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. جهت تهیه هر دو نوع میکرو و ماکرو، مواد تغییر فازدهنده درون محفظه‌هایی تعبیه شده و اصطلاحاً کپسوله

می‌شوند. به این ترتیب تفاوت عمده میان دو روش میکروکپسول و ماکروکپسول در اندازه محفظه‌ها یا کپسول‌های مورد استفاده است.

در روش میکروکپسول مواد در کره‌های بسیار ریزی با قطر بین ۱ تا ۳۰ میکرومتر تعبیه می‌شوند. در روش ماکروکپسول مواد در محفظه‌های بزرگتری به صورت پاکت یا ظروف از جنس‌های مختلف جاسازی می‌شوند. عمده این محفظه‌ها از جنس پاکت‌های پلاستیکی و نیز پنل‌های سخت ساخته شده از پلی‌اتیلن با چگالی بالا هستند. شکل (۵-۱۰) نمونه‌هایی از مواد تغییر فازدهنده را به صورت میکروکپسول (a) و ماکروکپسول (b) نشان می‌دهد [۱۰۲].



شکل ۵-۱۰: نمونه‌هایی از مواد تغییر فازدهنده به صورت میکروکپسول (a) و ماکروکپسول (b)

۵-۳-۳- سیستم‌های ذخیره‌سازی گرمای نهان پسیو (غیرفعال)

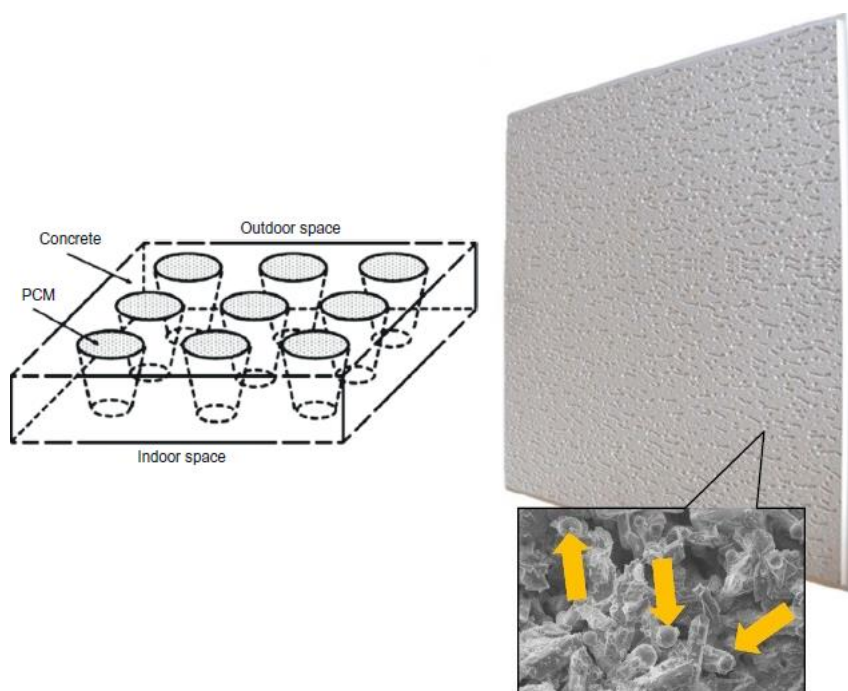
سیستم‌های ذخیره‌سازی گرمای نهان پسیو، همرفتی طبیعی را به عنوان مد کاری موثر جهت انتقال حرارت بکار برده و با استفاده از آن نوسانات دمایی در محیط داخل را از بین می‌برند. در این سیستم‌ها، مواد تغییر فازدهنده به عنوان مصالح ساختمانی یا بخشی از آنها حضور دارد و در تبادل گرما یا سرما بسته به تغییرات فصول ایفای نقش می‌کنند. در ادامه به توضیح انواع مختلف این سیستم‌ها پرداخته می‌شود.

۵-۳-۳-۱- سیستم‌های ذخیره‌سازی گرمای نهان پسیو با استفاده از PCM‌های بارگذاری شده در مصالح ساختمانی

مواد تغییر فازدهنده را می‌توان به صورت میکروکپسول‌های تعبیه شده درون سایر مصالح ساختمانی بکار برد. جنس میکروکپسول‌ها جهت استفاده در مواد ساختمانی باید به گونه‌ای انتخاب شود که در مقابل نیروهای مکانیکی، گرما و بسیاری از مواد شیمیایی مقاوم باشد. با توجه به اندازه بسیار ریز میکروکپسول‌ها، می‌توان این مواد را در انواع مواد

ساختمانی دارای خلل و فرج در حین تولید ملات و به عنوان مواد افزودنی استفاده نمود. از جمله موارد کاربرد به این صورت، می‌توان به استفاده در بتن دیوارها و سقف و یا تخته‌های گچ حاوی این مواد اشاره نمود [۱۰۲]. یکی از محصولات تولید شده از مواد تغییر فازدهنده، محصولی از دانه‌های پارافین محصور شده در یک پلیمر است که می‌تواند به صورت میکروکپسول‌هایی با قطر حدود ۵ میکرون با گچ یا بتن مخلوط شود. این مخلوط را می‌توان در گچ اسپری استفاده کرد. دیواری با ضخامت ۳ سانتیمتر ساخته شده از این محصول، دارای جرم حرارتی مشابه با دیوار ۸ سانتیمتری بتنی و دیوار ۱۳ سانتیمتری آجری است. از مزایای این روش، سهولت استفاده و از جمله معایب آن هزینه بالای تولید میکروکپسول‌ها می‌باشد. شکل (۵-۱۱) شماتیک استفاده از مواد تغییر فازدهنده در جداره و پوشش ساختمان را نشان می‌دهد [۱۰۴].

شایان ذکر است استفاده از ترکیب‌های رنگی حاوی میکروکپسول‌های PCM (رنگدانه‌های MPCM) در سطوح بیرونی ساختمان موجبات حفظ آسایش حرارتی شده و تنظیم درجه حرارت را به دنبال دارد. در این حالت رنگ اصلی با رنگدانه‌های MPCM که قطر آنها از ۱۷ تا ۲۰ میکرومتر است، مخلوط شده و سپس مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۰۲].



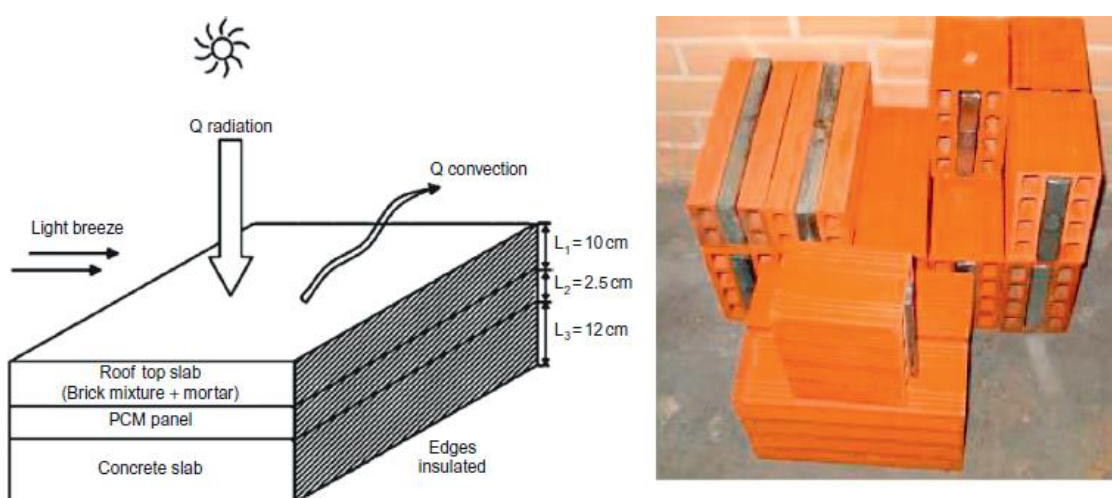
شکل ۵-۱۱: شماتیک استفاده از مواد تغییر فازدهنده در جداره و پوشش ساختمان

۵-۳-۲- سیستم‌های ذخیره‌سازی گرمای نهان پسیو با استفاده از PCM ها به عنوان مصالح ساختمانی

در این سیستم‌ها، مواد تغییر فازدهنده به صورت ماکروکپسول‌هایی به صورت یکی از اجزای اصلی ساختمان جداره، سقف، پنجره و غیره به کار می‌رود. در این حالت اجزای ساختمان به عنوان توده حرارتی ساختمان با ایجاد سرمایش ایستا حرارت مازاد داخلی را جذب، ذخیره و آزاد کرده و سبب ایجاد آسایش حرارتی می‌شوند. این روش با توجه به هزینه بالای تولید میکروکپسول‌ها و با هدف کم هزینه‌تر شدن توسعه یافته است. در صورت استفاده از این روش، امکان

استفاده از PCM ها در فضاهای کوچک همچون خلل و فرج مصالح از بین رفته و لذا به فضاهای بزرگتری برای جا دادن این مواد نیاز خواهد بود. از جمله موارد کاربرد بدین صورت، می‌توان به پنل‌های مهار شده با فرم‌های فلزی بین جداره‌ها یا در پوشش سقف اشاره نمود [۱۰۲].

علاوه بر آنچه که گفته شد می‌توان از پاکت‌های حاوی مواد تغییر فازدهنده در فواصل میانی مصالح ساختمان استفاده کرد. آجرهای ترکیبی ساخته شده با مواد تغییر فازدهنده و مواد تغییر فازدهنده ترکیب شده با عایق‌های حرارتی از جمله این نمونه‌ها هستند شکل (۵-۱۲) شماتیک استفاده از PCM ها در سقف و آجرهای حفره‌دار را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱۲: شماتیک استفاده از PCM ها در سقف و آجرهای حفره‌دار

بسیاری از مواد تغییر فازدهنده دارای شفافیت بسیار بالایی برای نور مرئی هستند و این در حالی است که بخش مادون قرمز نور را جذب می‌نمایند. این خاصیت به آنها قابلیت استفاده در شیشه‌های ساختمان را می‌دهد. شکل (۵-۱۳) پنجره‌ای را نشان می‌دهد که از دو لایه شیشه همراه با مواد تغییر فازدهنده در میان آن تشکیل شده است، در تابستان با زاویه زیاد ارتفاع خورشید، بیشتر امواج نور خورشید منعکس می‌شوند و به سرد شدن ساختمان کمک می‌شود و در زمستان امواج با زاویه ارتفاع پایین‌تر جذب مواد تغییر فازدهنده شده و با ذوب این مواد انرژی حرارتی خورشید جذب و مایعی شفاف برای دید و منظره مناسب تولید می‌شود [۱۰۲].



شکل ۵-۱۳: استفاده از مواد تغییر فازدهنده در فضای بین شیشه‌های یک ساختمان

مواد تغییر فازدهنده را می‌توان در تولید عایق‌های شفاف نیز بکار برد. از آنجا که مواد تغییر فازدهنده شفاف معمولاً هدایت حرارتی کمی دارند، می‌توانند به عنوان عایق مناسب پنجره‌های ساختمان در مقابل شیشه‌ها قرار گرفته و با توجه به شفافیت خود بدون مسدود نمودن نور، اثرات نامطلوب سطوح شیشه‌ای را بر میزان مصرف انرژی ساختمان کاهش دهند.

۵-۳-۴- سیستم‌های ذخیره‌سازی گرمای نهان اکتیو (فعال)

با ایجاد همرفتی اجباری بین مواد تغییر فازدهنده و واسط انتقال حرارت، خواص انتقال گرمای نهان مواد مذکور به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش خواهد یافت. این پدیده که با استفاده از فن یا دمنده و سیستم پمپاژ بوجود می‌آید اساس کار سیستم‌های ذخیره‌سازی گرمای نهان اکتیو را تشکیل می‌دهد. در حالت مقایسه، به دلیل عملکرد پویا و دینامیک سیستم‌های ذخیره‌سازی گرمای نهان اکتیو تحت شرایط متغیر بار حرارتی، بازده انتقال حرارت و اثربخشی انرژی این سیستم‌ها در مقایسه با سیستم‌های پسیو بیشتر است. سیستم‌های ذخیره‌ساز گرمای نهان اکتیو در چهار گروه اصلی ذیل طبقه‌بندی می‌شوند [۱۰۲]:

۱- سیستم‌های سرمایش آزاد مبتنی بر PCM

۲- سیستم‌های سرمایش آسایشی مبتنی بر PCM

۳- سیستم‌های ذخیره‌سازی یخ

۴- سیستم‌های آب سرد مبتنی بر PCM

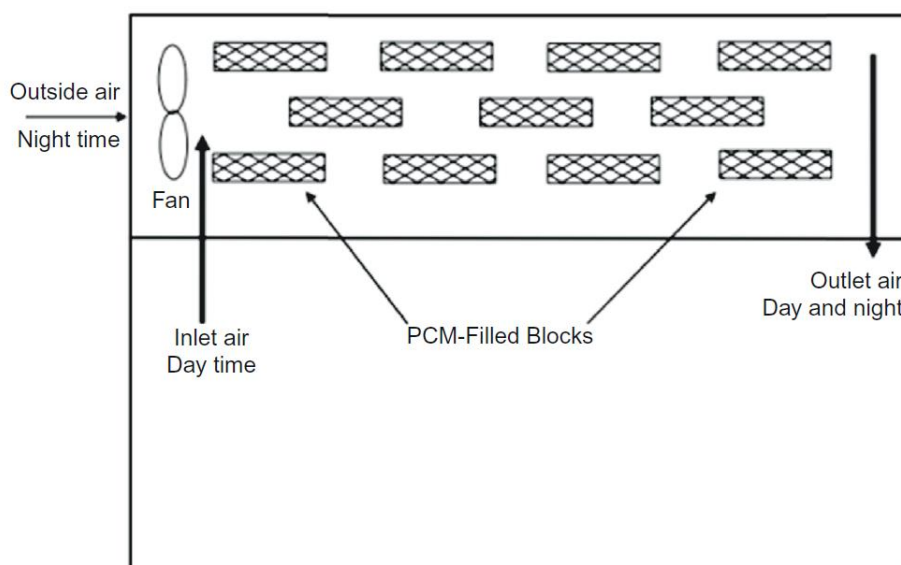


۵-۳-۴-۱- سیستم‌های سرمایش آزاد مبتنی بر PCM

برای ساختمان‌هایی که در مناطق سرد آب و هوایی قرار دارند و شرایط محیطی در تعادل با مشخصه‌های آسایش در محیط داخلی است، استفاده از سیستم‌های سرمایش آزاد مبتنی بر PCM، تکنیک موثری جهت تامین سرمایش خواهد بود.

در سیستم‌های سرمایش آزاد مبتنی بر PCM، هوای محیط با دمای کم در شب به صورت اجباری از روی مواد تغییر فازدهنده عبور می‌کند. به واسطه عمل انجام شده، انجماد (شارژ) صورت پذیرفته و سرمایش به طور موثر در مواد تغییر فازدهنده ذخیره می‌شود. از آنجا که مواد تغییر فازدهنده انتخابی در سیستم‌های مذکور، دمای ذوب بالاتری نسبت به دمای محیط دارند، این مواد با عبور هوای سرد از روی آنها منجمد می‌شوند [۱۰۲].

در طول روز با عبور هوای داخل با دمای بالاتر از دمای مواد تغییر فاز دهنده، انرژی سرمایشی ذخیره شده در مواد تغییر فازدهنده توسط این هوا بازیابی شده و مواد مذکور دشارژ می‌شوند. هوای برگشتی در محیط داخل به گردش درآمده و نیاز سرمایشی محیط را تامین می‌کند. با استفاده از سیستم‌های سرمایش آزاد مبتنی بر PCM، بار پیک روزانه عملاً به شب منتقل می‌شود. شماتیک نحوه کار سیستم‌های مذکور در شکل (۵-۱۴) آورده شده است. در سیستم مذکور بسته‌های PCM در سقف ساختمان قرار گرفته‌اند [۱۰۲].



شکل ۵-۱۴: شماتیک نحوه کار سیستم‌های سرمایش آزاد مبتنی بر PCM با قرار گرفتن PCM ها در سقف ساختمان

عملکرد حرارتی سیستم‌های سرمایش آزاد مبتنی بر PCM از جهت نرخ شارژ و دشارژ به خواص ترموفیزیکی همچون هدایت حرارتی، دمای تغییر فاز، گرمای نهان ذوب، دمای فوق تبرید، دمای هوای محیط و نرخ جریان هوا بستگی دارد. در حالت کلی، سیستم‌های اجرا شده از این نوع عملکرد خوبی داشته و برای ساختمان‌هایی که دمای محیط اطراف آنها

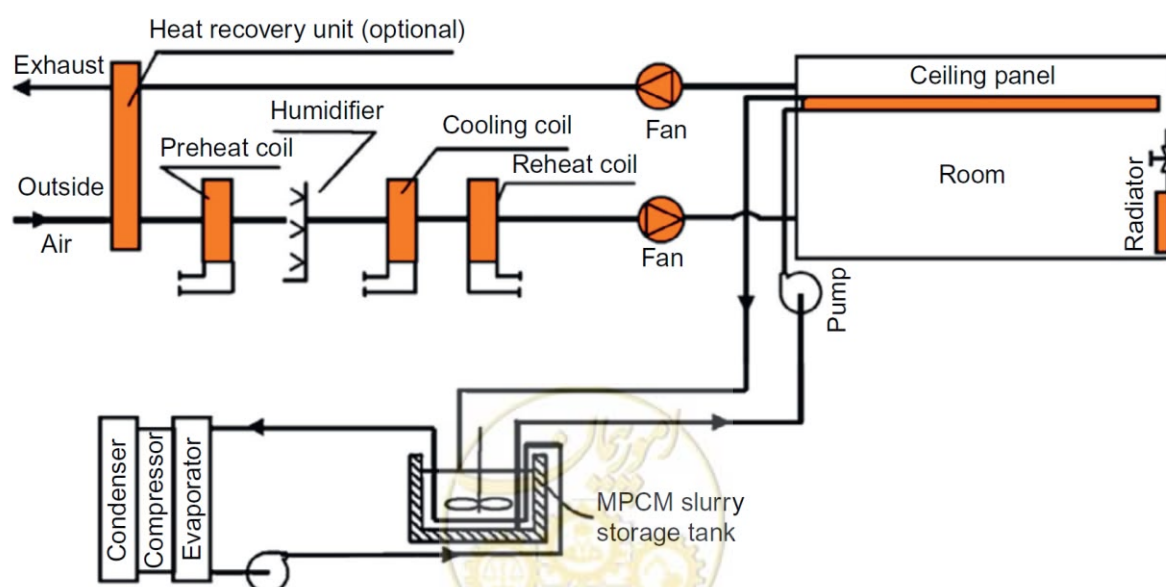
در شب‌های زمستانی بین ۲۰ تا ۲۳ درجه سانتیگراد و در روزهای تابستانی حداکثر ۳۰ درجه سانتیگراد است، مناسب هستند.

۵-۳-۴-۲- سیستم‌های سرمایش آسایشی مبتنی بر PCM

استفاده از میکروکپسول‌های تغییر فازدهنده آبکی در سیستم‌های سرمایش تابشی سقفی مورد استقبال زیادی قرار گرفته است. شماتیک این سیستم‌ها که با عنوان سیستم‌های سرمایش آسایشی مبتنی بر PCM شناخته می‌شوند در شکل (۵-۱۵) آورده شده است.

تجهیز اصلی در سیستم‌های سرمایش آسایشی مبتنی بر PCM، چیلر است. این تجهیز آب خنک با دمایی بین ۱۴ تا ۱۶ درجه سانتیگراد (دمای طراحی کویل خنک کننده) را تولید می‌کند. ماده تغییر فازدهنده مورد استفاده در سیستم، هگزادکان (یک ماده تغییر فازدهنده ارگانیک) با فرمول شیمیایی $C_{16}H_{34}$ است. دمای تغییر فاز این ماده ۱۸ درجه سانتیگراد و گرمای نهان ذوب آن ۲۲۲ کیلوژول بر کیلوگرم می‌باشد [۱۰۶].

در شرایط کار نرمال، هوای خروجی توسط چیلر و تجهیزات وابسته خنک شده و سرمایش مورد نیاز ساختمان تامین می‌گردد. در هنگام شب و با خنک شدن هوای محیط، نیاز سرمایشی در داخل ساختمان کاهش یافته و فرصت مناسبی فراهم می‌شود تا سرمایش ایجاد شده در پنل‌های مورد استفاده در سقف ساختمان (مجهز به ماده تغییر فازدهنده آبکی) ذخیره شود. انرژی سرمایشی ذخیره شده در طول روز و بهنگام ایجاد بار سرمایشی قابل استفاده خواهد بود. ضمن آنکه ماده تغییر فازدهنده آبکی از طریق یک مخزن و پمپ متصل به آن تامین می‌شود و قابلیت تغییر فاز و دمای آن در صورت نیاز از طریق یک سیستم تبرید مجزا فراهم است. بنابر این چیلر یا خنک کننده سیستم توسط یک سیستم تبرید ثانویه (سیستم تبرید ماده تغییر فازدهنده آبکی) پشتیبانی می‌شود [۱۰۶].



شکل ۵-۱۵: شماتیک نحوه کار یک سیستم سرمایش آسایشی مبتنی بر PCM با استفاده از ماده تغییر فازدهنده آبکی

پرواضح و مبرهن است که عملکرد سیستم صدرالذکر به توزیع بار بین چیلر و سیستم تبرید ثانویه بستگی دارد و بهره‌گیری از محاسبات دقیق می‌تواند بسیار تاثیرگذار باشد. تخمین‌ها حاکی از آن است که استفاده از سیستم‌های سرمایش آسایشی مبتنی بر PCM به جای سیستم‌های خنک‌سازی متداول (به عنوان مثال چیلر به همراه آب به عنوان واسط انتقال حرارت) می‌تواند تا ۳۳ درصد صرفه‌جویی در مصرف برق روزانه را به همراه داشته باشد که این مقدار صرفه‌جویی به صورت سالانه بسیار زیاد و قابل توجه است [۱۰۲].

۵-۳-۴-۳- سیستم‌های ذخیره‌سازی یخ

سیستم‌های ذخیره‌سازی یخ در مقایسه با سایر سیستم‌های ذخیره‌سازی گرمای نهان اکتیو قدمت بیشتری داشته و مدت زمان زیادی است که مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سیستم‌ها بسته به مد کارکرد (کامل یا جزئی)، نوع واسط انتقال حرارت و مشخصات شارژ و دشارژ خود، نیازهای سرمایشی ساختمان‌ها را برآورده می‌سازند.

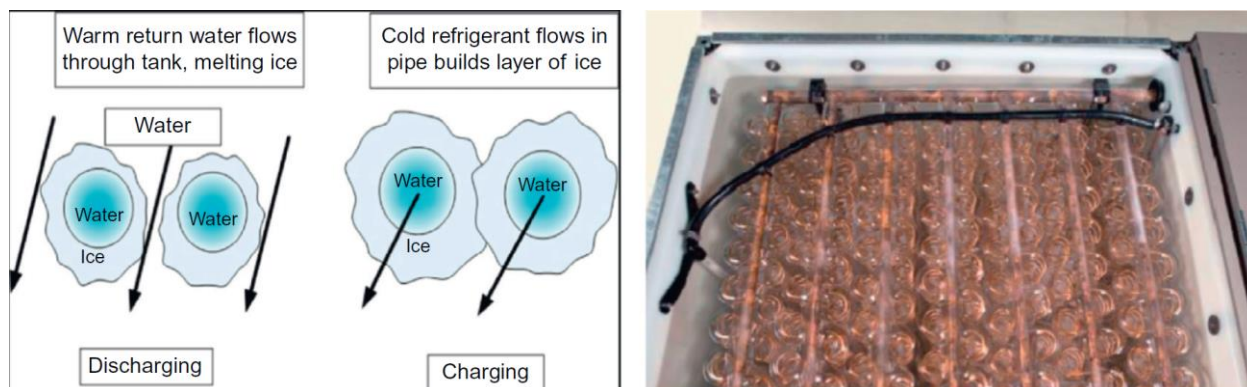
سیستم‌های ذخیره‌سازی یخ ترکیبی از یک چیلر اولیه به همراه مخزن ذخیره آب هستند که آب را سرد نموده و تبدیل به یخ می‌کنند. در حالتی که آب به یخ تبدیل می‌شود، انرژی سرمایشی ذخیره (شارژ) و در حالتی که یخ به آب تبدیل می‌شود، انرژی سرمایشی آزاد (دشارژ) می‌شود [۱۰۲].

با گردش واسط انتقال حرارت (آب نمک، آب یا مبرد) در کویل‌های سرماساز تعبیه شده در مخزن، فرایندهای شارژ و دشارژ صدرالذکر شروع می‌شوند. در حالت شارژ، آب موجود در مخزن که با کویل‌های سرماساز در تماس است، انرژی سرمایشی را از واسط انتقال حرارت موجود در کویل گرفته و شروع به یخ زدن می‌کند. در حالت دشارژ، انرژی سرمایشی از یخ تشکیل شده بازپس گرفته شده و به واسط انتقال حرارت موجود در کویل‌های سرماساز برمی‌گردد تا نیاز سرمایشی ساختمان را تامین نماید. سیستم‌های ذخیره‌ساز یخ به پنج گروه تقسیم‌بندی شده که در ادامه معرفی خواهند شد.

۵-۳-۴-۳-۱- سیستم ذخیره‌ساز ذوب از خارج یخ روی کویل یخ

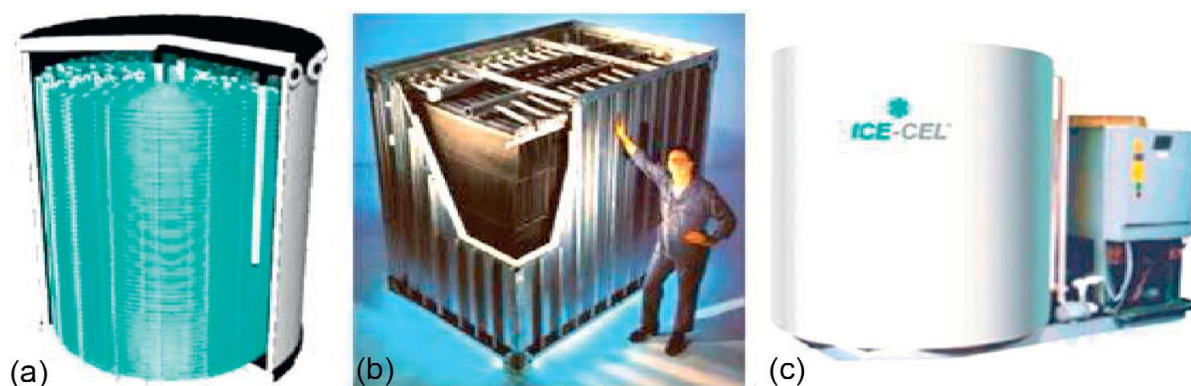
در سیستم‌های ذخیره‌ساز ذوب از خارج یخ روی کویل، انرژی سرمایشی ذخیره شده، بواسطه ذوب و تغییر فاز یخ تشکیل شده در سطح خارجی کویل‌های سرماساز بازیافت شده و توسط سیالی که از روی آن عبور داده شده و قرار است سرد شود مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این توصیف، انتقال حرارت در فاز شارژ این ذخیره‌ساز با تماس غیرمستقیم و در فاز دشارژ آن با تماس مستقیم خواهد بود. شماتیک این پدیده و تصویری از یک سیستم نمونه در شکل (۵-۱۶) آورده شده است [۱۰۲].





شکل ۵-۱۶: شماتیک شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز ذوب از خارج یخ روی کویل به همراه تصویری از یک نمونه موجود

ضخامت یخ تشکیل شده بر روی کویل‌ها بستگی به دمای واسط انتقال حرارت موجود در آنها دارد. ضخامت یخ تشکیل شده به صورت تیپیکال بین ۴۰ تا ۶۵ میلیمتر است. برای داشتن ضخامت کمتر دمای شارژ واسط انتقال حرارت بین ۳- تا ۷- درجه سانتیگراد و برای داشتن ضخامت بیشتر دمای مذکور بین ۹- تا ۱۲- درجه سانتیگراد حفظ می‌شود. طراحی مخزن ذخیره‌ساز نقش مهمی در کامل بودن فرایندهای انجماد و ذوب آب به عنوان ماده تغییر فازدهنده دارد و نسبت‌های تجربی بدست آمده باید رعایت شود. شکل (۵-۱۷) ساختارهای متفاوت از سیستم ذخیره‌ساز ذوب یخ خارجی که توسط سازندگان مختلف ارائه می‌شود را نشان می‌دهد [۱۰۲].

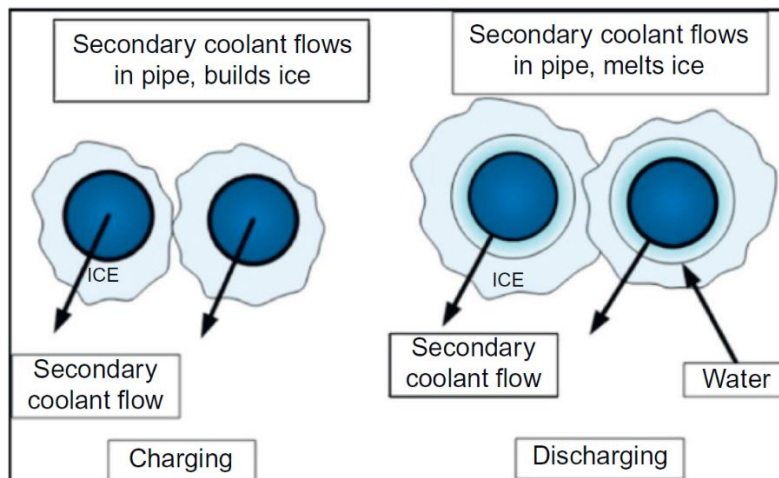


شکل ۵-۱۷: ساختارهای متفاوت از سیستم ذخیره‌ساز ذوب از خارج یخ روی کویل ارائه شده توسط شرکت‌های سازنده

۵-۳-۴-۳-۲- سیستم ذخیره‌ساز ذوب از داخل یخ روی کویل

در سیستم‌های ذخیره‌ساز ذوب از داخل یخ روی کویل، واسط انتقال حرارت (آب نمک، گلیکول یا مبرد) در کویل تعبیه شده در مخزن جریان یافته و فرایندهای شارژ و دشارژ با تشکیل آب و یخ در داخل مخزن صورت پذیرفته و سیال دیگری نیز وجود ندارد. شماتیک این پدیده در شکل (۵-۱۸) آورده شده است [۱۰۲].





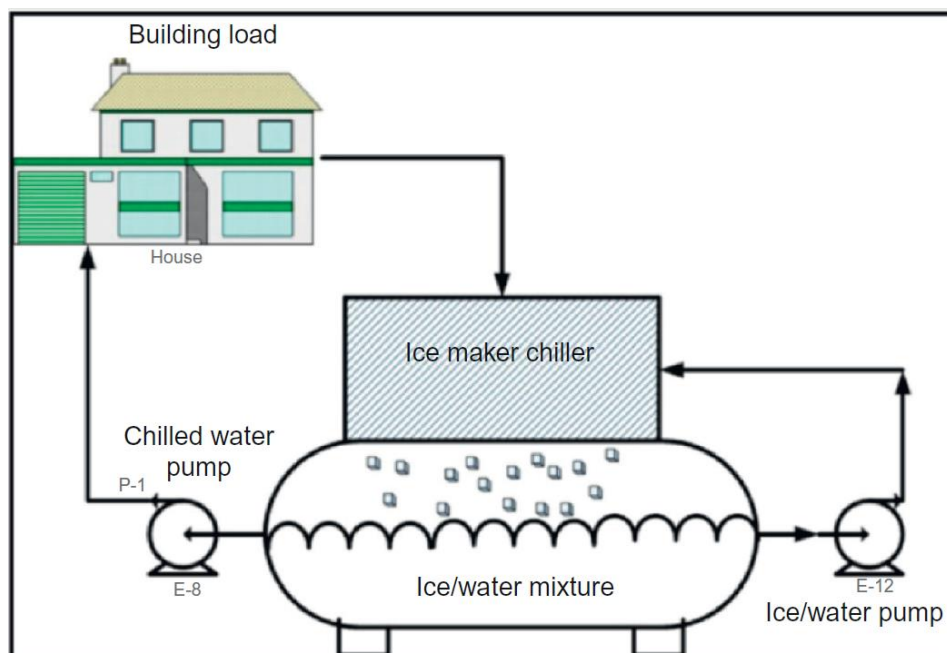
شکل ۵-۱۸: شماتیک شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز ذوب از داخل یخ روی کویل

در فرایند شارژ، واسط انتقال حرارت (به طور غالب گلیکول) در دمای بین ۳- تا ۶- درجه سانتیگراد به داخل کویل تعبیه شده در مخزن پمپ می‌شود. انتقال حرارت بین واسط انتقال حرارت و آب موجب می‌شود، آب دچار تغییر فاز شده و یخ بزند. در زمان دشارژ، یخ تشکیل شده توسط واسط گرم شده برگشتی از سیستم سرمایش ذوب شده و بدین ترتیب واسط انتقال حرارت سرد شده و آب تشکیل می‌شود [۱۰۲].

۵-۳-۳-۴-۳-۵- سیستم ذخیره‌سازی یخ از نوع مزرعه

در سیستم‌های ذخیره‌سازی یخ از نوع مزرعه، ایده اصلی تشکیل قطعات کوچک از یخ- ترکیب شده با آب سرد به منظور تامین نیازهای سرمایشی می‌باشد. شماتیک سیستم ذخیره‌سازی یخ از نوع مزرعه در شکل (۵-۱۹) آورده شده است [۱۰۲].

نحوه عملکرد سیستم‌های ذخیره‌سازی یخ از نوع مزرعه بسیار شبیه به سیستم‌های ذخیره‌ساز یخ است با این تفاوت که در این سیستم‌ها، از واسط انتقال حرارت (گلیکول) در فاز شارژ برای تولید قطعات کوچک یخ استفاده می‌شود. مطابق شکل (۵-۱۹)، در سیستم ذخیره‌سازی یخ از نوع مزرعه، سیستم تبرید با مخزن که شامل یک مبدل صفحه‌ای (قرار گرفته به صورت عمودی) نیز هست به یکدیگر کوپل شده تا از این طریق امکان تولید قطعات کوچک یخ فراهم شود. در فاز شارژ، آب یخ با عبور از روی مبدل صفحه‌ای (سرد شده با واسط انتقال حرارت) یخ می‌زند. در فاز دشارژ، یک جریان گاز گرم به مدت ۲۵ تا ۳۰ دقیقه از روی مبدل صفحه‌ای عبور داده می‌شود و این پدیده موجب ورود قطعات کوچک یخ به داخل مخزن و خنک شدن آب گرم برگشتی از ساختمان می‌شود [۱۰۲].



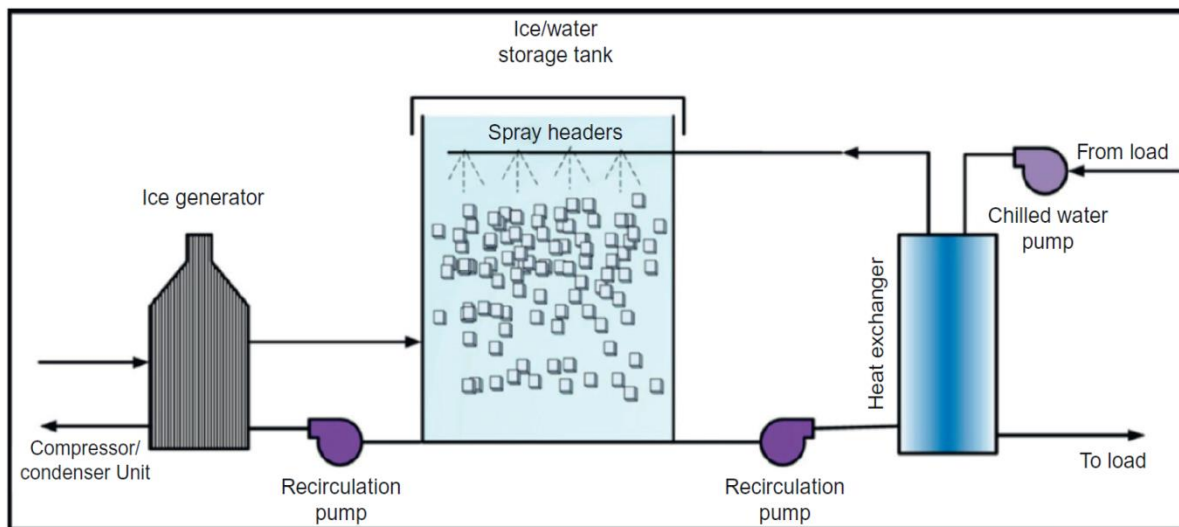
شکل ۵-۱۹: شماتیک سیستم ذخیره‌سازی یخ از نوع مزرعه و نحوه کارکرد آن

ضخامت یخ تشکیل شده در سیستم‌های مزرعه یخ بین ۸ تا ۱۰ میلیمتر است و به زمان صرف شده جهت انجماد بستگی دارد. نمونه‌های عملی پیاده شده از سیستم مزرعه یخ به دلیل پیچیدگی‌های خاص آن محدود و اندک است [۱۰۶].

۵-۳-۴-۳-۴- سیستم ذخیره‌ساز پالوده یخ

در سیستم‌های ذخیره‌ساز پالوده یخ، انرژی حرارتی ناشی از گرمای محسوس و گرمای نهان واسط انتقال حرارت و آب موجود در مخزن است. سیستم ذخیره‌ساز پالوده یخ به یک سیستم سرماساز جهت تولید کریستال‌های یخ و به یک مبدل حرارتی کوپل شده به واحد هواساز ساختمان مجهز است. شماتیک این سیستم در شکل (۵-۲۰) آورده شده است [۱۰۲].





شکل ۵-۲۰: شماتیک سیستم ذخیره‌ساز پالوده یخ از نوع مزرعه و نحوه کارکرد آن

مطابق شکل (۵-۲۰)، در فرایند شارژ، واسط انتقال حرارت (مبرد) به یک دمای پایین سرد می‌شود. با ترکیب مبرد و آب موجود در مخزن پدیده هسته‌زایی فعال رخ داده و ساختارهای یخ مانند در روی سطح آب مخزن تشکیل می‌شود. در فرایند دشارژ، ترکیب آب و یخ بوجود آمده (پالوده یخ) مستقیماً به مبدل گرمایی کوپل شده با هواساز ساختمان پمپ می‌شود و بدین ترتیب، انرژی سرمایه‌گذاری ذخیره شده مورد استفاده قرار می‌گیرد.

بلز و همکارانش افت فشار سیستم و رفتار انتقال حرارت پالوده یخ را بررسی کردند. آنها دریافتند که با افزایش سهم یخ از ۰ درصد به ۲۰ درصد، افت فشار در سیستم حدود ۱۵ درصد افزایش می‌یابد. آنها همچنین دریافتند که ظرفیت انتقال حرارت مبدل حرارتی در روش پالوده یخ حدود ۳۰ درصد بیشتر از سیستم‌های معمول جریان آب سرد است. یگوف و کاوفلد نیز خواص فیزیکی پالوده یخ را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که اگر کسر یخ در زیر ۱۵ تا ۲۰ درصد نگهداری شود، مایع رفتار نیوتنی خود را حفظ می‌کند [۱۰۲].

۵-۳-۴-۳-۵ سیستم یخ کپسول شده

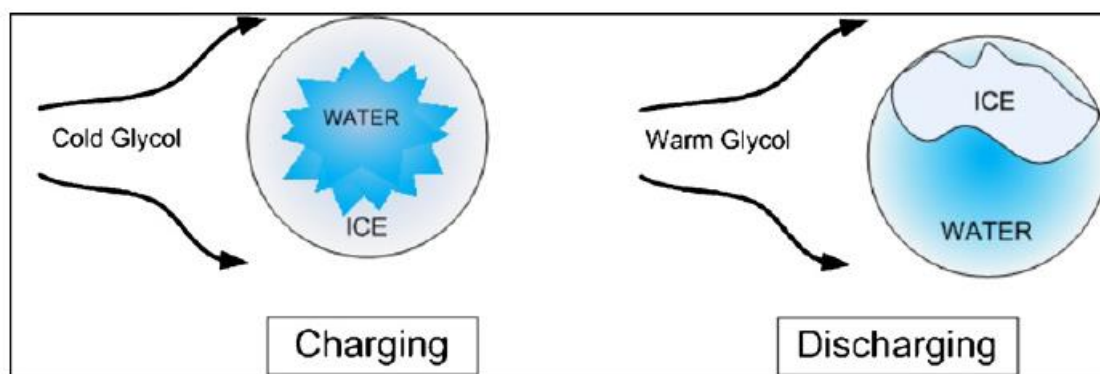
یک سیستم ذخیره‌ساز از نوع یخ کپسول شده، شامل تعدادی کپسول‌های پلاستیکی، کروی و مستطیلی می‌باشد که در آب یک مخزن فولادی یا بتنی غوطه‌ور شده‌اند. مبرد (خنک‌کننده ثانویه) با عبور از لوله‌های تعبیه شده در مخزن، آب موجود را خنک می‌کند. کپسول‌ها (شکل (۵-۲۱)) معمولاً از پلی اتیلن با چگالی بالا ساخته می‌شوند تا بتوانند فشار را به دلیل انبساط آب هنگام یخ زدن تحمل کنند [۱۰۲].

در طول دوره شارژ، یک محلول دمای پایین (۳- تا ۶- درجه سانتیگراد) از مخزن عبور می‌کند و آب داخل کپسول‌ها را منجمد می‌کند. در دوره تخلیه، محلول گرم از بار به مخزن باز می‌گردد و یخ را ذوب می‌کند. شکل (۵-۲۲) روش شارژ و دشارژ یک سیستم کپسول یخ را نشان می‌دهد. مطالعات تجربی و عددی نشان داده که اندازه و مواد

کپسول و همچنین درجه حرارت و سرعت جریان خنک‌کننده پارامترهای اصلی هستند که مدت زمان شارژ و دشارژ را تعیین می‌کنند [۱۰۲].



شکل ۵-۲۱: نمونه‌هایی از کپسول‌های یخ مورد استفاده در سیستم‌های ذخیره‌سازی یخ کپسول شده

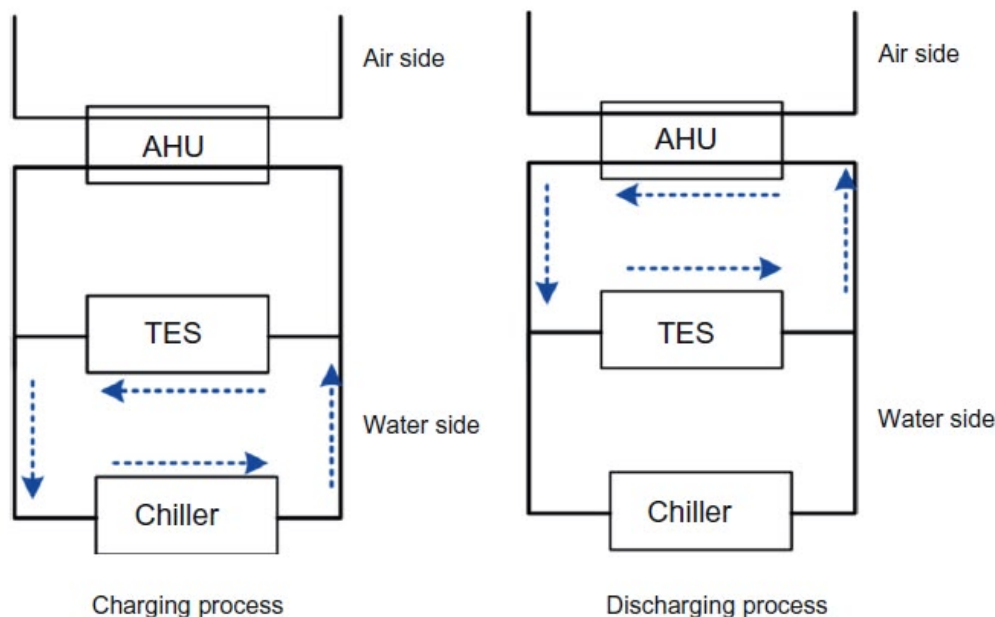


شکل ۵-۲۲: شماتیک فرایندهای شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌سازی یخ کپسول شده

۵-۳-۴-۴- سیستم ذخیره‌ساز آب سرد مبتنی بر مواد تغییر فازدهنده

شماتیک نحوه کارکرد سیستم‌های ذخیره‌ساز آب سرد مبتنی بر مواد تغییر فازدهنده در شکل (۵-۲۳) آورده شده است [۱۰۲].





شکل ۵-۲۳: شماتیک سیستم ذخیره‌ساز آب سرد مبتنی بر مواد تغییر فازدهنده به همراه فرایندهای شارژ و دشارژ مربوطه

تفاوت‌های اصلی سیستم صدرالذکر با سیستم ذخیره‌ساز یخ از قرار ذیل است [۱۰۲]:

- ۱- دمای آب سرد (واسط انتقال حرارت) در فاز شارژ بین ۴ تا ۵ درجه سانتیگراد حفظ می‌شود.
 - ۲- دمای آب سرد (واسط انتقال حرارت گرم) در فاز دشارژ بین ۱۲ تا ۱۳ درجه سانتیگراد حفظ می‌شود.
 - ۳- دمای تغییر فاز ماده تغییر فازدهنده بین ۷ تا ۱۰ درجه سانتیگراد می‌باشد.
 - ۴- تنها آب سرد به گردش در آمده در حلقه ثانویه چیلر به منظور انتقال حرارت (طی دوره شارژ و دشارژ ماده تغییر فازدهنده) مورد استفاده قرار می‌گیرد.
 - ۵- ظرفیت حجمی سیستم مذکور کمتر از سیستم ذخیره‌ساز یخ است.
- در فاز شارژ، آب سرد تولید شده به وسیله چیلر، به سیستم هواساز ساختمان پمپ می‌شود. در همین زمان بخشی از آب سرد تولید شده وارد مخزن ذخیره‌سازی شده و موجب تغییر فاز ماده تغییر فازدهنده می‌شود. آب گرم ایجاد شده در فرایند تغییر فاز با آبگرم برگشتی از واحد هواساز ساختمان ترکیب شده تا در سیکل بعدی مورد استفاده قرار گیرد.
- در فاز دشارژ، بخشی از آبگرم ساختمان وارد مخزن شده که با استفاده از تغییر فاز ماده تغییر فازدهنده سرد می‌گردد. بخش باقیمانده نیز به چیلر وارد شده و عملیات خنک‌سازی آن توسط تجهیز ذکر شده صورت می‌پذیرد. خروجی مخزن و چیلر با یکدیگر ترکیب شده تا در سیکل بعدی مورد استفاده قرار گیرند.
- همانگونه که از نحوه کار سیستم ذخیره‌ساز آب سرد مبتنی بر مواد تغییر فازدهنده نیز پیداست، اساس کار سیستم مذکور انتقال گرمای محسوس آب سرد به ماده تغییر فازدهنده است. انتقال حرارت مذکور نیز به اختلاف دمای آب ورودی و خروجی چیلر وابسته است.

۴-۵- ذخیره‌سازی انرژی ترموشیمیایی

در سیستم‌های ذخیره انرژی ترموشیمیایی، انرژی در طی واکنش تجزیه، جذب و در طول واکنش شیمیایی کاملاً برگشت‌پذیر بازیابی می‌گردد. نسبت به انواع مختلف دیگر روش‌های ذخیره‌سازی انرژی، ذخیره انرژی ترموشیمیایی دارای چگالی ذخیره بالاتری بوده که این ویژگی امکان ذخیره انرژی در حجم کوچک‌تری از ماده را فراهم می‌کند. ذخیره انرژی بر اساس واکنش‌های شیمیایی به علت تلفات کم انرژی در طول دوره ذخیره برای مصارف دوره‌ای طولانی مدت، به عنوان مثال ذخیره فصلی انرژی حرارتی خورشیدی، مناسب می‌باشد.

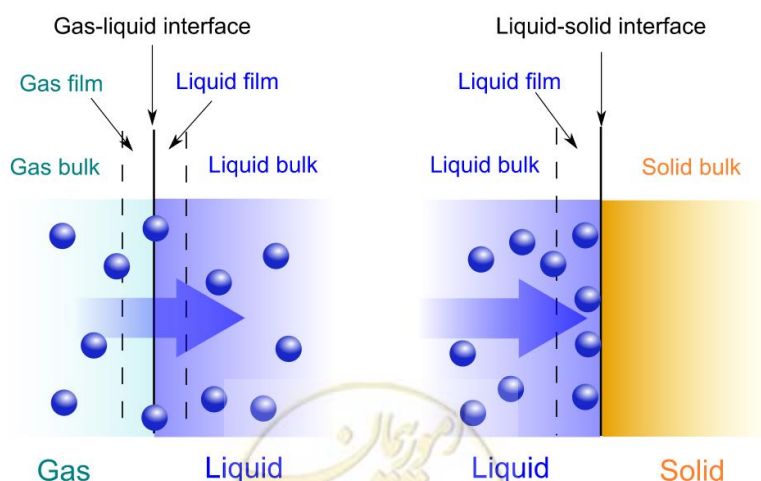
رابطه کلی ذخیره انرژی ترموشیمیایی از قرار ذیل است :



در این واکنش ماده ترموشیمیایی C با جذب انرژی به دو جزء A و B که به صورت مجزا می‌توانند ذخیره شوند تبدیل می‌گردد. واکنش برگشت با ترکیب دو جزء A و B و تولید ماده C صورت می‌پذیرد. انرژی در طول این واکنش آزاد شده و انرژی گرمایی بازیافتی در سیستم ذخیره‌ساز انرژی را تشکیل می‌دهد. ظرفیت ذخیره انرژی این سیستم همان گرمایی است که در طول واکنش و تشکیل ماده C آزاد می‌شود. مقدار ماده، نوع واکنش و میزان تغییر آن، بر گرمای ذخیره شده تأثیر مستقیم دارند.

۴-۵-۱- مواد مورد استفاده در ذخیره‌سازی انرژی ترموشیمیایی

به طور کلی، هر پدیده شیمیایی یا فیزیکی که در آن ذره‌ای به ذره دیگر متصل شود با عنوان جذب (Sorption) شناخته می‌شود. ذره جاذب در این حالت می‌تواند جامد یا مایع باشد. شماتیک این پدیده در شکل (۲۴-۵) آورده شده است.



شکل ۲۴-۵: شماتیک فرایند جذب (Sorption) با دو بستر جامد و مایع

همانگونه که از شکل (۲۴-۵) نیز پیداست، جذب یا همان Sorption با توجه به حالت ماده جاذب می‌تواند به دو صورت جذب سطحی (Adsorption) و جذب کامل (Absorption) باشد. در ادبیات ذخیره‌سازی انرژی، جذب گاز یا بخار

توسط مایع با اصطلاح Absorption و جذب گاز یا بخار توسط جامد یا سطح متخلخل با اصطلاح Adsorption شناخته می‌شود.

به صورت مفهومی، فرایند ذخیره‌سازی ترموشیمیایی شامل آزادسازی بخار یا گاز توسط ماده جاذب با استفاده از حرارت و آزادسازی حرارت با جذب مجدد گاز یا بخار است. با توجه به نوع جاذب و سایر خصوصیات ترموفیزیکی و ترموشیمیایی حاکم بر ذخیره‌سازهای ترموشیمیایی، مواد یا جاذب‌ها در چهار گروه طبقه‌بندی می‌شوند [۱۰۲]. این چهار گروه عبارتند از:

۱- مواد جاذب سطحی

۲- مواد جاذب کامل

۳- مواد ترموشیمیایی خالص

۴- مواد ترموشیمیایی کامپوزیت

بررسی جامع این دسته‌بندی و مشخصات هر یک از گروه‌های اشاره شده، خارج از محدوده این گزارش است و می‌توان به منابع علمی موجود مراجعه نمود [۱۰۶]. مشخصات برخی از مواد جاذب متداول به همراه فرایند ترموشیمیایی مربوطه در جدول (۴-۵) آورده شده است [۱۰۲].

جدول ۴-۵: مشخصات برخی از مواد جاذب متداول به همراه فرایند ترموشیمیایی مربوطه

نام ماده	فرایند شیمیایی			چگالی حجمی انرژی (گیگاژول بر مترمکعب)	دمای رخداد فرایند (درجه سانتیگراد)
	A	B	$AB \rightleftharpoons$		
سولفات منیزیم	H ₂ O	MgSO ₄	MgSO ₄ ·7H ₂ O	۲,۸	۱۲۲
اکسید سیلیکون	O ₂	Si	SiO ₂	۳۷,۹	۴۰۶۵
کربنات آهن	CO ₃	Fe	FeCO ₃	۲,۶	۱۸۰
هیدروکسید آهن	H ₂ O	FeO	Fe(OH) ₂	۲,۲	۱۵۰
سولفات کلسیم	H ₂ O	CaSO ₄	CaSO ₄ ·2H ₂ O	۱,۴	۸۹

جدا از نحوه قرار گرفتن مواد جاذب در ذخیره ترموشیمیایی، این مواد باید از مشخصات و ویژگی‌های ذیل برخوردار باشند :

۱- تمایل بالای جاذب به جذب گاز یا بخار که بالا رفتن سرعت واکنش را به همراه دارد.

۲- فراریت بهتر گاز یا بخار نسبت به جاذب در هنگام جذب

۳- نرخ انتقال حرارت و هدایت حرارتی بالا با واسط انتقال حرارت حین فرایند جذب

۴- دمای دفع تا حد امکان پایین

۵- دوستدار محیط زیست و مقرون به صرفه

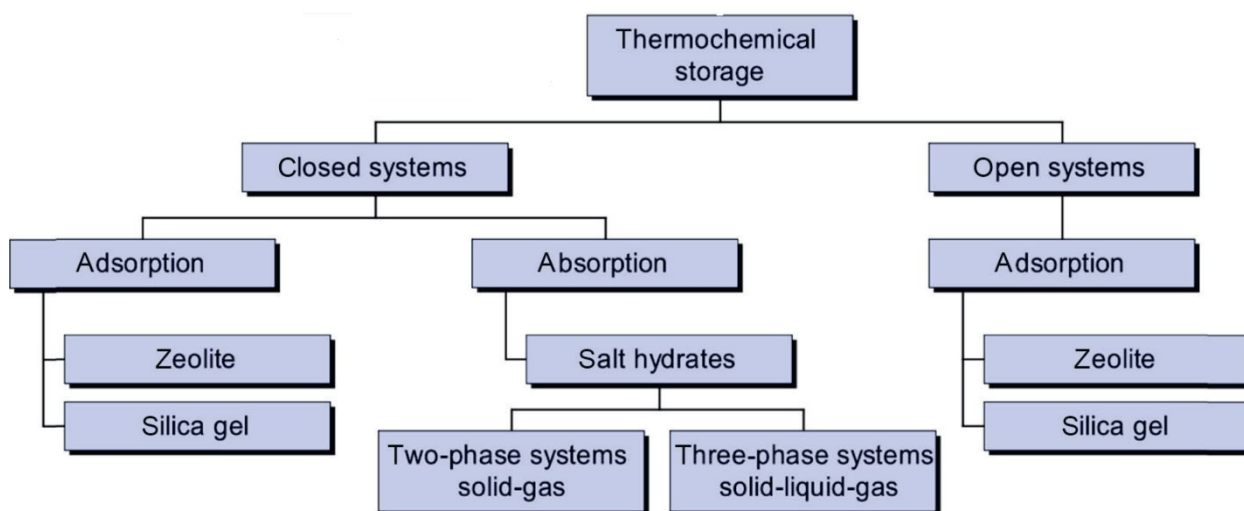
۶- عدم ایجاد خوردگی در نگهدارنده ذخیره‌ساز یا اجزاء مبدل حرارتی

۷- پایداری حرارتی و مولکولی مناسب در دما و فشار کاری

۸- ممانعت از ایجاد فشار و خلا با درجات بالا

۵-۴-۲- انواع روش‌های ذخیره‌سازی انرژی ترموشیمیایی

طبقه‌بندی انواع روش‌های ذخیره‌سازی انرژی ترموشیمیایی در شکل (۵-۲۵) آورده شده است [۱۰۲].



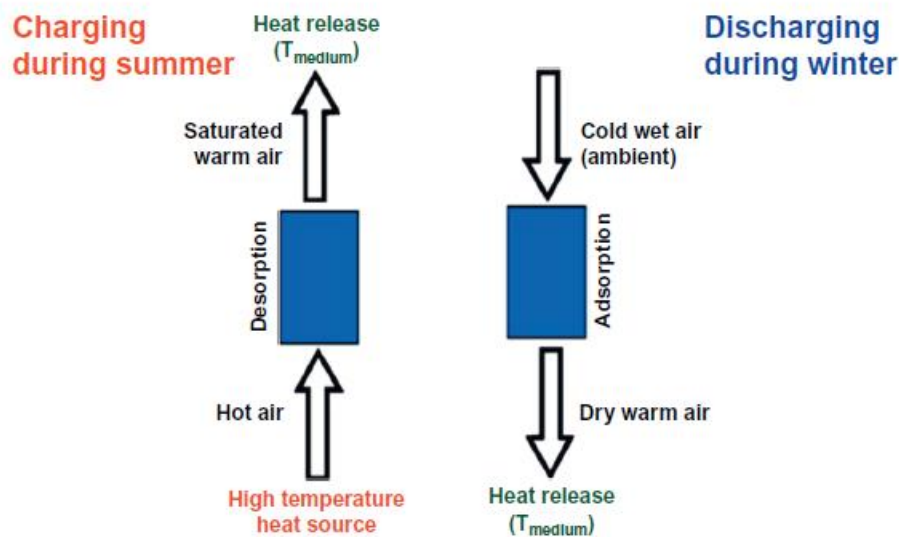
شکل ۵-۲۵: طبقه‌بندی انواع روش‌های ذخیره‌سازی انرژی ترموشیمیایی

همانگونه که از شکل (۵-۲۵) پیداست، ذخیره‌سازهای انرژی ترموشیمیایی در دو گروه اصلی سیستم‌های باز و سیستم‌های بسته طبقه‌بندی می‌شوند.

در یک سیستم باز، سیال کاری در حالت گازی به طور مستقیم در محیط یا فضا آزاد می‌شود. در سیستم‌های باز از ژئولیت و ژل سیلیکا به عنوان ماده ذخیره‌ساز انرژی ترموشیمیایی استفاده می‌شود. در حالت مقایسه، در یک سیستم بسته، سیال کاری به طور مستقیم در محیط یا فضا آزاد نشده، بلکه آنتروپی از طریق یک مبدل حرارتی به محیط آزاد می‌شود. مواد مورد استفاده در سیستم جاذب سطحی بسته همان مواد مورد استفاده در سیستم باز هستند. در سیستم جاذب کامل بسته، از هیدرات‌های نمکی استفاده می‌شود که بهره‌گیری از آنها به عنوان ذخیره‌ساز ترموشیمیایی در قالب سیستم‌های دوفازی (جامد- گاز) و سه‌فازی (جامد- مایع- گاز) امکان‌پذیر است. در ادامه به تشریح هر یک از انواع ذخیره‌سازهای انرژی ترموشیمیایی و نحوه کارکرد آنها پرداخته می‌شود.

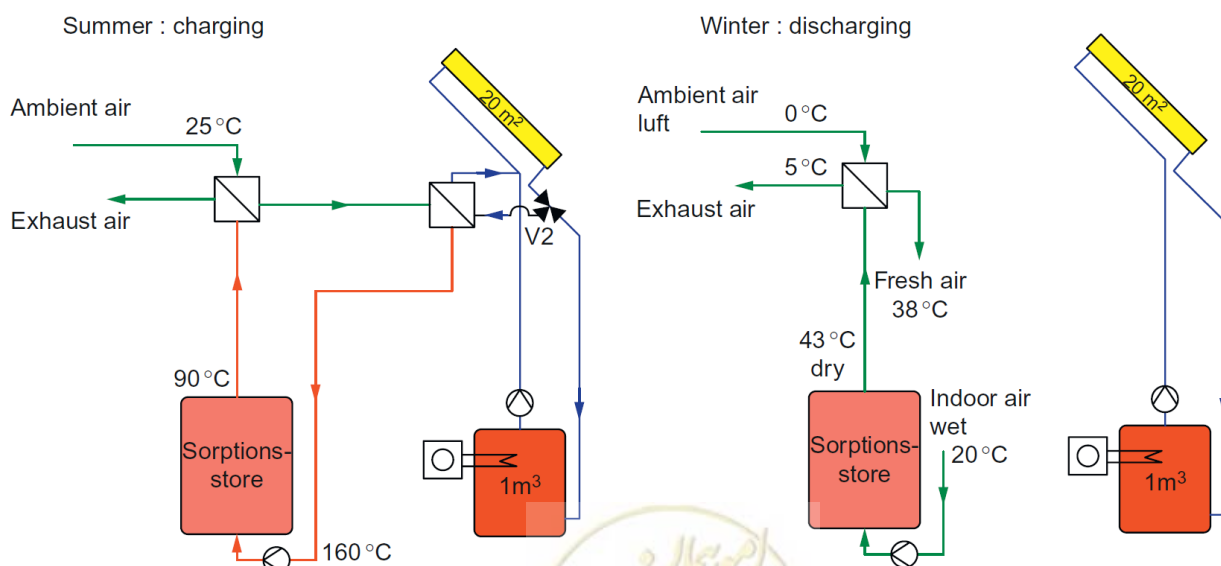
۵-۴-۲-۱- سیستم جاذب سطحی باز

شماتیک فرایندهای شارژ و دشارژ در یک سیستم جاذب سطحی باز در شکل (۵-۲۶) آورده شده است [۱۰۲].



شکل ۵-۲۶: شماتیک فرایندهای شارژ و دشارژ در یک سیستم جاذب سطحی باز

همانگونه که از شکل نیز پیداست، در حالت شارژ، با عبور هوای داغ (تامین شده از یک منبع گرمایی با دمای بالا) از سیستم جاذب سطحی باز، گرما در این سیستم ذخیره شده و هوای داغ اشباع شده از آن به محیط آزاد می‌شود. در حالت دشارژ عکس این مساله اتفاق می‌افتد و هوای سرد و مرطوب محیط بواسطه فرایند شیمیایی معکوس، تبدیل به هوای گرم و خشک (قابل استفاده جهت گرمایش) می‌شود. شماتیک یک نمونه سیستم جاذب سطحی باز که منبع حرارتی آن مجموعه‌ای از کلکتورهای خورشیدی به مساحت ۲۰ مترمربع است در شکل (۵-۲۷) آورده شده است [۱۰۲].



شکل ۵-۲۷: شماتیک شارژ و دشارژ در سیستم جاذب سطحی باز مبتنی بر کلکتور خورشیدی و اجزای مورد نیاز

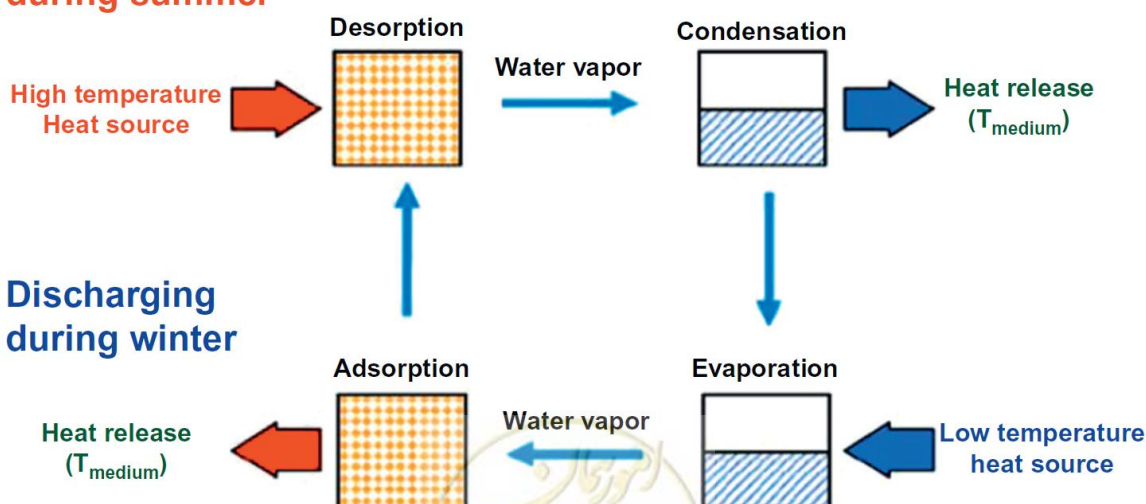
در سیستم ارائه شده در شکل (۵-۲۷)، در حالت شارژ، هوای داغ خروجی از کلکتورهای خورشیدی در بازه دمایی بین ۱۶۰ تا ۱۹۰ از سیستم جاذب سطحی عبور داده می‌شود. سیستم جاذب سطحی از ماده زئولیت 4A پر شده است. بواسطه رخداد واکنش تجزیه در ذخیره‌ساز، آب موجود در زئولیت 4A توسط جریان هوای داغ جذب می‌شود. در همین زمان، هوای داغ، گرمای خود را به ماده ذخیره‌ساز داده و این مساله موجب ذخیره‌سازی انرژی می‌شود. هوای گرم خروجی از ذخیره‌ساز با دمای متوسط قابل استفاده جهت مصارف گرمایشی خواهد بود [۱۰۲].

در حالت دشارژ، با عبور هوای مرطوب از روی ماده ذخیره‌ساز، گرمای ذخیره شده به جریان هوای مذکور منتقل شده و رطوبت آن نیز از بین می‌رود. هوای گرم ایجاد شده می‌تواند بارهای گرمایشی موجود را تامین نماید. در طراحی سیستم ذخیره‌ساز ترموشیمیایی از ساختارهایی مشابه ساختار شانه عسل استفاده می‌شود. در این ساختار، انرژی بیشتری ذخیره می‌شود. همچنین این ساختار پایداری حرارتی بیشتری دارد و افت فشار نیز در آن کمتر است. تنها نکته و محدودیت مربوط به سیستم‌های جاذب سطحی باز پشتیبانی شده توسط کلکتورهای خورشیدی، افزایش قابل توجه دمای تجزیه در هنگام استفاده از سیستم‌های خورشیدی با دمای بالاست [۱۰۲].

۵-۴-۲- سیستم جاذب سطحی بسته

سیستم‌های جاذب سطحی بسته از انرژی خورشیدی جهت تامین نیاز گرمایی خود و تکمیل فرایند تجزیه بهره می‌گیرند. شماتیک فرایندهای شارژ و دشارژ در یک سیستم جاذب سطحی بسته در شکل (۵-۲۸) آورده شده است. در سیستم‌های جاذب سطحی بسته، معمولاً از ژل سیلیکا و آب به عنوان مواد واکنش استفاده می‌شود [۱۰۲].

Charging during summer



شکل ۵-۲۸: شماتیک فرایندهای شارژ و دشارژ در یک سیستم جاذب سطحی بسته

در حالت شارژ، هوای گرم شده توسط کلکتورهای خورشیدی از روی ژل سیلیکا عبور داده می‌شود. دمای هوای گرم شده مذکور می‌تواند تا ۹۰ درجه سانتیگراد باشد. واکنش گرمایی متقابل بین هوای داغ و ژل سیلیکا، رخداد واکنش

تجزیه را به همراه دارد و این واکنش موجب آزاد شدن بخار آب از ژل سیلیکا می‌گردد. بخار آب آزاد شده، سرد شده و به همراه ژل سیلیکای خشک به صورت جداگانه ذخیره و نگهداری می‌شوند تا در سیکل دشارژ مورد استفاده قرار گیرند [۱۰۲].

در حالت دشارژ، بسته به تقاضای موجود، منبع گرمایی با دمای پایین، آب را بخار نموده و با عبور این بخار آب از روی ژل سیلیکا، گرمای ذخیره شده در آن آزاد شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد.

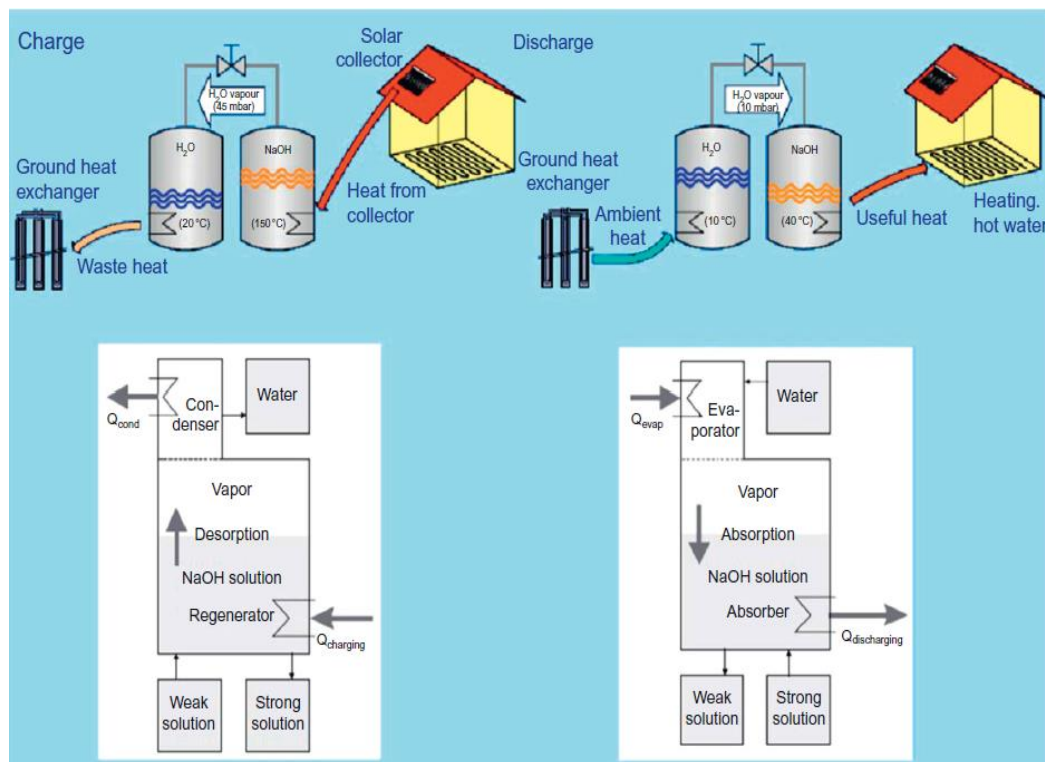
ظرفیت ذخیره‌سازی یک سیستم جاذب سطحی بسته حدود ۵۰ کیلووات ساعت بر متر مکعب است که تقریباً ۳۰ درصد کمتر از ظرفیت ذخیره‌سازی سیستم‌های آب داغ است. از کافی نبودن فاصله یا اختلاف دمایی به منظور رسیدن به حالتی که در آن محتوای آب ژل سیلیکا ۱۳ درصد باشد به عنوان علت این مساله نام برده می‌شود. در عین حال از کلکتورهای صفحه تخت نیز نمی‌توان به عنوان منبع گرمایی در سیستم‌های جاذب سطحی بسته استفاده کرد چرا که استفاده از این سیستم‌ها موجب می‌شود تا محتوای آب ژل سیلیکا کمتر از ۳ درصد شود. پرواضح و مبرهن است که محتوای آب ژل سیلیکا باید مقداری بین ۳ تا ۱۳ داشته باشد [۱۰۲].

۵-۴-۲-۳- سیستم جاذب کامل بسته

نحوه کار سیستم‌های جاذب کامل بسته بسیار شبیه به سیستم‌های جاذب سطحی بسته است. در این سیستم‌ها از هیدروکسید سدیم (به دلیل ارزان بودن) و آب به ترتیب به عنوان جاذب و جذب‌شونده استفاده می‌شود. در حالت شارژ، گرمای خورشیدی به صورت مستقیم به مبدل گرمایی دربرگیرنده محلول هیدروکسید سدیم با غلظت کم انتقال می‌یابد. گرمای انتقال یافته، آب را از هیدروکسید سدیم جدا نموده و بدین ترتیب واکنش تجزیه با موفقیت انجام می‌پذیرد. هیدروکسید سدیم تغلیظ شده به صورت جداگانه ذخیره می‌شود. بخار آب حاصله از فرایند تجزیه، سرد و متراکم شده و در مخزن مخصوص ذخیره می‌شود. هرگونه گرمای اضافی ایجاد شده در فرایند شارژ، به مبدل گرمایی زمینی برگردانده می‌شود تا در فصل زمستان مورد استفاده مجدد قرار گیرد.

در حالت دشارژ، انرژی گرمایی با دمای پایین که از طریق مبدل گرمایی زمینی حاصل شده جهت تبخیر آب ذخیره شده در مخزن مورد استفاده قرار می‌گیرد. بخار حاصله به مخزن ذخیره هیدروکسید تغلیظ شده فرستاده می‌شود و هیدروکسید سدیم غلیظ با جذب این بخار، گرمای ذخیره شده را آزاد می‌نماید. شماتیک آنچه گفته شد در شکل (۵-۲۹) آورده شده است [۱۰۲].

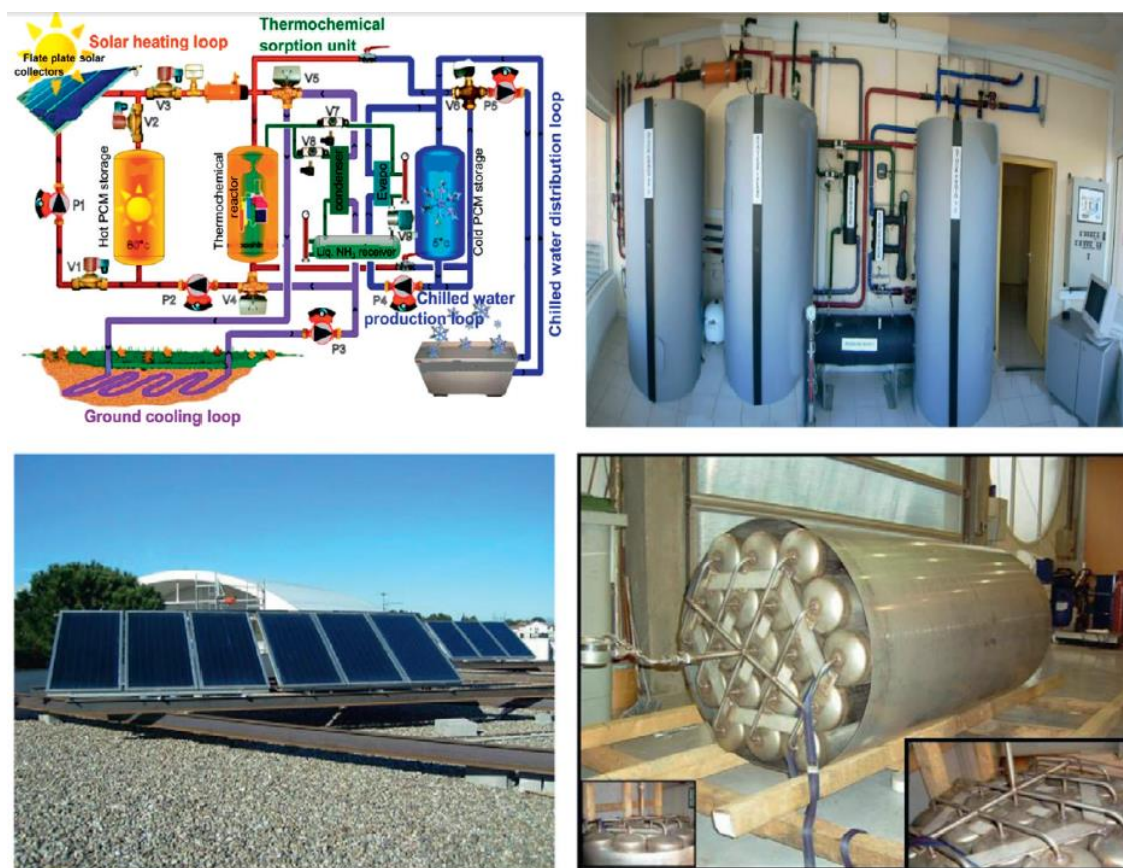




شکل ۵-۲۹: شماتیک شارژ و دشارژ در سیستم جاذب کامل بسته مبتنی بر کلکتور خورشیدی و اجزای مورد نیاز

۵-۴-۲-۴-۵- ذخیره‌ساز ترموشیمیایی جامد/ گاز

ذخیره‌سازهای ترموشیمیایی جامد/گاز در سال‌های اخیر توسعه قابل توجهی یافته‌اند. با استفاده از این سیستم‌ها، بهره‌گیری از سیستم‌های خورشیدی دما بالا نیز امکان‌پذیر می‌شود. تصاویری از این ذخیره‌ساز به همراه شماتیک آن که چگونگی کارکرد سیستم مزبور را نشان می‌دهد در شکل (۵-۳۰) آورده شده است [۱۰۲].



شکل ۵-۳: تصاویری از اجزاء ذخیره‌ساز ترموشیمیایی جامد-گاز به همراه شماتیک کامل آن

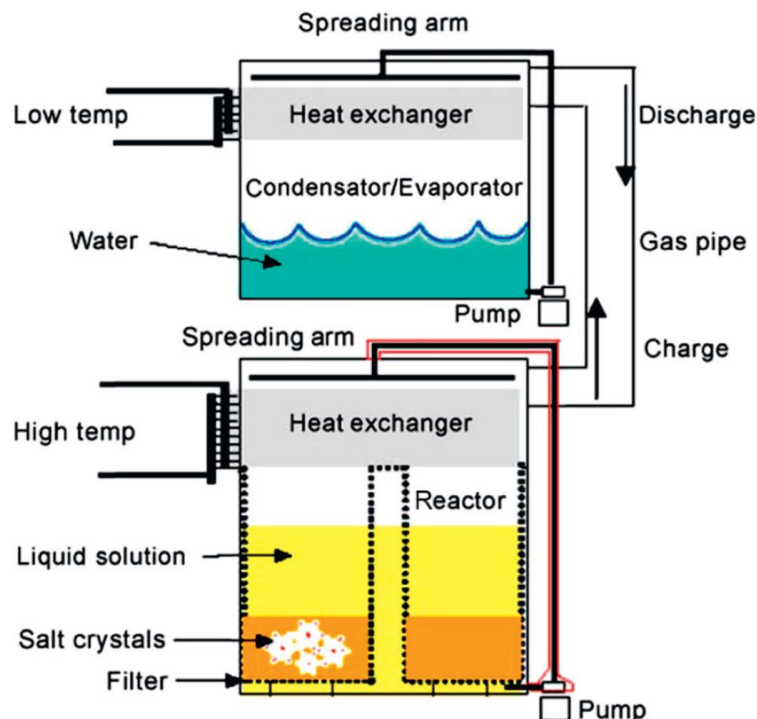
در طول روز، راکتور موجود در سیستم با انرژی خورشیدی گرم می‌شود. گاز موجود (معمولاً آمونیاک) در راکتور با استفاده از گرمای مذکور تجزیه شده و به کندانسور فرستاده می‌شود. در کندانسور، گاز آمونیاک سرد و متراکم شده و سپس ذخیره می‌گردد. علت متراکم شدن آمونیاک در کندانسور، بالاتر بودن دمای محیط در روز نسبت به شب است. در این حالت دمای کندانس گاز، حداکثر فشار کاری که سیستم می‌تواند با آن کار کند را مشخص می‌نماید. در طول شب و هنگامی که راکتور در وضعیت خنک شدن قرار می‌گیرد، گاز موجود در واحد کندانس توسط تجهیز مذکور جذب می‌شود. بواسطه گرادیان فشار تثبیت شده بین راکتور و اواپراتور (بخارساز)، آمونیاک شروع به جوشیدن و بخار شدن می‌کند. سرمایش ناشی از این فرایند را می‌توان به صورت جداگانه ذخیره کرد. بخار آمونیاک حاصله در ادامه توسط راکتور جذب شده و گرمایش لازم جهت جذب در دمای شبانه محیط فراهم می‌شود.

۵-۲-۴-۵- انباشتگر ترموشیمیایی

در حالت کلی، انباشتگر ترموشیمیایی جهت تامین نیازهای سرمایشی در ساختمانها مورد استفاده قرار می‌گیرد. با گسترش و ایجاد تغییراتی، امکان استفاده از انباشتگرهای ترموشیمیایی برای تامین نیازهای گرمایشی نیز فراهم می‌شود.



در انباشتگر ترموشیمیایی، کندانسور و اواپراتور مشابه راکتورهای جذب و تجزیه با یکدیگر ادغام شده‌اند. شکل (۵-۳۱) شماتیک انباشتگر ترموشیمیایی و نحوه کارکرد آن را نشان می‌دهد [۱۰۹].



شکل ۵-۳۱: شماتیک انباشتگر ترموشیمیایی و نحوه کارکرد آن

در انباشتگر ترموشیمیایی در حالت شارژ، محلول با غلظت کم به مبدل حرارتی پمپ شده و در آنجا بخار می‌شود. وقتی مبدل حرارتی اشباع می‌شود، بخار ناشی از فرایند تجزیه به کندانسور/اواپراتور منتقل می‌شود. نتیجه این انتقال، تشکیل کریستال‌های نمکی در راکتور و قرار گرفتن آنها در پایین راکتور بر اساس نیروی جاذبه است. نتیجه فیزیکی مساله، ذخیره انرژی حرارتی بواسطه گرمای کندانس و آزاد شدن انرژی پیوندهای مولکولی است. گرمای ایجاد شده را می‌توان جهت مصارف ساختمان مورد استفاده قرار داد یا جهت استفاده بعدی به مبدل حرارتی زمینی منتقل کرد.

در حالت دشارژ، گرمای تامین شده توسط منبع حرارتی با دمای کم (ساختمان یا مبدل حرارتی زمینی) توسط اواپراتور/کندانسور مورد استفاده قرار گرفته و بخار آب تولید می‌شود. در واقع در حالت دشارژ کندانسور مانند اواپراتور عمل نموده و بخار آب به مبدل حرارتی راکتور جهت انجام فاز شارژ برگردانده می‌شود. با بکارگیری ماده‌ای مانند کلرید لیتیم، ظرفیت انباشتگر ترموشیمیایی معادل ۲۵۳ کیلووات ساعت بر مترمکعب خواهد بود. مشخصات فنی نوعی انباشتگر ترموشیمیایی در دو مد سرمایش و گرمایش در جدول (۵-۵) آورده شده است. ضریب عملکرد الکتریکی در جدول مذکور از تقسیم انرژی سرمایشی/گرمایشی خروجی بر میزان برق مصرفی بدست آمده است. بازده حرارتی نیز Coefficient of Performance (COP) است [۱۰۲].

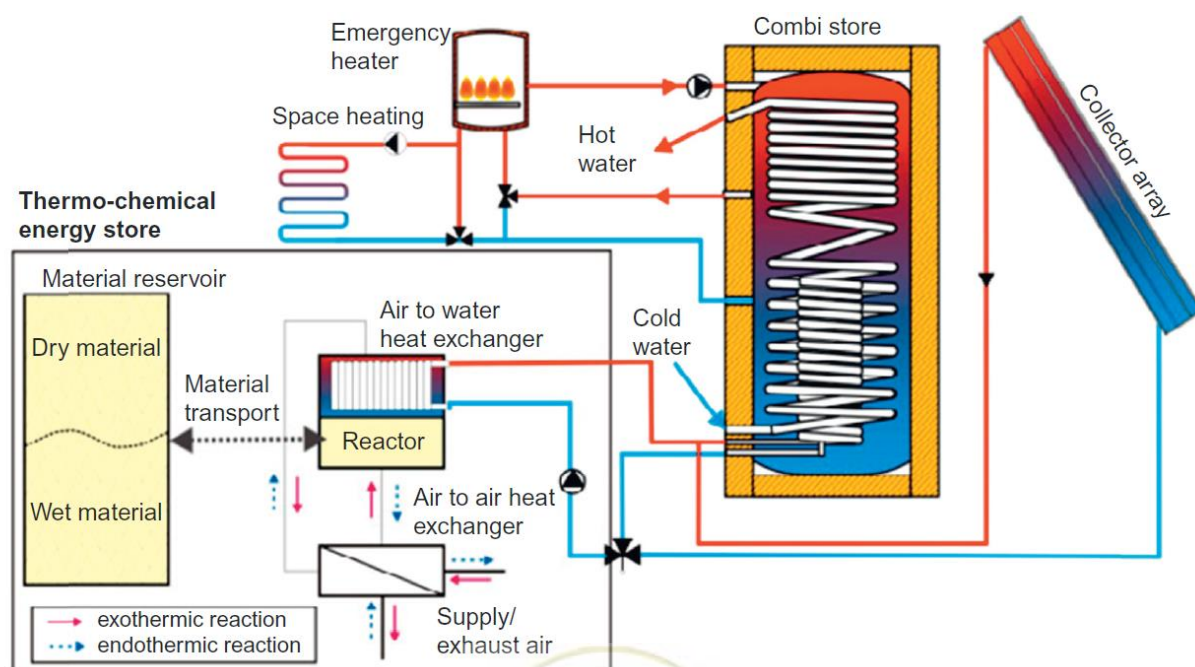
جدول ۵-۵: مشخصات فنی انباشتگر ترموشیمیایی در دو مد کاری سرمایش و گرمایش

مد کاری	ظرفیت (کیلووات ساعت)	ماکزیمم توان (کیلووات)	ضریب عملکرد الکتریکی	بازده حرارتی (درصد)
سرمایش	۶۰	۲۰	۷۷	۶۸
گرمایش	۷۶	۲۵	۹۶	۱۶۰

۵-۴-۲-۶- سیستم گرمایش از کف با ذخیره‌ساز ترموشیمیایی

در سیستم گرمایش از کف با ذخیره‌ساز ترموشیمیایی، ترکیبی از ژئولیت و مواد نمکی جهت ذخیره‌سازی و بازایی انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به منظور دستیابی به بازده و عملکرد قابل قبول، سیستم خورشیدی نیز به این سیستم کوپل می‌شود.

سیستم گرمایش از کف با ذخیره‌ساز ترموشیمیایی به یک راکتور و یک مخزن ذخیره‌ساز مواد مجهز است. در این سیستم، انتقال حرارت و جرم عناصر واکنش دهنده در دو حالت شارژ و دشارژ در راکتور انجام می‌شود. مخزن ذخیره‌ساز مواد و راکتور دو جزء اصلی سیستم هستند و لزوم دقت هر چه بیشتر در طراحی آنها به منظور پایداری در برابر افزایش دما در حالت شارژ بیش از هر چیز احساس می‌شود. شماتیک سیستم مذکور به همراه نحوه کار آن در شکل (۵-۳۲) آورده شده است [۱۰۲].



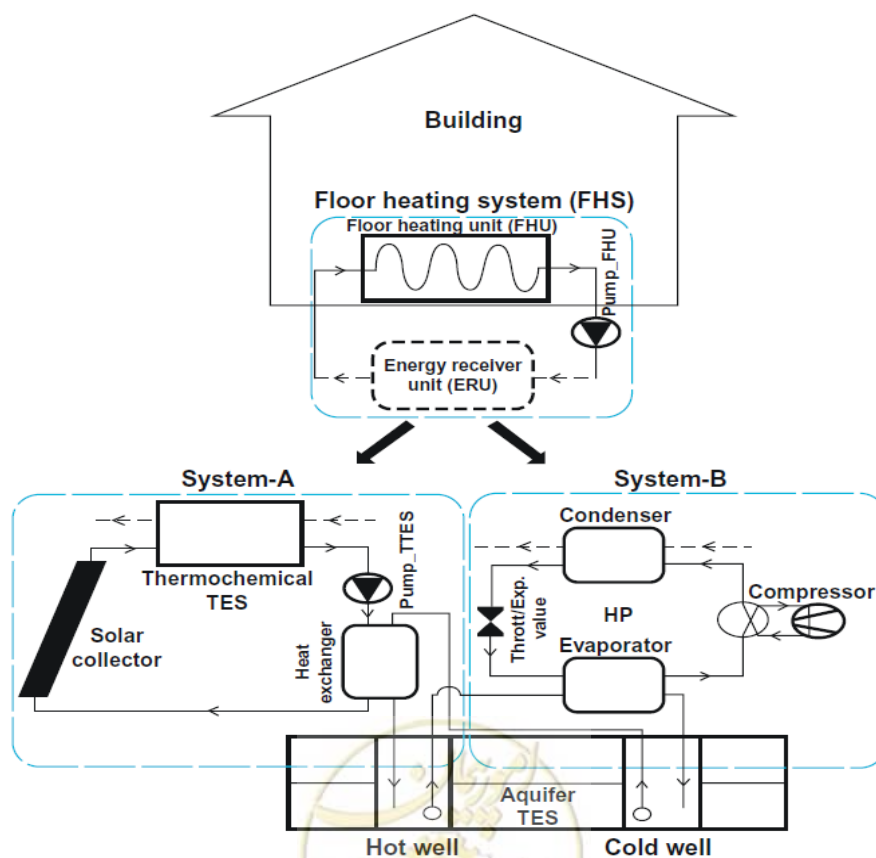
شکل ۵-۳۲: شماتیک سیستم گرمایش از کف با ذخیره‌ساز ترموشیمیایی و نحوه کارکرد آن

استفاده از مخزن جداگانه برای مواد در سیستم گرمایش از کف با ذخیره‌ساز ترموشیمیایی موجب استفاده از بخشی از این مواد در طی واکنش می‌شود. این مساله موجب کاهش ظرفیت‌های گرمایی و تلفات گرمایی بخصوص در حالت

شارژ می‌شود. علاوه بر این پایداری راکتور در دماهای بالا و بخصوص هنگامی که مواد ارزان قیمت مورد استفاده قرار می‌گیرند، افزایش می‌یابد. به منظور انتقال مواد بین مخزن و راکتور از یک سیستم مکند هوا استفاده می‌شود. راکتور مورد استفاده در سیستم گرمایش از کف با ذخیره‌ساز ترموشیمیایی یک راکتور جریان متقاطع است. مواد از بالای راکتور وارد آن شده و بواسطه جاذبه در راکتور به حرکت در می‌آیند. هوای وارد شده به راکتور از جهت‌های جانبی، رطوبت و گرما را به راکتور منتقل می‌کند. گرمای مذکور به آب گردش یافته در مبدل حرارتی هوا به آب انتقال داده می‌شود. به منظور بازتولید مواد، فرایند صدرالذکر معکوس شده و گرمای آب ناشی از دریافت انرژی خورشیدی توسط کلکتورهای خورشیدی به هوا منتقل می‌شود.

۵-۴-۲-۷- سیستم گرمایش ساختمان زمینی - خورشیدی با استفاده از ذخیره‌ساز ترموشیمیایی

ترکیب ذخیره‌سازهای ترموشیمیایی با منابع حرارتی فصلی مانند خورشید و زمین (زمین نقش تثبیت کننده و افزایش دهنده دمای سیال را دارد) به عنوان عامل و محرک ذخیره‌سازی همیشه از جذابیت خاصی برخوردار بوده است. در این سیستم‌ها از گرمای محسوس و واکنش‌های ترموشیمیایی به منظور شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز حرارتی استفاده شده و نیاز حرارتی ساختمان تامین می‌گردد. شماتیک یک نمونه از این سیستم‌ها در شکل (۵-۳۳) آورده شده است [۱۰۲].



شکل ۵-۳۳: شماتیک سیستم گرمایش ساختمان زمینی - خورشیدی با استفاده از ذخیره‌ساز ترموشیمیایی و نحوه کارکرد آن

در فاز شارژ سیستم گرمایش ساختمان با استفاده از ذخیره‌ساز ترموشیمیایی، انرژی گرمایی به دام افتاده توسط کلکتورهای خورشیدی به راکتور منتقل می‌شود. در راکتور عمل تجزیه ترکیبات نمکی رخ داده که در نتیجه آن بخار آب آزاد شده و انرژی گرمایی ذخیره می‌گردد. بخار حاصله متراکم شده و با نمک تغلیظ شده مجدداً ترکیب می‌شود که نتیجه آن خارج شدن نمک از حالت اشباع است. این رخداد دشارژ انرژی گرمایی از ترکیب نمکی را تسهیل می‌سازد. آب به گردش درآمده در سیستم گرمایشی ساختمان، انرژی گرمایی را از ذخیره‌ساز ترموشیمیایی گرفته و نیاز گرمایشی ساختمان را تامین می‌کند. معادلات شیمیایی برگشت‌پذیر سیستم ارائه شده در شکل (۵-۳) مطابق ذیل خواهد بود :



در معادلات شیمیایی صدرالذکر، آب در فاز بخار و $\text{SrBr}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ و $\text{SrBr}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ قرار دارند. شایان ذکر است سیستم حرارتی آبخوان (Aquifer TES) به صورت همزمان از طریق گرمای اضافی واکنش (انتقال داده شده بوسیله مبدل حرارتی) قابل شارژ است [۱۰۲].

در صورت عدم تامین کامل نیازهای گرمایشی در ساختمان، سیستم B به عنوان سیستم مکمل وارد عمل خواهد شد و با استفاده از سیکل ترمودینامیکی موجود، گرمایش مورد نیاز را تامین خواهد کرد. توضیح بیشتر آنکه انتقال حرارت بین آب سرد برگشتی از ساختمان با واسطه موجود در سیستم B رخ می‌دهد و این رخداد در کندانسور سیستم مذکور خواهد بود [۱۰۲].

۵-۵- مقایسه انواع روش‌های ذخیره‌سازی حرارتی

از دیدگاه ذخیره‌سازی، روش‌های ذخیره‌سازی حرارتی مبتنی بر گرمای محسوس و گرمای نهان در زمره تکنیک‌ها یا روش‌های مستقیم ذخیره‌سازی قرار می‌گیرند. در نقطه مقابل، روش ذخیره‌سازی حرارتی ترموشیمیایی که در آن تراکنش‌های شیمیایی گرماگیر و گرمازا بین ترکیبات خاص موجب شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌سازی می‌گردد، روشی غیرمستقیم است.

فارغ از نوع و روش ذخیره‌سازی حرارتی، ذخیره‌سازی انرژی به این روش مزایای ذیل را به همراه خواهد داشت :

- ❖ به حداقل رساندن استفاده از سوخت‌های فسیلی
- ❖ کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از طریق صرفه‌جویی در مصرف انرژی
- ❖ کاهش هزینه کل بهره‌برداری از سیستم‌ها بسته به تولید انرژی الکتریکی از سوخت‌های فسیلی
- ❖ به حداقل رساندن قیمت سوخت و ریسک‌های مرتبط با آن
- ❖ گسترش ظرفیت سیستم‌های خنک کننده/ گرمایشی موجود و تهویه مطبوع از طریق جابجایی بار پیک

- ❖ کاهش اندازه تجهیزات خنک کننده/ گرمایشی بر اساس مشخصات بار حرارتی
- ❖ یکپارچه‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر مانند خورشیدی، باد و زمین گرمایی با منابع زیرزمینی به منظور تولید و ذخیره‌سازی انرژی
- ❖ کاهش تجهیزات الکتریکی/ مکانیکی پشتیبان
- ❖ عدم اضافه شدن آلودگی به محیط زیست
- ❖ توسعه سیستم‌های نمک‌زدایی برای به حداقل رساندن کمبود آب شیرین

در ذخیره‌سازی حرارت مبتنی بر گرمای محسوس، از مواد ارزان قیمت دوستدار محیط زیست استفاده می‌شود. این سیستم‌ها نسبتاً ساده بوده و کنترل آنها به سادگی امکان‌پذیر است. ضمن آنکه قابلیت اطمینان سیستم‌های مذکور بالاست. در نقطه مقابل، ذخیره‌سازهای حرارتی مبتنی بر گرمای محسوس، چگالی انرژی کمی داشته و برای ذخیره مقدار قابل توجهی از انرژی در این سیستم‌ها به احجام بالا نیاز است. دشارژ خودی و تلفات گرمایی از دیگر مشکلات سیستم‌های ذخیره‌ساز حرارت مبتنی بر گرمای محسوس بشمار می‌روند. ضمن آنکه هزینه ساخت سایت یا جایگاه جهت استفاده از این نوع روش ذخیره‌سازی نیز نسبتاً بالاست. هم‌اکنون از ذخیره‌سازهای حرارتی مبتنی بر گرمای محسوس در مقیاس بزرگ استفاده می‌شود [۱۰۲].

سیستم‌های ذخیره‌سازی حرارت مبتنی بر گرمای نهان در مقایسه با سیستم‌های گرمای محسوس چگالی انرژی بالاتری داشته و انرژی حرارتی را در یک دمای ثابت تامین می‌کنند. در نقطه مقابل، این سیستم‌ها از عدم پایداری حرارتی، کریستاله شدن و خوردگی رنج می‌برند. ضمن اینکه مواد مورد استفاده در این سیستم‌ها گران بوده و تامین آنها چندان ساده نیست. هم‌اکنون از ذخیره‌سازهای حرارتی مبتنی بر گرمای نهان در سطح آزمایشگاهی و نیمه صنعتی استفاده می‌شود [۱۰۲].

ذخیره‌سازهای ترموشیمیایی در مقایسه با سیستم‌های گرمای نهان، چگالی انرژی بالاتری داشته و حجم کمتری را اشغال می‌کنند. تلفات گرمایی در این ذخیره‌سازها بسیار اندک و قابل چشم‌پوشی است. در نقطه مقابل، ذخیره‌سازهای ترموشیمیایی از انتقال حرارت و انتقال جرم ضعیف در چگالی بالا رنج برده و تداوم مشخصی نیز ندارند. قیمت بالای مواد ذخیره‌ساز نیز از جمله معایب دیگر این نوع ذخیره‌سازها بشمار می‌رود.

۵-۶- مشخصات و ویژگی‌های ذخیره‌سازهای حرارتی

با توجه به نوع و محدوده دمایی، یک تقسیم بندی چهارتایی برای ذخیره‌سازهای حرارتی ارائه شده است. در این تقسیم‌بندی، ذخیره‌سازها در چهار گروه سرمایش صنعتی (کمتر از ۱۸- درجه سانتیگراد)، سرمایش ساختمان (بین ۰ تا ۱۲ درجه سانتیگراد)، گرمایش ساختمان (بین ۲۵ تا ۵۰ درجه سانتیگراد) و گرمایش صنعتی (بالتر از ۱۷۵ درجه سانتیگراد) کلاسه‌بندی می‌شوند [۱۱۰]. بررسی مشخصات و ویژگی‌های ذخیره‌سازهای حرارتی در دو گروه ذخیره‌سازهای حرارتی دمای پایین و دمای بالا نیز امکان‌پذیر است و مشخصات ذخیره‌سازها معمولاً در این تقسیم‌بندی

ارائه می‌شود هر چند که محدوده دمایی مشخصی برای آن ارائه نشده است. ذخیره‌سازی حرارت مبتنی بر گرمای محسوس و گرمای نهان در گروه دوم و ذخیره‌سازی ترموشیمیایی در گروه اول قرار می‌گیرند. بازه زمانی مناسب جهت ذخیره‌سازی انرژی در سیستم‌های حرارتی از چند دقیقه تا چند روز است.

برای سیستم‌های ذخیره‌ساز با دمای پایین، بازه توان تا ۳۰۰ مگاوات، انرژی مخصوص ۸۰ تا ۲۵۰ وات‌ساعت بر کیلوگرم و توان مخصوص بین ۱۰ تا ۳۰ وات بر کیلوگرم گزارش شده است. چگالی حجمی انرژی این سیستم‌ها بین ۸۰ تا ۲۰۰ وات‌ساعت بر لیتر است [۱۱].

زمان دشارژ ۱ تا ۸ ساعت، بازده بین ۳۰ تا ۵۰ درصد، دشارژ خودی بین ۰٫۵ تا ۱ درصد در روز و طول عمر بین ۱۰ تا ۴۰ سال از جمله دیگر مشخصات سیستم‌های ذخیره‌ساز حرارتی با دمای پایین بشمار می‌روند. هزینه سرمایه‌گذاری برای این ذخیره‌ساز شامل هزینه مربوط به توان بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ دلار به ازای هر کیلووات و هزینه مربوط به انرژی بین ۲۰ تا ۵۰ دلار به ازای هر کیلووات ساعت گزارش شده است [۱۲].

برای سیستم‌های ذخیره‌ساز با دمای بالا، بازه توان حداکثری برابر با ۶۰ مگاوات و انرژی مخصوص ۸۰ تا ۲۰۰ وات‌ساعت بر کیلوگرم گزارش شده است. چگالی حجمی انرژی این سیستم‌ها بین ۸۰ تا ۵۰۰ وات‌ساعت بر لیتر است [۱۱].

زمان دشارژ ۱ تا بیش از ۲۴ ساعت، بازده ۸۰ درصد، دشارژ خودی بین ۰٫۰۵ تا ۱ درصد در روز و طول عمر بین ۵ تا ۱۵ سال از جمله دیگر مشخصات سیستم‌های ذخیره‌ساز حرارتی با دمای بالا بشمار می‌روند. هزینه سرمایه‌گذاری برای این ذخیره‌ساز شامل هزینه مربوط به توان بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ دلار به ازای هر کیلووات و هزینه مربوط به انرژی بین ۳۰ تا ۶۰ دلار به ازای هر کیلووات ساعت گزارش شده است [۱۲]. در جدول (۵-۶) مشخصات روشهای ذخیره‌سازی حرارتی آورده شده است.

جدول ۵-۶: مشخصات و ویژگی‌های انواع روش‌های ذخیره‌سازی حرارتی

انواع روش‌ها		مشخصات و ویژگی‌ها	
ذخیره‌سازی با دمای بالا	ذخیره‌سازی با دمای پایین		
۱-۲۴+	۱-۸	زمان دشارژ (ساعت)	
۸۰-۲۰۰	۸۰-۲۵۰	انرژی مخصوص (وات‌ساعت بر کیلوگرم)	
--	۱۰-۳۰	توان مخصوص (وات بر گرم)	
۸۰-۵۰۰	۸۰-۲۰۰	چگالی حجمی انرژی (وات‌ساعت بر لیتر)	
۰٫۰۵-۱	۰٫۵-۱	دشارژ خودی (درصد در روز)	
۸۰	۳۰-۵۰	بازده (درصد)	
۲۰۰-۳۰۰		هزینه توان (دلار بر کیلووات)	
۳۰-۶۰	۲۰-۵۰	هزینه سرمایه‌گذاری	
		هزینه انرژی (دلار بر کیلووات ساعت)	
۵-۱۵	۱۰-۴۰	طول عمر (سال)	

۵-۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این فصل از گزارش روش‌های حرارتی ذخیره‌سازی انرژی و فناوری‌های مورد استفاده در هر یک از آنها مورد بررسی قرار گرفت. به صورت کلی، حرارت را می‌توان به صورت گرمای محسوس، گرمای نهان و با ترموشیمیایی ذخیره نمود. ذخیره‌سازی حرارت مبتنی بر گرمای محسوس، ضمن ارزان بودن در مقایسه با دو روش دیگر، نسبتاً ساده بوده و با قابلیت اطمینان بالا همراه است. در این بین بیشترین میزان ذخیره‌سازی انرژی در یک حجم ثابت به روش ترموشیمیایی تعلق دارد. در این روش تهیه ترکیبات شیمیایی هزینه قابل توجهی را به همراه خواهد داشت. تحقیق و توسعه در خصوص سیستم‌های ذخیره‌ساز مبتنی بر حرارت در دست انجام است و به غیر از روش ذخیره‌سازی مبتنی بر گرمای محسوس که تقریباً به بلوغ رسیده، دو روش دیگر هنوز در فاز رشد قرار دارند.



فصل ۶

روش‌های شیمیایی ذخیره‌سازی انرژی و فناوری‌های مربوطه



مقدمه

در این فصل از گزارش به تشریح روش‌های شیمیایی ذخیره‌سازی انرژی پرداخته می‌شود. به صورت کلی، ذخیره‌سازی شیمیایی انرژی شامل ذخیره‌سازی هیدروژن است. با روش‌های مختلفی می‌توان هیدروژن را بدست آورد و ذخیره نمود. هیدروژن مورد استفاده می‌تواند با فناوری‌های مختلف از جمله پیل سوختی به برق تبدیل شود. متداول‌ترین روش استخراج هیدروژن الکترولیز آب است. هیدروژن حاصله به همراه اکسیژن توسط پیل سوختی مورد استفاده قرار می‌گیرد و خروجی پیل سوختی آب و برق خواهد بود. در این فصل ابتدا به بحث الکترولیز یا تجزیه آب پرداخته شده و در ادامه پیل سوختی معرفی و مشخصات آن به عنوان ذخیره‌ساز شیمیایی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۶-۱- الکترولیز آب

الکترولیز یا تجزیه آب متداول‌ترین روش جهت تولید هیدروژن از آب است. در حالت کلی سه تکنولوژی جهت تجزیه آب وجود دارد. الکترولایزرهای نوع الکلی، الکترولایزرهای نوع پلیمر جامد و الکترولایزرهای نوع اکسید جامد سه تکنولوژی مذکور هستند.

الکترولایزرهای نوع الکلی قدیمی‌ترین و متداول‌ترین تکنولوژی تجزیه آب هستند که در آنها از یک محلول آبی شامل ۲۰ تا ۳۰ درصد هیدروکسید پتاسیم جهت تجزیه آب استفاده می‌شود. پنبه نسوز به عنوان جداساز و کاتالیست‌های پایه نیکل و کاتالیست‌های پایه آهن به ترتیب به عنوان آند و کاتد در الکترولایزرهای نوع الکلی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۱۱].

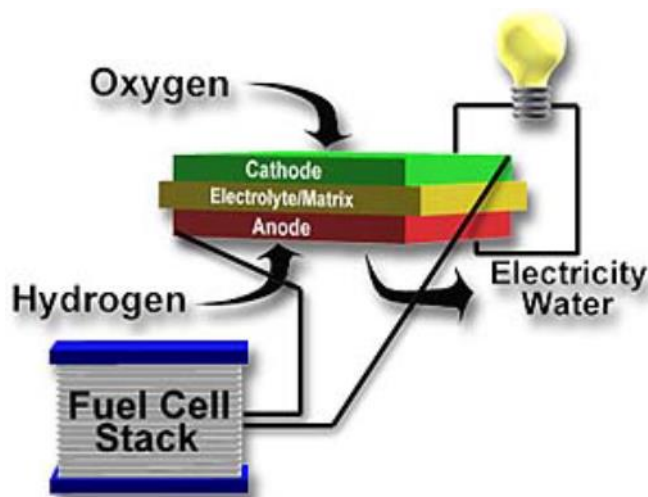
مواد مورد استفاده در الکترولایزرهای نوع پلیمر جامد مشابه مواد مورد استفاده در پیل سوختی از نوع پلیمری جامد هستند. در این فناوری اغلب یک غشاء اسید سولفونیک الکترولیت، کاتالیست‌های تیتانیومی پوشیده شده با ایریدیم آند و کاتالیست‌های تیتانیومی پوشیده شده با پلاتینیوم کاتد را تشکیل می‌دهند. قیمت مواد مورد استفاده در الکترولایزر نوع پلیمر جامد به مراتب بیشتر از نوع الکلی است. در حالت مقایسه، فاصله بین الکترودها و فاصله بین الکترولیت و الکترودها می‌تواند بسیار کم انتخاب شود که این مساله موجب کاهش مقاومت یونی بین الکترودها شده و امکان کارکرد الکترولایزر در چگالی بالای جریان را فراهم می‌سازد. الکترولایزرهای نوع پلیمر جامد با تامین آب دیونیزه نیز قابل استفاده هستند. در حال حاضر استفاده از غشاءهای پایه هیدروکربنی برای این نوع الکترولایزرها در دست توسعه است [۱۱۱].

در حال حاضر استفاده از یک الکترولایزر آب دما بالا با بهره‌گیری از مواد مورد استفاده در پیل سوختی اکسید جامد در دست بررسی است. در این الکترولایزر که الکترولایزر نوع اکسید جامد نام گرفته، از نوعی سرامیک زیرکونیمی تثبیت شده به عنوان الکترولیت، از یک نوع اکسید سرامیکی با نام Lanthanum Strontium Manganite یا LSM با فرمول شیمیایی $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ (x نشان دهنده سطح ناخالصی است) به عنوان آند و از یک ماده کامپوزیتی از نیکل به عنوان

کاتد استفاده می‌شود. این تکنولوژی امکان الکترولیز بخار در دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد را فراهم می‌سازد که با راندمان بیش از ۹۰ درصدی همراه است هر چند که مشکلات فنی و تکنیکی خاصی هنوز وجود دارد [۱۱۱].

۶-۲- اصول پیل سوختی

پیل سوختی یک دستگاه الکتروشیمیایی است که از هیدروژن و اکسیژن برای تولید برق، حرارت و همچنین آب استفاده می‌کند. شماتیکی از پیل سوختی در شکل (۶-۱) نشان داده شده است. هیدروژن می‌تواند از انواع سوخت هیدروکربنی مانند گاز طبیعی، بنزین، دیزل یا متانول تولید گردد و اکسیژن از هوای پیرامون پیل سوختی تامین می‌گردد. از آنجا که پیل‌های سوختی دستگاه‌های الکتروشیمیایی هستند و بدون انجام عمل احتراق کار می‌کنند، گازهای آلاینده احتراقی تولید نمی‌شود [۱۱۱].



شکل ۶-۱: شماتیکی از پیل سوختی و نحوه کارکرد آن

یک پیل سوختی می‌تواند در راندمان بالا کار کند و فرصتی را برای جذب گرما و استفاده از آن که توسط فرایند تولید می‌شود، فراهم کند. در پیل سوختی از اجزای متحرک استفاده نشده است و در نتیجه یک منبع پایدار و قابل اعتماد از توان، برق، گرما و آب است [۱۱۱].

تجهیزات پیل سوختی شامل مجموعه‌ای از سل‌های سوختی می‌باشد که یک استک پیل سوختی را ایجاد می‌کنند. چنین مجموعه‌هایی به عنوان قلب تجهیزات پیل‌های سوختی یا واحدهای تولید توان می‌باشند. علاوه بر این، پیل‌های سوختی ممکن است یک بخش فرآوری سوخت به صورت جداگانه یا یکپارچه در استک پیل سوختی داشته باشند که از سوخت‌هایی هیدروکربنی شامل گاز طبیعی، متانول و غیره در تولید توان استفاده کنند. جایی که جریان متناوب (AC) مورد نیاز است، یک بخش تبدیل توان برای تبدیل جریان مستقیم (DC) تولید شده توسط پیل سوختی به جریان متناوب (AC) وجود خواهد داشت [۱۱۱].

به طور کلی، یک سیستم پیل سوختی شامل قسمت‌های فرآوری سوخت، استک پیل سوختی (مجموعه‌ای از سل‌های پیل سوختی که هرکدام از سل‌ها شامل الکتروود، الکترولیت و اکسید کننده می‌باشند) و تجهیزات تبدیل توان می‌باشد. در ادامه هریک از قسمت‌های پیل سوختی معرفی خواهند شد [۱۱۱].

۶-۲-۱- فرآوری سوخت مورد نیاز پیل سوختی

اساس کار قسمت فرآوری سوخت یا ریفرمینگ، فراهم نمودن سوخت هیدروژنی نسبتاً خالص برای پیل سوختی می‌باشد که با استفاده از سوختی که به راحتی در دسترس است و یا قابل حمل است تامین می‌گردد. هیدروژن از هر نوع سوخت هیدروکربنی مانند گاز طبیعی، گاز مایع و یا حتی سوخت دیزل می‌تواند تامین شود. فرآیند ریفرمینگ اصطلاحی کلی است که به فرایند تبدیل سوخت‌های مایع یا گازهای سبک هیدروکربنی به هیدروژن و مونوکسید کربن گفته می‌شود. سه روش تجاری و پیشرفته ریفرمینگ شامل ریفرمینگ با بخار آب، ریفرمینگ اکسیداسیون جزئی و ریفرمینگ اتوترمال می‌باشد. این فرایندها شامل گرم کردن سوخت‌های هیدروکربنی به نقطه تبخیر و سپس تزریق بخار سوپرهیت برای کمک به انجام واکنش ریفرمینگ است. منبع حرارتی برای تامین گرمای مورد نیاز واکنش معمولاً یک کوره حرارت بالا است که بخشی از سوخت ورودی و یا خروجی سوخت از پیل سوختی را می‌سوزاند و حرارت لازم را تامین می‌کند. گرمای خروجی از سیستم پیل سوختی نیز می‌تواند به عنوان منبع گرما استفاده شود [۱۱۱].

ریفرمینگ سوخت‌های غنی از هیدروکربن اغلب کامل نیست و گازهایی مانند مونوکسید کربن از میان فرآیند ریفرمینگ تولید می‌گردد. این گازها توسط کاتالیست می‌تواند به آب و دی‌اکسید کربن تبدیل گردد.

۶-۲-۲- الکترودهای مورد استفاده در پیل سوختی

گاز غنی از هیدروژن حاصل از فرآیند ریفرمینگ (یا در صورت استفاده مستقیم از هیدروژن ذخیره سازی شده در سایت) به طور مداوم به الکترودها که در آن واکنش الکتروشیمیایی برای تولید جریان الکتریکی تغذیه می‌گردد. همانند یک باتری، دو الکتروود آند و کاتد برای تولید برق مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۶-۲-۳- الکتروود آند

در سمت آند پیل سوختی، الکترون‌ها از مولکولهای هیدروژن جدا شده تا بتوانند در یک مدار خارجی وارد گردند. آند با استفاده از کانال‌هایی که گاز هیدروژن را به طور مساوی بر روی سطح کاتالیزور پراکنده می‌کند، با گرفتن الکترون از مولکول‌های هیدروژنی، آنها را به یون‌های مثبت تبدیل می‌کند و در نتیجه الکترون‌های منفی آزاد شده وارد مدار خارجی می‌گردند و تولید انرژی الکتریکی می‌کنند. در ادامه با انتقال یون‌های منفی اکسیژن از طریق الکترولیت به سمت آند، این یون‌ها با یونهای مثبت هیدروژن واکنش داده و تولید آب می‌کنند.

۶-۲-۲- الکترود کاتد

کاتد پیل سوختی با داشتن کانال‌هایی، تأمین مداوم اکسیژن را از هوا بر روی سطح کاتالیزور فراهم می‌کند. الکترون‌ها از مدار خارجی به کاتالیست کاتد انتقال می‌یابند و در سمت کاتد این الکترون‌ها با مولکول‌های اکسیژن واکنش داده و یون‌های منفی اکسیژن را تشکیل می‌دهند.

۶-۲-۳- الکترولیت

الکترولیت در پیل‌های سوختی اکسید جامد، یون‌های منفی اکسیژن را به سمت آند هدایت نموده که در سمت آند با مولکول‌های هیدروژن واکنش داده و الکترون‌های آزاد را تولید می‌کنند. در نتیجه الکترولیت‌ها نقش کامل‌کننده چرخه تولید الکتریسیته را برعهده دارند. همچنین به عنوان یک انسدادکننده از عبور جریان‌های سوخت و اکسیژن به طرف‌های دیگر و در نتیجه ترکیب شدن این جریان‌ها جلوگیری می‌کنند.

۶-۲-۴- استک پیل سوختی

جهت افزایش ولتاژ پیل‌های سوختی، تعدادی از سل‌های پیل سوختی می‌توانند با یکدیگر یکپارچه شده و استک پیل سوختی را ایجاد کنند. به عبارتی ساده، سل‌های بیشتر در یک استک و استک‌های بیشتر در یک تجهیز، می‌تواند توان خروجی بزرگتری را ایجاد کند. ترم چگالی توان استک بیان می‌کند که چه مقدار توان به ازای سطح داده شده تولید می‌شود.

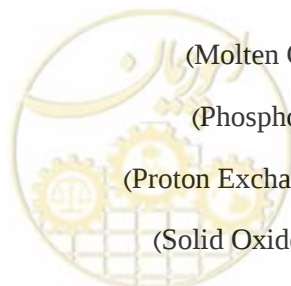
۶-۲-۵- تجهیزات مبدل توان

سیستم پیل سوختی می‌تواند هردو جریان DC و AC را فراهم کند. خروجی اصلی سیستم پیل سوختی جریان DC است. واحد تبدیل توان برای یک واحد پیل سوختی جهت تأمین جریان الکتریکی AC می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. این سیستم‌ها دارای متناوب‌ساز جریان الکتریکی هستند و جریان DC را به جریان AC تبدیل می‌کنند.

۶-۳- انواع پیل سوختی و کاربردهای آن

در حال حاضر چهار نوع اصلی پیل سوختی با کاربرد ساکن و متحرک مورد استفاده قرار می‌گیرد. این چهار نوع عبارتند از [۱۱۲]:

- پیل سوختی کربنات مذاب (Molten Carbonate)
- پیل سوختی اسید فسفریک (Phosphoric Acid)
- پیل سوختی پلیمری (Proton Exchange Membrane)
- پیل سوختی اکسید جامد (Solid Oxide Fuel Cell)



پیل‌های سوختی براساس نوع الکترولیت بکار رفته در آنها کلاسه بندی می‌شوند. الکترولیت، نوع واکنش‌های شیمیایی که در پیل سوختی رخ می‌دهد، نوع کاتالیزورهای مورد نیاز، محدوده دما که در آن پیل سوختی عمل می‌کند، سوخت مورد نیاز و سایر عوامل دیگر را تعیین می‌کند. این ویژگی‌ها به نوبه خود، بر کارکرد و شرایط عملیاتی مورد نیاز که برای انواع پیل‌های سوختی مورد نیاز است، تاثیر می‌گذارد. در جدول (۶-۱) چهار پیل سوختی صدرالذکر با یکدیگر مقایسه شده‌اند [۱۱۱-۱۱۲].

جدول ۶-۱: مشخصات فنی انواع پیل‌های سوختی

پارامتر	SOFC	PEMFC	PAFC	MCFC
الکترولیت	اکسید فلز جامد	غشای تبادل یونی	اسید فسفریک مایع	نمک کربنات گداخته
دمای عملیاتی (سانتیگراد)	۶۰۰ - ۱۰۰۰	۶۰ - ۱۰۰	۱۵۰ - ۲۰۰	۶۵۰ - ۶۰۰
نوع ریفورمینگ	داخلی / خارجی	خارجی	خارجی	داخلی / خارجی
اکسید کننده	هوا / O_2	هوا / O_2	هوا / O_2	هوا / O_2 / CO_2
بازده بر حسب درصد (بدون بازیابی حرارتی)	۴۵ - ۶۰	۳۵ - ۵۰	۳۵ - ۵۰	۴۵ - ۶۰
بازده بر حسب درصد (با بازیابی حرارتی)	۸۵	۶۰	۸۰	۸۵
ماکزیمم توان خروجی (کیلووات)	۲۲۰	۲۵۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰
استفاده از حرارت اضافی	گرم کردن آب یا تولید بخار آب	گرم کردن فضا یا گرم کردن آب	گرم کردن فضا یا گرم کردن آب	تولید بخار آب با فشار بالا

*** مشخصات فنی بیشتر در مراجع مربوطه ارائه شده است.

۶-۳-۱- کاربرد پیل سوختی پلیمری

کاربرد مهم اینگونه پیل سوختی، در بخش ترابری است زیرا که آثار مثبتی روی کاهش آلاینده‌های محیط زیستی دارد و از انتشار گازهای گلخانه‌ای جلوگیری می‌کند. به علاوه، این نوع پیل سوختی، در زمینه تولید جریان الکتریسیته به صورت متحرک و ثابت نیز کاربرد دارد، اما بیشترین کاربرد آن در تولید جریان برق برای خودروهای پیل سوختی است. اکثر شرکت‌های خودروسازی در جهان، فقط استفاده از اینگونه پیل سوختی را برای خودروها جایز دانسته‌اند زیرا این پیل چگالی جریان برق بالایی را تولید می‌کند. کشورهای صنعتی جهان که در صنعت تولید اتومبیل پیشرو هستند درحال حاضر در تجاری‌سازی تعداد محدودی از خودروهای پیل سوختی موفق بوده‌اند و پیش‌بینی می‌شود این تجاری‌سازی از سال ۲۰۳۰ به بعد در سطح وسیعی انجام گیرد [۱۱۲]. پیل سوختی پلیمری در تولید برق غیرمتمرکز در مقیاس ۵۰ تا ۲۵۰ کیلووات و یا کمتر از ۱۰ کیلووات برای مصارف خانگی نیز کاربرد دارد. در واقع اولین کاربرد اینگونه پیل‌های سوختی، برای تولید برق خانگی است چرا که همزمان از گرمای حاصل نیز در منازل استفاده می‌شود تا راندمان بیشتری حاصل شود.

۶-۳-۲- کاربرد پیل سوختی اسید فسفریک

پیل‌های سوختی اسید فسفریک، اولین پیل‌های سوختی هستند که در نیروگاه‌های برق مورد استفاده قرار گرفتند و به صورت تجاری درآمدند و تا به امروز نیز بیشترین مصرف تجاری را در میان پیل‌های سوختی داشته‌اند، اما انتظار می‌رود این موقعیت خود را در دراز مدت، با پیل‌های سوختی دیگری که بهره‌برداری از آنها ارزانتر است و در دمای بالاتر از ۵۰۰ درجه سلسیوس عمل می‌کنند، عوض کنند. اگر چه این پیل‌ها در تولید برق اتوبوس‌ها با موفقیت به کار گرفته شده‌اند، اما به نظر می‌رسد برای این کار، چندان هم ایده‌آل نیستند. پیل سوختی اسید فسفریک به حالت ساکن، بیشتر برای تولید برق نیروگاهی مناسب است و تا به حال بیش از ۲۰۰ نیروگاه تولید برق با استفاده از این فناوری در گوشه و کنار جهان، مخصوصاً در ژاپن راه‌اندازی شده و مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۱۲]. کاربرد چند منظوره این پیل هنگامی است که از برق و گرمای حاصل از آن، به صورت همزمان استفاده کرد. برای این منظور از پیل سوختی فسفریک اسید در آپارتمان‌ها، مراکز خرید، بیمارستان‌ها، هتل‌ها و غیره نیز برای ایجاد انرژی الکتریکی و آب گرم مصرفی برای شستشو و نیز گرم کردن فضا استفاده می‌شود. همچنان برای تأمین برق وسایل رایانه‌ای در جایی که دسترسی به برق شبکه نیست و نیز در بخش‌های نظامی برای تولید همزمان برق و حرارت به کار گرفته می‌شوند.

۶-۳-۳- کاربرد پیل سوختی اکسید جامد

پیل سوختی اکسید جامد در دماهای بالا عمل می‌کند (۱۰۰۰-۶۰۰ درجه سلسیوس) و لذا کاربرد آن منحصر به مواردی است که بتوان از جریان برق و حرارت به صورت همزمان استفاده کرد و حرارت حاصل را در صنایع برای ایجاد بخار خشک و تولید برق اضافی و نیز در منازل هم مورد استفاده قرار داد. در حال حاضر از این تکنولوژی برای تولید برق نیروگاه‌های متوسط و بزرگ و سیکل‌های ترکیبی استفاده می‌شود. با توجه به تولید برق با چگالی جریان بالا از آن و فقدان آثار زیان‌بار زیست محیطی، از پیل سوختی اکسید جامد در خودروها نیز می‌توان استفاده کرد [۱۱۲].

۶-۳-۴- کاربرد پیل سوختی کربنات مذاب

کاربردهای تجاری پیل سوختی کربنات مذاب، شبیه به کاربردهای پیل سوختی اکسید جامد است ولی در دمای کمی پایین‌تر از ۶۵۰ درجه سلسیوس عمل می‌کند و لذا ترکیب آن با توربین‌های گازی آسانتر از پیل سوختی اکسید جامد است. تفاوت اصلی این پیل با پیل اکسید جامد در استفاده آن از CO₂ است. این مساله طراحی پیل سوختی کربنات مذاب برای تولید برق کمتر از ۲۵۰ کیلووات را با مشکل مواجه می‌سازد. کاربردهای این پیل، در صنایع الکتریکی و نظامی گسترش یافته است [۱۱۲].



۶-۴- مزایا و معایب پیل‌های سوختی

همانند سایر فناوری‌ها، پیل‌های سوختی نیز دارای مزایا و معایبی هستند. مزایای پیل‌های سوختی عبارتند از [۱۱۳]:

❖ داشتن بازدهی بالا نسبت به وسایلی که از سوخت‌های شیمیایی معمول نظیر نفت و بنزین استفاده می‌کنند.

❖ به دلیل وابسته نبودن به سوخت‌های فسیلی متداول نظیر بنزین و نفت، وابستگی و ناپایداری اقتصادی را کاهش می‌دهند.

❖ نصب پیل‌های سوختی در قالب نیروگاه‌های کوچک موجب کاهش شبکه توزیع و کاهش اتلاف انرژی می‌شود.

❖ سازگاری با محیط زیست، چون تنها محصول جانبی ایجاد شده در پیل‌های سوختی آب است.

❖ عدم آلودگی صوتی، از آنجایی که در پیل‌های سوختی اجزای متحرک وجود ندارد، این وسیله بسیار بی‌صدا و آرام است.

❖ راه‌اندازی آسان

❖ قابل تنظیم بودن زمان عملکرد با توجه به میزان سوخت

❖ امکان استفاده از سوخت‌های گوناگون

❖ به علت عدم وجود اجزای متحرک نگهداری از آنها بسیار ساده است.

❖ برخی از انواع پیل‌های سوختی قابلیت تولید همزمان برق و حرارت را دارند.

در نقطه مقابل معایب پیل‌های سوختی عبارتند از :

➤ گران بودن، از آنجایی که هنوز خطوط تولید پیل‌های سوختی وجود ندارد، تولید انبوه آنها بسیار گران است.

علاوه بر این، در ساخت این پیل‌ها از برخی مواد گران قیمت (مانند کاتالیست‌ها) نیز استفاده می‌شود.

➤ ممکن است در مدت کار طولانی، گرما موجب مشکلاتی چون ناسازگاری عناصر و افت انرژی شود.

➤ در صورت استفاده از سوخت ناخالص، کار و گرمای بیش از حد موجب رسوب کربن و در نهایت مسمومیت

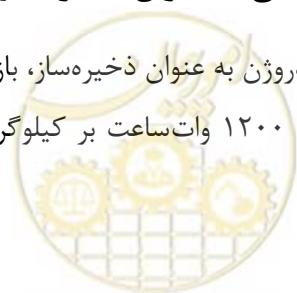
پیل می‌گردد.

۶-۵- مشخصات و ویژگی‌های پیل سوختی به عنوان ذخیره‌ساز انرژی

برای سیستم‌های پیل سوختی با سوخت هیدروژن به عنوان ذخیره‌ساز، بازه توان ۰٫۳ تا ۵۰ مگاوات، بازه انرژی کمتر

از ۲۰۰ مگاوات ساعت، انرژی مخصوص ۶۰۰ تا ۱۲۰۰ وات ساعت بر کیلوگرم و توان مخصوص بین ۵ تا ۸۰۰ وات بر

کیلوگرم گزارش شده است [۱۱].



زمان دشارژ از چند ثانیه تا ۲۴ ساعت، زمان پاسخگویی معادل چند ثانیه، دشارژ خودی نزدیک به صفر، بازده بین ۳۰ تا ۵۰ درصد، تداوم بین ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ و طول عمر بین ۵ تا ۱۵ سال از جمله دیگر مشخصات سیستم‌های پیل سوختی مبتنی بر هیدروژن بشمار می‌روند. ولتاژ نامی متوسط هر سلول از این ذخیره‌ساز بین ۰٫۲ تا ۱٫۱ ولت می‌باشد. دو بازه دمایی ۵۰ تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد و ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد برای ذخیره‌ساز شیمیایی از نوع پیل سوختی در نظر گرفته می‌شود [۱۲].

هزینه سرمایه‌گذاری برای این ذخیره‌ساز شامل هزینه مربوط به توان بین ۴۰۰ تا ۲۰۰۰ دلار به ازای هر کیلووات و هزینه مربوط به انرژی بین ۱ تا ۱۵ دلار به ازای هر کیلووات ساعت گزارش شده است [۱۱].

با در نظر گرفتن سطوح خوب، معمولی و ضعیف برای شاخصهای مقیاس‌پذیری و ایمنی و سطوح زیاد، متوسط و کم برای شاخص انعطاف‌پذیری، پیل‌های سوختی هیدروژنی در شاخص اول در سطح خوب، در شاخص دوم در سطح معمولی و در شاخص آخر در سطح متوسط قرار می‌گیرند [۱۹].

۶-۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

برق مازاد ناشی از منابع تجدیدپذیر یا منابع اولیه دیگر را می‌توان جهت الکترولیز آب و تولید هیدروژن بکار برد. هیدروژن تولیدی قابل ذخیره‌کردن بوده و می‌تواند در بازتولید برق با استفاده از پیل سوختی مورد استفاده قرار گیرد. بنابر این مجموعه الکترولایزر و پیل سوختی تشکیل یک ذخیره‌ساز شیمیایی را می‌دهند. در این فصل از ضابطه در گام اول به بحث الکترولیز آب و انواع فناوری‌های مورد استفاده پرداخته شد. در گام بعدی پیل سوختی معرفی شد. این معرفی شامل نحوه کارکرد، اجزاء، انواع، کاربردها و مزایا و معایب پیل‌های سوختی بود. در گام آخر، مشخصات و ویژگی‌های پیل سوختی به عنوان ذخیره‌ساز انرژی مورد بررسی قرار گرفت.



فصل ۷

مقایسه انواع روش‌های ذخیره‌سازی انرژی

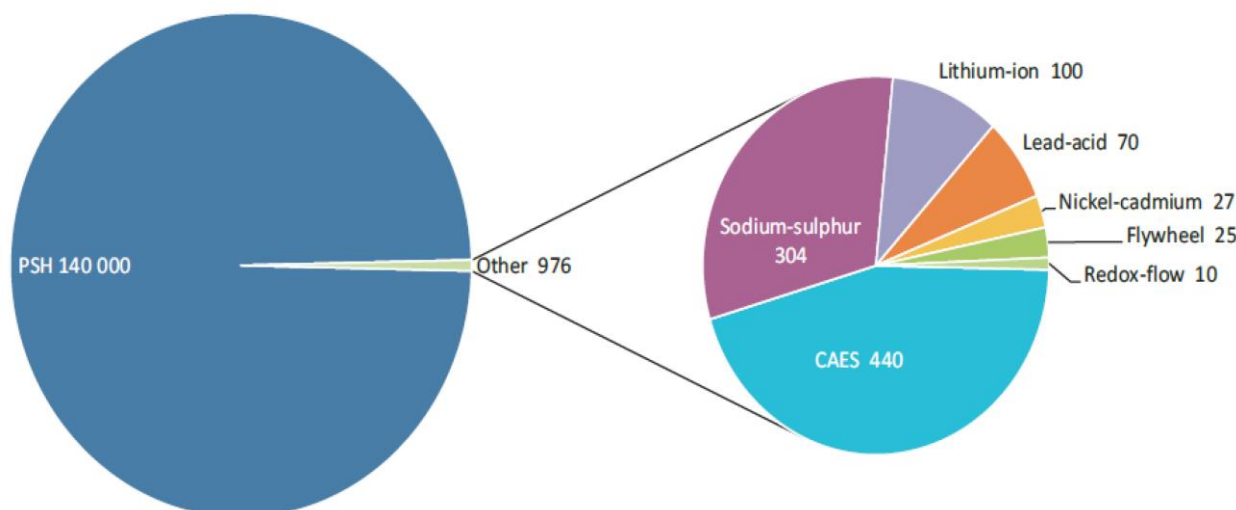


مقدمه

در این فصل از گزارش به مقایسه روش‌های ذخیره‌سازی انرژی پرداخته می‌شود. در گام اول به جهت آشنایی هر چه بیشتر با وضعیت ذخیره‌سازی انرژی در دنیا، آمار و اطلاعاتی در خصوص میزان ظرفیت نصب شده از ذخیره‌سازها در دنیا و کشورهای پیشگام در این حوزه ارائه می‌شود. در ادامه روش‌های ذخیره‌سازی انرژی به تفکیک تجهیزات از لحاظ مشخصات فنی و اقتصادی و نوع کاربرد (بخصوص کاربرد در صنعت برق) با یکدیگر مقایسه شده تا از این طریق امکان انتخاب یا حداقل محدود کردن فضای انتخاب بوجود آید.

۷-۱- ظرفیت نصب شده از ذخیره‌سازها در کشورهای مختلف جهان

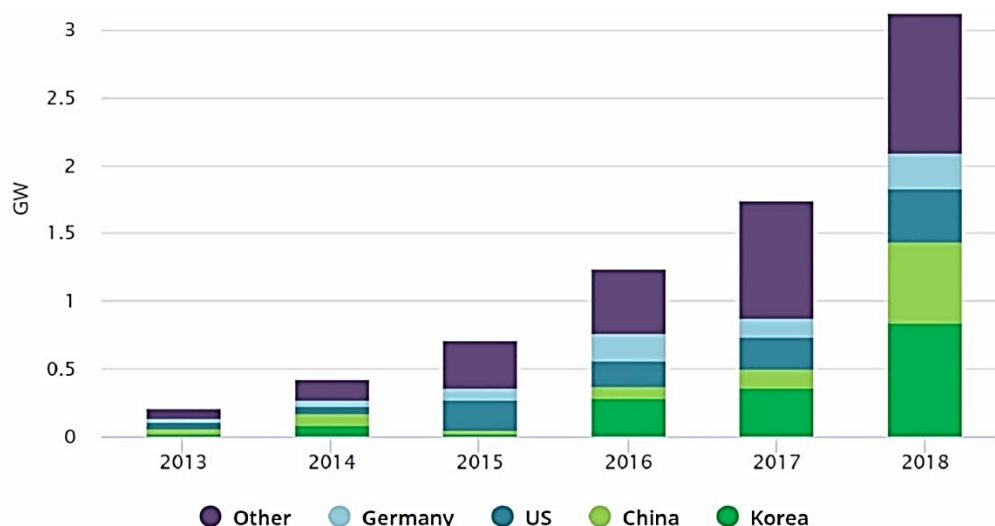
ظرفیت نصب شده از ذخیره‌سازها در مقیاس شبکه در صنعت برق جهان در سال ۲۰۱۴ بیش از ۱۴۰ گیگاوات بوده است. بیش از ۹۹ درصد این ظرفیت به سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای اختصاص داشته و مابقی (کمتر از ۱ درصد) شامل ترکیبی از فناوری‌های باتری، ذخیره‌ساز هوای فشرده، چرخ طیار و غیره بوده است. شکل (۷-۱) توزیع ظرفیت مذکور را نشان می‌دهد. ظرفیت بالای سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای موجب می‌شود که سایر مطالعات تطبیقی مربوط به ظرفیت ذخیره‌سازها بدون در نظر گرفتن این سیستم‌ها صورت پذیرد [۱۱۴].



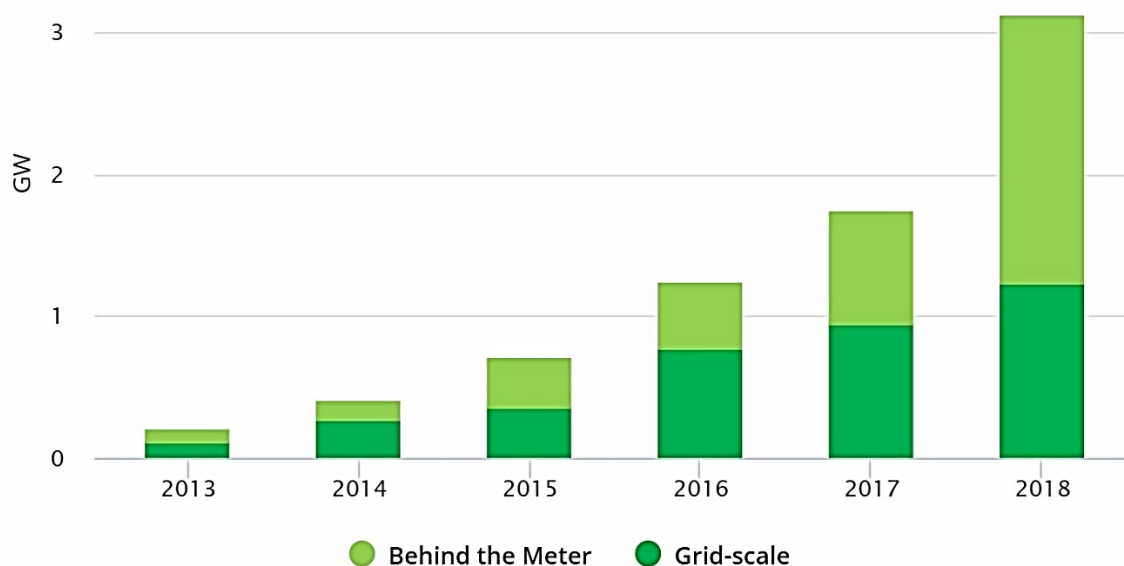
شکل ۷-۱: ظرفیت نصب شده از انواع ذخیره‌سازها در مقیاس شبکه در صنعت برق جهان در سال ۲۰۱۴

سال ۲۰۱۸ یک سال استثنائی و ویژه برای ذخیره‌سازی انرژی در جهان بوده است. در این سال ظرفیت جدیدالاحداث از ذخیره‌سازها در جهان نسبت به سال قبل افزایش دو برابری داشته است. کشورهای کره جنوبی، چین، آمریکا و آلمان در این حوزه پیشرو هستند. استرالیا نیز در سال‌های اخیر به جمع کشورهای پیشرو در حوزه ذخیره‌سازی انرژی ملحق شده است. سیاست‌های حمایتی دولت‌ها و شکل‌گیری بازارهای مرتبط ناشی از تشویق‌های مندرج در

سیاست‌های مذکور عامل اصلی رشد ذخیره‌سازها بوده است. شکل (۲-۷) ظرفیت جدیدالاحداث از انواع ذخیره‌سازها به تفکیک کشورهای مذکور و شکل (۳-۷) ظرفیت جدیدالاحداث از ذخیره‌سازها به تفکیک در مقیاس شبکه و پشت اندازه‌گیر (استفاده در مقیاس مصرف‌کننده) را نشان می‌دهد [۱۱۵]. مطابق آنچه که گفته شد از سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای در این نمودارها صرف نظر شده است.

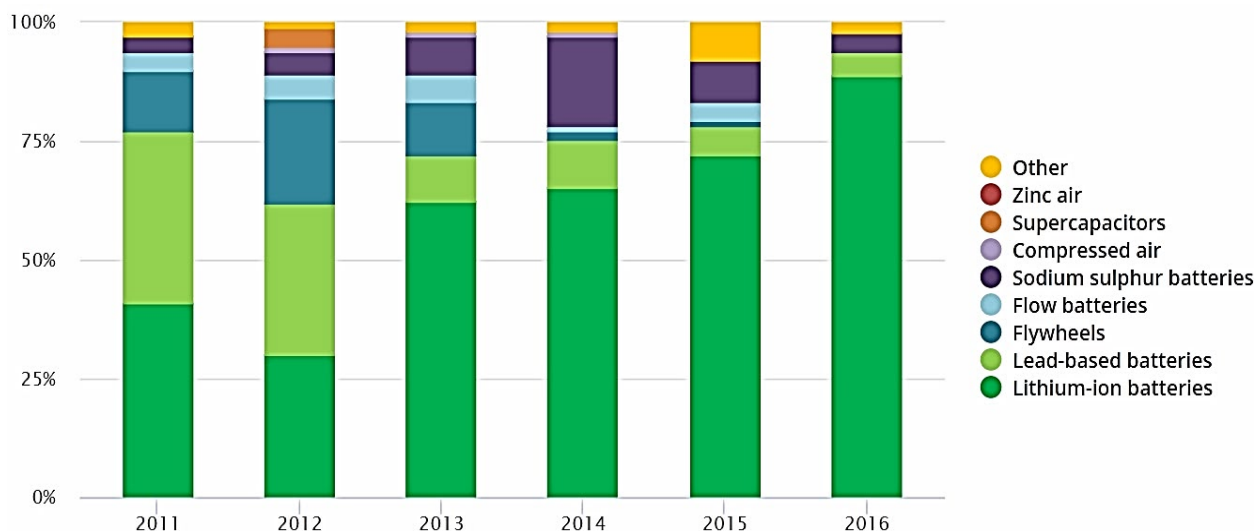


شکل ۲-۷: ظرفیت جدیدالاحداث از ذخیره‌سازها (به غیر از تلمبه ذخیره‌ای) در کشورهای مختلف جهان طی سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۸



شکل ۳-۷: ظرفیت جدیدالاحداث از ذخیره‌سازها (به غیر از تلمبه ذخیره‌ای) به تفکیک در مقیاس شبکه و پشت اندازه‌گیر در دنیا طی سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۸

شکل (۴-۷) سهم هر یک از انواع ذخیره‌سازها از کل ظرفیت جدیدالاحداث را طی سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۶ نشان می‌دهد [۱۱۵].



شکل ۷-۴: سهم هر یک از ذخیره‌سازها (به غیر از تلمبه ذخیره‌ای) از کل ظرفیت جدیدالاحداث در سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۶

همانگونه که از شکل (۷-۴) نیز پیداست، باطری‌های لیتیم-یونی گوی سبقت را از انواع ذخیره‌سازها ربوده‌اند. سهم باطری‌های لیتیم-یونی از کل ظرفیت جدیدالاحداث در سال ۲۰۱۶ بیش از ۸۰ درصد بوده است. بعد از باطری‌های لیتیوم-یونی باطری‌های سرب-اسیدی قرار گرفته‌اند هر چند که سهم این باطری‌ها از سال ۲۰۱۳ به بعد رو به افول نهاده است. باطری‌های سدیم-سولفور در رتبه سوم از کل ظرفیت جدیدالاحداث قرار دارند و سهم مجموع این سه گروه بیش از ۹۵ درصد کل ظرفیت نصب شده است.

۷-۲- مقایسه انواع ذخیره‌سازها

مقایسه ذخیره‌سازها از دو جهت امکانپذیر است. اول آنکه کاربرد خاصی از ذخیره‌ساز (به عنوان مثال کنترل فرکانس در شبکه) مورد نیاز است که در این حالت مقایسه به انتخاب طیف یا گروهی متشکل از چند ذخیره‌ساز منجر می‌شود. دوم آنکه دو یا چند ذخیره‌ساز برای یک کاربرد مشخص مناسب هستند و شخص یا نهاد استفاده کننده قصد دارد با در نظر گرفتن مشخصات فنی و اقتصادی و سایر محدودیت‌های لازم به انتخاب یک ذخیره‌ساز اقدام نماید. در اینجا لازم است مشخصات فنی و اقتصادی ذخیره‌سازها در کنار یکدیگر قرار داده شده و مقایسه مورد نیاز صورت پذیرد. در ادامه به هر یک از انواع مقایسه‌ها پرداخته می‌شود.

۷-۲-۱- مقایسه ذخیره‌سازها از لحاظ مشخصات فنی و اقتصادی

مشخصات فنی و اقتصادی ذخیره‌سازها در جداول (۷-۱) و (۷-۲) آورده شده است [۱۹-۱۸ و ۱۱-۱۲]. حرف k نشان دهنده ۱۰۰۰ است.



جدول ۷-۱: مشخصات فنی و اقتصادی انواع ذخیره‌سازها

مشخصات	نوع ذخیره‌ساز	خازنهای دولایه الکترواستاتیک	شبه خازن	خازنهای ترکیبی	لیتیم یونی	سرب- اسیدی	جریانی		پایه نیکل		دما بالا	
							وانادیومی	روی-بروم	نیکل-کادمیم	نیکل- هیدرید فلز	سدیم- سولفور	سدیم- فلز-
بازه توان (مگاوات)	۰,۰۱-۱	۰,۰۵-۱۰	≤۲۰	۰,۰۱-۱۰	۰,۰۲-۱۰	≤۴۰	≤۳	≤۵۰	۰,۰۵-۱	کلرید	سولفور	سدیم- فلز-
بازه انرژی (مگاوات ساعت)	۰,۰۰۱-۰,۱	۰,۰۵-۲,۵	۱۸-۱۰۰	۰,۰۱-۱۰	۰,۰۵-۵	≤۷	≤۰,۵	≤۲۴۵	≤۵	کلرید	سولفور	سدیم- فلز-
انرژی مخصوص (وات ساعت بر کیلوگرم)	۳-۵	۱۰	۱۵۰-۲۰۰	۳۰-۵۰	۲۵-۳۵	۶۵-۷۵	۱۵-۵۵	۶۰-۸۰	۱۵۰-۲۴۰	۸۶-۱۴۰	۱۵۰-۲۴۰	۸۶-۱۴۰
توان مخصوص (وات بر کیلوگرم)	۲۰۰۰-۱۰۰۰۰	۱۵۰-۲۰۰	۳۰۰۰-۱۴k	۱۵۰-۲۰۰	۲۰۰-۴۰۰	≤۱۰	۵۰-۱۵۰	۱۵۰-۳۵۰	۱۵۰-۴۶۰	۹۰-۲۳۰	۱۵۰-۲۴۵	۱۸۰-۲۴۵
چگالی حجمی انرژی (کیلووات ساعت بر مترمکعب)	۱۰-۲۰	۲۰۰-۴۰۰	۵۰-۸۰	۲۰۰-۴۰۰	۲,۵-۲۰	≥۶۵	≤۱۱۰	≤۳۵۰	≤۴۰۰	۱۵۰-۲۰۰	۱۵۰-۲۰۰	۱۵۰-۲۰۰
چگالی حجمی توان (کیلووات بر مترمکعب)	۴۰k-۱۲۰k	۱۳۰۰-۱۰۰۰۰	۹۰-۷۰۰	۰,۵-۲	۱-۲۵	۷۵-۷۰۰	۵۰۰-۳۰۰۰	۱۲۰-۱۶۰	۲۵۰-۲۷۰	۱۲۰-۱۶۰	۲۵۰-۲۷۰	۲۵۰-۲۷۰
زمان شارژ	۱-۱۰ ثانیه	دقیقه-ساعت	ساعت	ساعت	ساعت	ساعت	ساعت	۳-۴ ساعت	۱-۲ ساعت	۲-۴ ساعت	۹ ساعت	≤ ۶ ساعت
زمان پاسخگویی	میلی ثانیه	میلی ثانیه	میلی ثانیه	میلی ثانیه	میلی ثانیه	میلی ثانیه	میلی ثانیه	میلی ثانیه	میلی ثانیه	میلی ثانیه	میلی ثانیه	میلی ثانیه
زمان دشارژ	میلی ثانیه - دقیقه	دقیقه-ساعت	دقیقه-ساعت	دقیقه-ساعت	دقیقه-ساعت	دقیقه-ساعت	دقیقه-ساعت	دقیقه-ساعت	دقیقه-ساعت	دقیقه-ساعت	دقیقه-ساعت	دقیقه-ساعت
بازه ذخیره‌سازی	ثانیه تا ساعت	دقیقه تا روز	دقیقه تا روز	ساعت تا ماه	ساعت تا ماه	ساعت تا ماه	دقیقه تا روز	ساعت تا ماه	دقیقه تا روز	دقیقه تا روز	دقیقه تا روز	روز
عمق دشارژ (درصد)	۱۰۰	۸۰	۸۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
دشارژ خودی (درصد در روز)	۲۰-۴۰	۰,۱۵-۰,۳	۰,۱-۰,۴	۰	۰	۰,۲-۰,۳	۰,۴-۱,۲	۰,۵-۱	۰,۵	۰,۵	۰,۵	۰,۵
بازه دمایی (درجه سانتیگراد)	۴۰ تا ۶۵	۲۰ تا ۶۰	۳۰ تا ۵۰	۱۰ تا ۴۰	۲۰ تا ۵۰	۴۵ تا ۶۰	۴۵ تا ۶۰	۲۰ تا ۴۵	۳۰۰-۴۰۰	۲۷۰-۳۵۰	۲۷۰-۳۵۰	۲۷۰-۳۵۰
ولتاژ نامی هر سلول (ولت)	۲,۷	۲,۳-۲,۸	۳,۶-۴,۲	۲-۲,۳۵	۱,۱۵-۱,۵۵	۱,۸۲	۱,۲	۱,۲	۲,۱	۲,۵۸	۲,۵۸	۲,۵۸
بازده (درصد)	۹۵	۹۰	۸۵-۹۵	۷۰-۹۰	۶۰-۷۵	۶۰-۸۰	۶۰-۷۵	۷۰-۸۰	۷۵-۹۰	۷۵-۹۰	۷۵-۹۰	۷۵-۹۰
تداوم	۱۰۰۰k	۱۰۰k	۵۰۰k	۱۰۰۰-۱۰۰۰۰	۵۰۰-۲۰۰۰	۱۲۰۰۰-۲۰۰۰۰	≥۲۰۰۰	۸۰۰-۲۵۰۰	۸۰۰-۳۰۰۰	۲۵۰۰-۴۰۰۰	۲۵۰۰-۴۰۰۰	۱۰۰۰-۱۲۰۰
طول عمر (سال)	۲۵-۳۰	۲۰-۲۵	۵-۱۵	≤۲۰	۱۰	≤۲۰	≤۱۰	≤۲۰	≤۱۵	≤۱۵	≤۱۵	≤۱۵
هزینه سرمایه-گذاری	توان (دلار بر کیلووات)	۱۰۰-۳۰۰	۱۲۰۰-۴۰۰۰	۱۷۵-۶۰۰	۱۴۰۰-۳۷۰۰	۱۸۰۰-۲۰۰۰	۵۰۰-۱۵۰۰	۶۰۰-۱۸۰۰	۳۲۰۰-۴۰۰۰	۱۵۰-۳۰۰	۱۵۰-۳۰۰	۱۵۰-۳۰۰
هزینه تعمیر و نگهداری	انرژی (دلار بر کیلووات ساعت)	۳۰۰-۲۰۰۰	۴۰۰-۲۵۰۰	۴۰۰-۱۵۰۰	۵۰۰-۸۰۰	۱۰۰-۷۰۰	۶۰۰-۲۴۰۰	۷۲۰-۲۸۸۰	۳۰۰-۵۰۰	۲۳۰-۳۴۵	۲۳۰-۳۴۵	۲۳۰-۳۴۵
هزینه تعمیر و نگهداری	ثابت (دلار بر کیلووات در سال)	۶	۰	۵۰	۷۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
هزینه تعمیر و نگهداری	متغیر (دلار بر کیلووات ساعت)	۰,۰۰۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
فضای مورد نیاز (متر مربع بر کیلووات ساعت)	۰,۴۳	۰,۰۱	۰,۰۶	۰,۰۴	۰,۰۲	۰,۰۳	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۳
تأثیرات مخرب زیست محیطی	کم	خیلی کم	متوسط	کم	کم	متوسط	کم	کم	خیلی کم	کم	خیلی کم	کم
امتیاز بازیافت	۴	۴	۵	۵	۵	۴	۴	۴	۴	۵	۵	۵
قابلیت تحرک	آری	آری	آری	خیر	آری	آری	آری	آری	آری	آری	آری	آری
مقیاس پذیری	ضعیف	خوب	معمولی	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب
انعطاف پذیری	کم	متوسط	متوسط	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد
ایمنی	معمولی	ضعیف	ضعیف	ضعیف	ضعیف	ضعیف	ضعیف	ضعیف	ضعیف	ضعیف	ضعیف	ضعیف

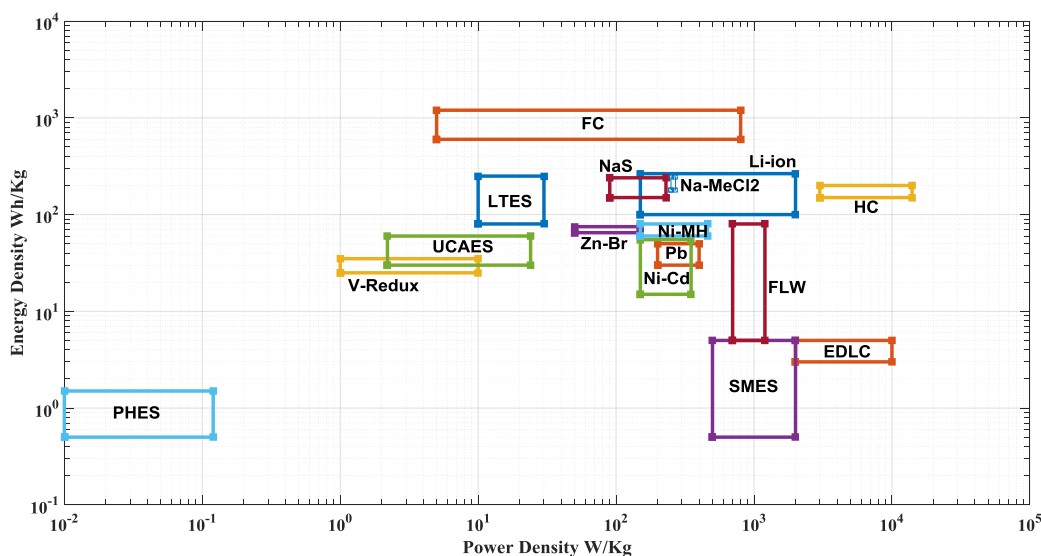
جدول ۷-۲: مشخصات فنی و اقتصادی انواع ذخیره‌سازها

مشخصات	نوع ذخیره‌ساز	کویل‌های مغناطیسی ابر سانا	سیستمهای هوای فشرده		تلمبه ذخیره‌ای	چرخ طیار	پتانسیل گرانشی	حرارتی با دمای پایین	حرارتی با دمای بالا	پیل سوختی با الکترو لایزر
			مخازن زیر زمینی	مخازن روز زمینی						
بازه توان (مگاوات)	۰٫۰۱-۱۰	۵-۳۰۰	۰٫۰۰۳-۳	۱۰۰-۵۰۰۰	۰٫۰۱-۰٫۲۵	۴۰-۱۵۰	≤۳۰۰	≤۶۰	۰٫۳-۵۰	
بازه انرژی (مگاوات ساعت)	≥۰٫۰۱۵	۲۰۰-۱۰۰۰	۰٫۰۰۲-۱۰	۵۰۰-۸۰۰۰	۳-۱۳۳	--	--	--	۲۰۰	
انرژی مخصوص (وات ساعت بر کیلوگرم)	۰٫۵-۵	۳۰-۶۰	۱۴۰ در فشار ۳۰۰ اتمسفر	۰٫۵-۱٫۵	۵-۸۰	۱	۸۰-۲۵۰	۸۰-۲۰۰	۶۰۰-۱۲۰۰	
توان مخصوص (وات بر کیلوگرم)	۵۰۰-۲۰۰۰	۲٫۲-۲۴	--	۰٫۰۱-۰٫۱۲	۷۰۰-۱۲۰۰	۳	۱۰-۳۰	--	۵-۸۰۰	
چگالی حجمی انرژی (کیلووات ساعت بر مترمکعب)	۶	۰٫۴-۲۰	≥۲۰	۰٫۵-۱٫۵	۲۰-۸۰	--	۸۰-۲۰۰	۸۰-۵۰۰	--	
چگالی حجمی توان (کیلووات بر مترمکعب)	۲۶۰۰	۰٫۰۴-۱۰	≥۱۰	۰٫۰۱-۰٫۱۲	≤۲۰۰۰	--	--	--	--	
زمان شارژ	دقیقه	دقیقه- ساعت	دقیقه ۲ تا ساعت	دقیقه- ساعت	۱۵ دقیقه ≤	--	--	--	--	
زمان پاسخگویی	میلی ثانیه	۱۵-۱ دقیقه	ثانیه تا دقیقه	۳ دقیقه ≤	۱ ثانیه ≤	ثانیه	--	--	ثانیه	
زمان دشارژ	میلی ثانیه تا ۸ ثانیه	۱ ساعت ≥	۲-۴ ساعت	۱ تا ۲۴ ساعت	۱۵ ثانیه تا ۱۵ دقیقه	۳۰ ثانیه ≥	۱ تا ۸ ساعت	۱ تا ۸ ساعت	ثانیه تا ۲۴ ساعت	
بازه ذخیره‌سازی	دقیقه تا ساعت	ساعت تا ماه	ساعت تا ماه	ساعت تا ماه	ثانیه تا دقیقه	ساعت تا ماه	--	--	ساعت تا ماه	
عمق دشارژ (درصد)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۵	۱۰۰	--	--	--	--	
دشارژ خودی (درصد در روز)	۱۰-۱۵	۰	۰	۰	۱۰۰	--	۰٫۵-۱	۰٫۵-۱	۰	
بازه دمایی (درجه سانتیگراد)	-۲۷۰ تا -۱۴۰	دمای محیط	دمای محیط	دمای محیط	-۲۰ تا ۴۰	دمای محیط	--	--	۶۰۰-۱۰۰۰ و ۵۰-۱۰۰	
ولتاژ نامی هر سلول (ولت)	--	--	--	--	--	--	--	--	۰٫۲-۱٫۱	
بازده (درصد)	۹۰-۹۷	۴۰-۷۵	۷۰-۹۰	۷۰-۸۰	۹۰-۹۵	۷۵-۸۰	۳۰-۵۰	۸۰	۳۰-۵۰	
تداوم	۲۰k-۱۰۰k	۸۰۰۰-۱۳۰۰۰	≤۳۰۰۰۰	۱۰۰۰۰-۳۰۰۰۰	۲۰k-۱۰۰k	--	--	--	۱۰۰۰-۱۰۰۰۰	
طول عمر (سال)	۲۰-۳۰	۲۵-۴۰	≤۲۵	۴۰-۶۰	۱۵-۲۰	≥۳۰	۱۰-۴۰	۵-۱۵	۵-۱۵	
هزینه سرمایه- گذاری	توان (دلار بر کیلووات)	۲۰۰-۳۵۰	۵۰۰-۱۸۰۰	۱۰۰۰-۱۵۵۰	۵۰۰-۲۰۰۰	۱۰۰-۳۰۰	۲۰۰-۳۰۰	۲۰۰-۳۰۰	۴۰۰-۲۰۰۰	
	انرژی (دلار بر کیلووات ساعت)	۱۰۰۰-۱۰۰۰۰	۵۰-۴۰۰	۲۰۰-۲۵۰	۵-۱۰۰	۱۰۰۰-۵۰۰۰	--	۲۰-۵۰	۱-۱۵	
هزینه تعمیر و نگهداری	ثابت (دلار بر کیلووات در سال)	۱۸٫۵	۱۹-۲۵	۰	۳	۲۰	--	--	--	
	متغیر (دلار بر کیلووات ساعت)	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۳	۰	۰٫۰۰۴	۰٫۰۰۴	--	--	--	
فضای مورد نیاز (مترمربع بر کیلووات ساعت)	۰٫۹۳-۲٫۶	۰٫۱-۰٫۲۸	--	۰٫۰۲	۰٫۲۸-۰٫۶۱	--	--	--	--	
تاثیرات مخرب زیست محیطی	کم	--	--	-	کم	--	--	--	--	
امتیاز باز یافت	--	--	--	-	۴	--	--	--	--	
قابلیت تحرک	آری	خیر	آری	خیر	آری	خیر	خیر	--	--	
مقیاس پذیری	معمولی	ضعیف	ضعیف	خوب	خوب	خوب	--	--	خوب	
انعطاف پذیری	کم	کم	کم	کم	زیاد	--	--	--	متوسط	
ایمنی	ضعیف	خوب	خوب	خوب	معمولی	--	--	--	معمولی	

همانگونه که از جداول (۱-۷) و (۲-۷) نیز پیداست سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای و هوای فشرده با مخازن زیرزمینی در بالاترین سطح از توان مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این بین، کمترین سطح توان به چرخ طیار، سوپرکازن‌ها و باتری‌های سدیم-فلز کلرید اختصاص دارد. سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای و سیستم‌های هوای فشرده با مخازن زیرزمینی در حال حاضر در بالاترین سطح از ذخیره‌سازی انرژی در مقایسه با دیگر ذخیره‌سازها قرار دارند.

از لحاظ انرژی مخصوص، سیستم‌های پیل سوختی به همراه الکترولیزر فعلاً پیش‌تاز هستند و باتری‌های لیتیم یونی و باتری‌های سدیم-سولفور در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. از لحاظ توان مخصوص، سوپر کازن‌ها و بخصوص خازن‌های ترکیبی در حال حاضر تقریباً هیچ رقیبی ندارند و با فاصله قابل توجه نسبت به سایر ذخیره‌سازها قرار گرفته‌اند. نکته قابل توجه در خصوص این پارامتر، کم بودن آن برای سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای است.

شکل (۵-۷) نمودار راگونی انواع ذخیره‌سازها را نشان می‌دهد. در این شکل PHES نشانگر سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای، FC نشانگر پیل سوختی، LTES نشانگر سیستم‌های ذخیره‌ساز حرارتی با دمای پایین، UCAES نشانگر سیستم‌های هوای فشرده با مخزن زیرزمینی، HC نشانگر خازن‌های ترکیبی، EDLC نشانگر خازن‌های دولایه الکترواستاتیک، FLW نشانگر چرخ طیار و SMES نشانگر کوپل‌های مغناطیسی ابررسانا می‌باشد.

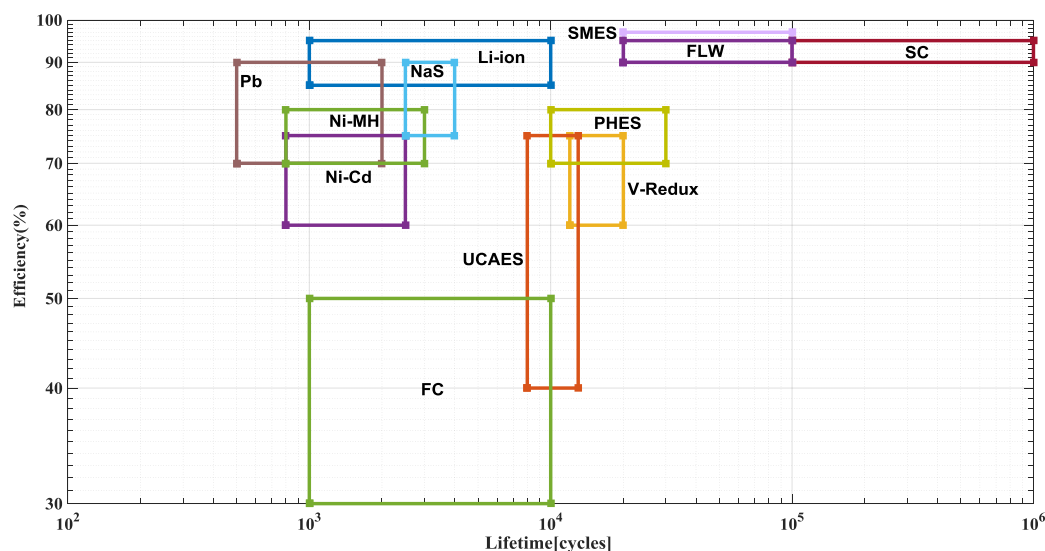


شکل ۵-۷: نمودار راگونی انواع ذخیره‌سازها

مطابق شکل (۵-۷)، فرایند انتخاب ذخیره‌ساز با توان مخصوص بالا و با در نظر گرفتن انرژی مخصوص بالا از سیستم‌های پیل سوختی شروع شده، با مجموعه باتری‌ها ادامه یافته و پس از چرخ طیار و کوپل‌های مغناطیسی پیشرفته نوبت به سوپرکازن‌ها می‌رسد.

شکل (۶-۷) تداوم و بازده انواع ذخیره‌سازها را نشان می‌دهد.



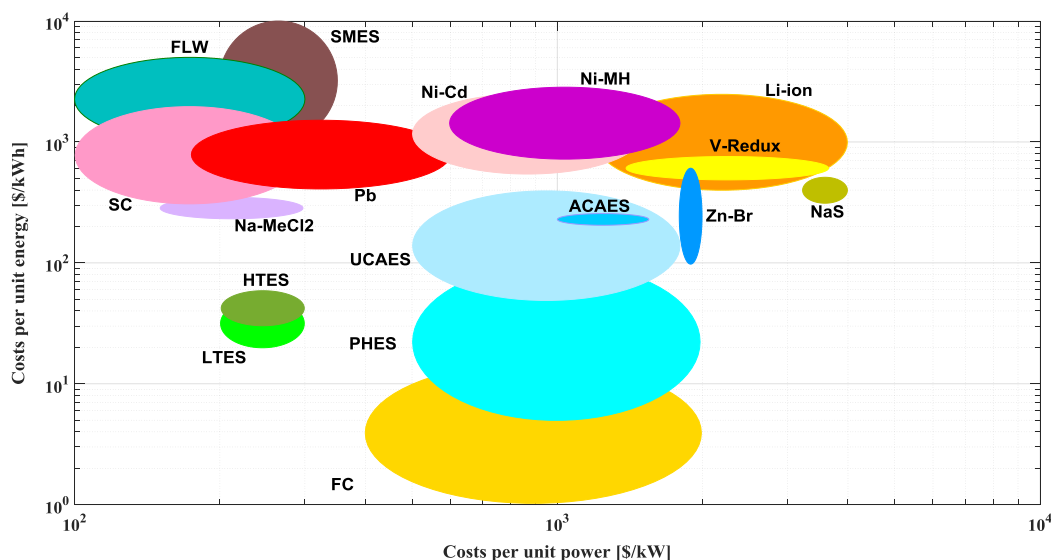


شکل ۷-۶: تداوم و بازده انواع ذخیره‌سازها

شکل (۷-۶) نشان می‌دهد کویل‌های مغناطیسی ابررسانا از لحاظ راندمان یا بازده ذخیره‌سازی و سوپرکازن‌ها از لحاظ تداوم پیش‌تاز هستند. چرخ طیار در کنار کویل‌های مغناطیسی ابررسانا در تعقیب سوپرکازن‌ها از نظر تداوم هستند. فاصله باطری‌های جریان‌ی و انادیومی با سایر باطری‌ها از لحاظ تداوم بسیار زیاد است. باطری‌های سدیم-سولفور رقیب جدی برای باطری‌های لیتیم-یونی بشمار می‌روند. کمترین میزان تداوم در باطری‌های سرب-اسیدی مشاهده شده است. سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای هم راندمان قابل قبولی دارند و هم از تداوم کافی برخوردار هستند. سیستم‌های هوای فشرده با مخزن زیرزمینی تداوم مناسب و بازده کمی در مقایسه با دیگر ذخیره‌سازها دارند. مشکل اصلی سیستم‌های پیل سوختی راندمان پایین آنهاست.

شکل (۷-۷) هزینه سرمایه‌گذاری انواع ذخیره‌سازها را در قالب هزینه توان (محور x) و هزینه انرژی (محور y) نشان می‌دهد. مطابق شکل مذکور، کویل‌های مغناطیسی ابررسانا بالاترین هزینه مربوط به انرژی و باطری‌های لیتیم-یونی در کنار باطری‌های سدیم-سولفور بالاترین هزینه مربوط به توان یک ذخیره‌ساز را به خود اختصاص داده‌اند. کمترین هزینه مربوط به توان نصب شده به طور مشترک به سوپرکازن‌ها و چرخ طیار اختصاص دارد. در این بین کمترین هزینه مربوط به انرژی در سیستم‌های پیل سوختی به همراه الکترولایزر پرداخت می‌شود. سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی حرارتی هم هزینه توان کمی دارند و هم هزینه انرژی در آنها کم است و در صورتی که بتوانند مشخصات فنی مورد نیاز را تامین نمایند، از لحاظ اقتصادی بسیار مقرون به صرفه هستند. هزینه انرژی باطری‌ها همواره بیشتر از ۱۰۰ دلار بر کیلووات ساعت است. سیستم‌های هوای فشرده (زیرزمینی و روزمینی) هزینه توانی معادل سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای دارند لکن هزینه انرژی در آنها بالاتر است و بنابر این از لحاظ اقتصادی سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای ارجحیت دارند.

بیشترین انطباق هزینه در ذخیره‌سازهای حرارتی و کمترین انطباق در ذخیره‌سازهای مکانیکی دیده می‌شود. انتخاب ذخیره‌ساز با توجه به نیازهای فنی و هزینه‌های مرتبط صورت می‌پذیرد و بخصوص با افزایش ظرفیت یا مقیاس سیستم، بررسی اقتصادی اهمیت دو چندان پیدا می‌نماید.



شکل ۷-۷: هزینه سرمایه‌گذاری به تفکیک توان و انرژی برای انواع ذخیره‌سازها

سایر نکات ذیل از جداول (۷-۱) و (۷-۲) قابل استخراج است :

- ۱- کمترین زمان شارژ در سوپرکازن‌ها و بیشترین زمان شارژ در باتری‌های دما بالا مشاهده می‌شود.
- ۲- سیستم‌های الکتریکی و الکتروشیمیایی زمان پاسخگویی کمتر و سایر سیستم‌ها زمان پاسخگویی بیشتری دارند.
- ۳- کمترین زمان دشارژ مربوط به کوپل‌های مغناطیسی ابررسانا بوده و سوپرکازن‌ها در رتبه دوم قرار می‌گیرند. زمان دشارژ سایر سیستم‌ها تا چندین ساعت نیز ممکن است به طول بیانجامد.
- ۴- سوپرکازن‌ها، کوپل‌های مغناطیسی ابررسانا و چرخ طیار دشارژ خودی بسیار بالایی دارند و بنابر این برای ذخیره انرژی در کوتاه مدت مناسب بوده و استفاده از آنها در بازه‌های زمانی بلند مدت امکانپذیر نیست. دشارژ خودی در باتری‌های جریانی برابر صفر و در سایر باتری‌ها و ذخیره‌سازهای حرارتی کم و قابل توجیه است. اطلاعی در خصوص دشارژ خودی در سیستم‌های پتانسیل گرانشی وجود ندارد. در سایر سیستم‌ها دشارژ خودی به سمت صفر میل می‌کند.
- ۵- عمق دشارژ ۱ یا ۱۰۰ درصدی در باتری‌های لیتیم-یونی و سرب-اسیدی و سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای قابل حصول نیست، در خصوص برخی از سیستم‌ها از جمله پتانسیل گرانشی اطلاعی در دست نیست. سوپرکازن‌ها، سایر باتری‌ها، کوپل‌های مغناطیسی ابررسانا، سیستم‌های هوای فشرده و چرخ طیار را می‌توان به صورت کامل شارژ و دشارژ نمود.

- ۶- بیشترین طول عمر در سیستم‌های ذخیره‌سازی مربوط به نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای است. شرایط تعمیرات و نگهداری تاثیر بسزایی در عمر ذخیره‌سازها دارد.
- ۷- بیشترین فضای ذخیره‌سازی مربوط به کویل‌های مغناطیسی ابررسانا و کمترین فضا مربوط به باتری‌های لیتیوم-یونی است.
- ۸- سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای و هوای فشرده از لحاظ ایمنی بالاتر از سایر ذخیره‌سازها قرار می‌گیرند.
- ۹- در حالت مقایسه، انعطاف‌پذیری سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای بسیار بهتر از سیستم‌های هوای فشرده است.

۷-۲-۲- مقایسه ذخیره‌سازها از لحاظ کاربرد

- کاربردهای ذخیره‌سازی انرژی با توجه به ظرفیت، زمان پاسخگویی و زمان دشارژ در ۵ گروه یا کلاس قابل طبقه‌بندی است. این ۵ کلاس عبارتند از [۱۱۶]:
- ۱- کلاس مقیاس شبکه که شامل کاربرد تکنولوژی‌های ثابت (خروجی جریان الکتریکی) ذخیره‌سازی است و تکنولوژی‌های مذکور در نقاط مشخصی از شبکه برق قرار گرفته‌اند.
 - ۲- کلاس پشت اندازه‌گیر که شامل تکنولوژی‌های ثابت ذخیره‌سازی است که در محل مشترک نصب شده و به شبکه متصل نیستند. مشترک توسط شبکه اصلی نیز پشتیبانی می‌شود.
 - ۳- کلاس خارج از شبکه که شامل تکنولوژی‌های ذخیره‌سازی است که در مناطق دورافتاده (دسترسی به شبکه اصلی امکان‌پذیر نیست) مورد استفاده قرار می‌گیرند.
 - ۴- کلاس متحرک که شامل کاربردهای متحرک از ذخیره‌سازها (علی‌الخصوص در بخش حمل و نقل) می‌شود.
 - ۵- کلاس حرارتی که شامل استفاده از ذخیره‌سازها جهت تولید برق، حرارت و سرما است.
- در ادامه به خدمات و سرویس‌های مورد نظر در هر یک از کاربردهای صدرالذکر پرداخته شده، فناوری‌های ذخیره‌سازی مناسب برای هر یک از سرویس‌ها با توجه به توان، زمان دشارژ و زمان پاسخگویی مورد نیاز معرفی خواهند شد. تعریف سرویس‌های مورد نظر به صورت اختصار انجام شده و مراجع مورد نیاز جهت شناخت بهتر آنها نیز معرفی خواهد شد.

۷-۲-۲-۱- خدمات مرتبط با کلاس مقیاس شبکه از ذخیره‌سازها

- در حالت کلی ۱۰ سرویس یا خدمت در خصوص کلاس مقیاس شبکه ذخیره‌سازها مطرح می‌شود. این خدمات عبارتند از [۱۱۶]:
- ۱- به تاخیر انداختن به روزرسانی تجهیزات و سرمایه‌گذاری جدید: با افزایش پیک بار، نیاز به تقویت یا جایگزینی تجهیزات مختلف شبکه بیش از پیش احساس می‌شود. استفاده از ذخیره‌سازها می‌تواند زمان تقویت، تعمیرات

اساسی و حتی نوسازی تجهیزات شبکه را با تاخیر مطلوبی همراه سازد. این خدمت یا سرویس اخیراً در اروپا مورد توجه بسیار قرار گرفته است.

۲- تجارت برق : با بهره‌گیری از ذخیره‌سازها امکان خرید و ذخیره انرژی الکتریکی با قیمت پایین و بازایی و فروش آن با قیمت بالا فراهم می‌شود.

۳- راه‌اندازی مجدد : به هنگام خاموشی ناشی از عدم تامین برق، ذخیره‌سازها تا زمان برقراری مجدد سیستم اصلی، می‌توانند تقاضا را پوشش داده و نیاز را برطرف سازند.

۴- تسطیح بار : تامین بخشی از تقاضا به منظور کاهش قله‌ها و دره‌های منحنی بار روزانه با بهره‌گیری از ذخیره‌سازها در زمان مناسب امکان‌پذیر خواهد بود.

۵- تثبیت ظرفیت : با بهره‌گیری از ذخیره‌سازها در مقیاس بزرگ امکان حذف هر گونه عدم تعادل مابین تولید و بار ناشی از تغییرات سریع و قابل ملاحظه در سمت تقاضا امکان‌پذیر خواهد بود. در این سرویس، ذخیره‌ساز همانند یک نیروگاه با عدم قطعیت بسیار کم عمل می‌نماید.

۶- رفع تراکم : با بهره‌گیری از ذخیره‌سازها، امکان تامین تقاضا و در نتیجه کاهش بار بر روی خطوط بحرانی وجود دارد که این مساله به رفع تراکم منجر خواهد شد.

۷- ظرفیت رزرو : این ظرفیت به منظور جبران سریع و نگهداشتن تعادل سیستم در شرایط از دست رفتن غیر منتظره منابع تولید می‌باشد. این ظرفیت با توجه به زمان پاسخ به عنوان ظرفیت چرخان (زمان پاسخ کمتر از ۱۵ دقیقه) و ظرفیت غیرچرخان (زمان پاسخ بیش از ۱۵ دقیقه) شناخته می‌شود.

۸- یکپارچه‌سازی منابع تجدیدپذیر : تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر به صورت غالب در زمان‌های غیرپیک رخ می‌دهد. با بهره‌گیری از ذخیره‌سازها امکان انتقال انرژی‌های تجدیدپذیر به زمان‌های پیک امکان‌پذیر خواهد بود. در واقع این منابع با استفاده از ذخیره‌سازها به صورت کاملاً موثر به مجموعه تولید انرژی در شبکه اضافه خواهند شد.

۹- تنظیم فرکانس: با تغییرات بار ضروریست تا در میزان تولید نیز بازنگری شود تا از این طریق فرکانس تنظیم شده و افزایش یا کاهش بیش از حد مجاز نداشته باشد. تنظیم فرکانس نقش اساسی در پایداری شبکه دارد. افزایش تولید و کاهش آن با استفاده از ذخیره‌سازها امکان‌پذیر است.

۱۰- کیفیت توان: امکان مقابله با تغییرات کوتاه مدت ولتاژ و فرکانس که موجب کاهش کیفیت برق مصرفی می‌شوند با استفاده از ذخیره‌سازها امکان‌پذیر است.

جدول (۳-۷) فناوری‌های ذخیره‌سازی قابل استفاده به منظور تامین خدمات در کلاس مقیاس شبکه از ذخیره‌سازها به همراه مشخصات فنی مورد نیاز را نشان می‌دهد [۱۱۸-۱۱۶].



جدول ۷-۳: تکنولوژی‌های ذخیره‌سازی قابل استفاده به منظور تامین خدمات در کلاس مقیاس شبکه از ذخیره‌سازها به همراه

مشخصات فنی مربوطه

نوع مشخصات	سرویس	مقیاس توان	زمان دشارژ	زمان پاسخگویی	تکنولوژی‌های مناسب
به تاخیر انداختن به روزرسانی تجهیزات و سرمایه‌گذاری جدید	تجارت برق	۱۰ تا ۱۰۰ مگاوات	چند ساعت	دقیقه- ساعت	انواع باتری‌ها، تلمبه ذخیره‌ای، هوای فشرده و پیل سوختی
راه‌اندازی مجدد	تجارت برق	۱۰۰ تا ۲۰۰۰ مگاوات	ساعت ۱ تا روز	۱ ساعت $\geq$	انواع باتری‌ها، تلمبه ذخیره‌ای و هوای فشرده
تسطیح بار	تثبیت ظرفیت	۱ تا ۱۰۰ مگاوات	دقیقه- ساعت	ثانیه- دقیقه	انواع باتری‌ها، تلمبه ذخیره‌ای، هوای فشرده، ذخیره‌سازهای حرارتی و پیل سوختی
رفع تراکم	ظرفیت رزرو	۱ تا ۱۰۰ مگاوات	دقیقه- ساعت	ثانیه- دقیقه	انواع باتری‌ها، تلمبه ذخیره‌ای، هوای فشرده، ذخیره‌سازهای حرارتی و پیل سوختی
یکپارچه‌سازی منابع تجدیدپذیر	تنظیم فرکانس	۱۰۰ کیلووات- ۴۰۰ مگاوات	دقیقه- ساعت	ثانیه- ساعت	انواع باتری‌ها، چرخ طیار، هوای فشرده، سوپرکازن‌ها، کویل‌های ابررسانا و پیل سوختی
کیفیت توان		۱ تا ۴۰۰ مگاوات	دقیقه- ساعت	میلی ثانیه- دقیقه	انواع باتری‌ها، سوپرکازن‌ها، کویل‌های ابررسانا و چرخ طیار
		۲۰ تا ۲۰۰ مگاوات	میلی ثانیه- دقیقه	میلی ثانیه- ثانیه	انواع باتری‌ها، سوپرکازن‌ها، کویل‌های ابررسانا، چرخ طیار و هوای فشرده

۷-۲-۲-۲- خدمات مرتبط با کلاس پشت اندازه‌گیر از ذخیره‌سازها

در حالت کلی ۷ سرویس یا خدمت در خصوص کلاس پشت اندازه‌گیر ذخیره‌سازها مطرح می‌شود. از این ۷ خدمت یا سرویس، ۲ سرویس تجارت برق و یکپارچه‌سازی منابع تجدیدپذیر با کلاس مقیاس شبکه مشترک هستند. سایر خدمات عبارتند از [۱۱۶]:

- ۱- تولید غیرمتمرکز یا پراکنده: تولید پراکنده به مواردی اطلاق می‌شود که برق در همان محل مصرف یا در نزدیکی محل مصرف تولید می‌شود. تولید پراکنده نیروگاه‌های مقیاس کوچکی هستند که ظرفیت حداکثری تولید آنها ۲۵ مگاوات می‌باشد.
- ۲- مدیریت هزینه انرژی: این خدمت به مصرف کننده نهایی امکان می‌دهد با تامین بار پیک خود از طریق ذخیره-سازها، هزینه برق خود را کاهش داده یا به نوعی مدیریت کند.
- ۳- پیک‌سازی: مجموعه اقداماتی که برای تغییر الگوی مصرف برق و کاهش بار پیک شبکه انجام می‌شود پیک‌سازی می‌گویند.
- ۴- توان پشتیبان: این سرویس به کلیه مشترکین امکان می‌دهد در زمان قطع برق شبکه سراسری (فارغ از نوع علت حادثه) تقاضای مورد نیاز خود را تامین کنند.

۵- تامین خدمات جانبی برای شبکه بالاسری : با تجميع ذخیره‌سازهای موجود در کلاس پشت اندازه‌گیر، امکان ارائه خدمات جانبی به شبکه بالادست همچون کنترل و تنظيم فرکانس فراهم می‌شود.

جدول (۴-۷) فناوری‌های ذخیره‌سازی قابل استفاده به منظور تامین خدمات در کلاس پشت اندازه‌گیر از ذخیره‌سازها به همراه مشخصات فنی مورد نیاز را نشان می‌دهد [۱۱۶-۱۱۸].

جدول ۴-۷: فناوری‌های ذخیره‌سازی قابل استفاده به منظور تامین خدمات در کلاس پشت شبکه از ذخیره‌سازها به همراه مشخصات فنی مربوطه

نوع سرویس	مشخصات	مقیاس توان	زمان دشارژ	زمان پاسخگویی	تکنولوژیهای مناسب
تولید غیرمتمرکز	تا ۲۵ مگاوات	ساعت- روز	ثانیه- ساعت	انواع باتریها	
تجارت برق	مگاوات	ساعت	ساعت	انواع باتریها	
مدیریت هزینه انرژی	۲۰ مگاوات	ساعت- روز	ثانیه	انواع باتریها، چرخ طیار و پیل سوختی	
پیک‌سازی	تا ۱ مگاوات	ساعت	دقیقه	انواع باتریها و ذخیره‌سازهای حرارتی	
توان پشتیبان	تا ۵ مگاوات	دقیقه- ساعت	ثانیه	انواع باتریها	
تامین خدمات جانبی برای شبکه بالاسری	مگاوات	ثانیه- ساعت	میلی‌ثانیه- ثانیه	انواع باتریها، چرخ طیار، سوپر‌خازنها و پیل سوختی	
یکپارچه‌سازی منابع تجدیدپذیر	۱ کیلووات- ۲۰ مگاوات	دقیقه- ساعت	ثانیه- ساعت	انواع باتریها، سوپر‌خازنها	

۷-۲-۳- خدمات مرتبط با کلاس خارج از شبکه

در حالت کلی ۵ سرویس یا خدمت در خصوص کلاس خارج از شبکه ذخیره‌سازها مطرح می‌شود. از این ۵ خدمت یا سرویس، سرویس یکپارچه‌سازی منابع تجدیدپذیر با کلاس مقیاس شبکه و پشت اندازه‌گیر مشترک است. سایر خدمات عبارتند از [۱۱۶] :

۱- تامین توان : توان مورد نیاز در ساعات مشخصی از شبانه‌روز در مناطق دور افتاده را می‌توان توسط ذخیره‌سازها تامین نمود. توان مورد نیاز می‌تواند از چندین وات تا صدها کیلووات باشد.

۲- جایگزینی برق دیزل : به هر دلیل اگر دیزل ژنراتور مورد استفاده در مناطق دور افتاده نتواند برق یا انرژی مورد نیاز را تامین نموده و تحویل دهد، ذخیره‌سازها حداقل تا زمان بهره‌برداری مجدد از دیزل ژنراتور مذکور قادر به تامین تقاضا هستند.

۳- ریزش‌بکه : تامین توان مورد نیاز ریزش‌بکه در ساعات مشخصی از شبانه‌روز یا بازه زمانی معادل چند ساعت تا چند روز می‌تواند بر عهده ذخیره‌سازها گذاشته شود.

۴- دکل‌های مخابراتی : تامین توان مورد نیاز دکل‌های مخابراتی در مناطق دورافتاده را می‌توان تا مدت زمان قابل توجهی بر عهده ذخیره‌سازها گذاشت.

جدول (۵-۷) فناوری‌های ذخیره‌سازی قابل استفاده به منظور تامین خدمات در خارج از شبکه توسط ذخیره‌سازها به همراه مشخصات فنی مورد نیاز را نشان می‌دهد [۱۱۶-۱۱۸].

جدول ۷-۵: فناوری‌های ذخیره‌سازی قابل استفاده به منظور تامین خدمات در کلاس خارج از شبکه ذخیره‌سازها به همراه مشخصات

فنی مربوطه

نوع سرویس	مشخصات	مقیاس توان	زمان دشارژ	زمان پاسخگویی	تکنولوژی‌های مناسب
تامین توان		تا ۱ مگاوات	ساعت	ثانیه- دقیقه	انواع باتری‌ها، هوای فشرده، سوپرکازن‌ها، ذخیره-سازهای حرارتی، تلمبه‌ذخیره‌ای و پیل سوختی
جایگزینی برق دیزل		مگاوات	ساعت- روز	میلی‌ثانیه- ثانیه	انواع باتری‌ها، سوپرکازن‌ها و تلمبه‌ذخیره‌ای
ریز شبکه		کیلووات- مگاوات	ساعت- روز	ثانیه	انواع باتری‌ها، ذخیره‌سازهای حرارتی و تلمبه‌ذخیره‌ای
دکل‌های مخابراتی		کیلووات	ساعت	میلی‌ثانیه- ثانیه	انواع باتری‌ها، چرخ طیار، سوپرکازن‌ها و پیل سوختی
یکپارچه‌سازی منابع تجدیدپذیر		۱ کیلووات- ۲۰ مگاوات	ساعت- روز	ثانیه- دقیقه	انواع باتری‌ها، سوپرکازن‌ها، کویل‌های ابررسانا، پیل سوختی و هوای فشرده

۷-۲-۲-۴- خدمات مرتبط با حمل و نقل

در حالت کلی ۳ سرویس یا خدمت در خصوص حمل و نقل توسط ذخیره‌سازها قابل انجام است. سرویس اول شامل تامین برق برای خودروهای الکتریکی، سرویس دوم شامل تامین برق برای خودروهای مبتنی بر پیل سوختی و سرویس سوم شامل تجمیع خودروها برای تامین برق شبکه در ساعات پیک (Vehicle to Grid) است [۱۱۶].

جدول (۷-۶) فناوری‌های ذخیره‌سازی قابل استفاده به منظور تامین خدمات مرتبط با حمل و نقل توسط ذخیره‌سازها به همراه مشخصات فنی مورد نیاز را نشان می‌دهد [۱۱۶-۱۱۸].

جدول ۷-۶: فناوری‌های ذخیره‌سازی قابل استفاده به منظور تامین خدمات مرتبط با حمل و نقل توسط ذخیره‌سازها به همراه مشخصات

فنی مربوطه

نوع سرویس	مشخصات	مقیاس توان	زمان شارژ	زمان دشارژ	زمان پاسخگویی	تکنولوژی‌های مناسب
تامین برق برای خودروهای الکتریکی		۵۰ تا ۱۰۰ کیلووات	۱۵ دقیقه تا ۸ ساعت	ساعت	میلی ثانیه	انواع باتری‌ها بخصوص لیتیم- یونی
Vehicle to Grid		مگاوات				
تامین برق برای خودروهای پیل سوختی		حدود ۱۰۰ کیلووات	مشابه خودروهای بنزینی یا گازوئیلی	ساعت	میلی ثانیه	پیل سوختی

۷-۲-۲-۵- خدمات مرتبط با کلاس حرارتی

در حالت کلی ۹ سرویس یا خدمت در خصوص کلاس حرارتی از کاربرد ذخیره‌سازها وجود دارد. این خدمات عبارتند از [۱۱۶]:

۱- ذخیره‌سازی مقطعی: در این خدمت یا سرویس، گرمایش و سرمایش بدست آمده از منابع مختلف ذخیره و در مواقع نیاز مورد استفاده قرار می‌گیرد. بازه ذخیره‌سازی می‌تواند ساعت، روز و یا حتی فصلی از سال باشد.

- ۲- انتقال بار پیک : با بهره‌گیری از ذخیره‌سازهای حرارتی امکان تامین بخشی از بار پیک فراهم می‌شود. در این سرویس، ذخیره‌ساز حرارتی در ساعات غیرپیک شارژ و در ساعات پیک دشارژ می‌شود.
 - ۳- نیروگاه‌های خورشیدی متمرکز کننده : با بهره‌گیری از ذخیره‌سازهای حرارتی موجود در نیروگاه‌های خورشیدی متمرکز کننده، امکان تولید برق مورد نیاز شبکه یا تولید گرما برای سیستم گرمایش منطقه‌ای در زمان‌هایی که انرژی خورشیدی وجود ندارد فراهم می‌شود.
 - ۴- جمع‌آوری حرارت بدست آمده از منابع تجدیدپذیر: با بهره‌گیری از یک ذخیره‌ساز حرارتی مرکزی، امکان جمع‌آوری حرارت بدست آمده از منابع گرمایی مختلف مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر (که در ساعات مختلف شبانه‌روز حاصل شده است) فراهم می‌شود.
 - ۵- تبدیل برق به حرارت : ذخیره‌سازهای حرارتی می‌توانند موجبات تبدیل برق به حرارت را فراهم سازند. در این سرویس، ذخیره‌ساز جزئی از تکنولوژی تبدیل برق به حرارت بشمار می‌رود.
 - ۶- تبدیل حرارت به برق : با ذخیره‌سازی حرارت اضافی، امکان تولید برق توسط ذخیره‌سازهای حرارتی فراهم می‌شود. به عنوان مثال بخار سوپرهیت سیستم نمک مذاب قابل استفاده در یک توربین بخار متداول جهت تولید برق است.
 - ۷- مدیریت حرارت اتلافی : حرارت اتلافی صنایع و ساختمان‌ها قابل ذخیره‌سازی در سیستم‌های حرارتی است. در واقع این سیستم منجر به افزایش راندمان کلی سیستم‌ها می‌شود.
 - ۸- پایدارسازی دما : از ذخیره‌سازهای حرارتی می‌توان به منظور پایدارسازی دما در مکان‌هایی همچون اتاق تمیز صنایع داروسازی که در آنها ضرورت است تا دما در مقدار مشخصی ثابت بماند استفاده کرد.
 - ۹- سیستم‌های گرمایش منطقه‌ای : ذخیره‌سازهای حرارتی به عنوان پشتیبان سیستم‌های گرمایش منطقه‌ای، امکان ایجاد تعادل بین تولید و بار حرارتی و همچنین امکان غلبه بر کمبود عرضه را فراهم می‌سازند.
- جدول (۷-۷) فناوری‌های ذخیره‌سازی قابل استفاده به منظور تامین خدمات حرارتی از ذخیره‌سازها به همراه مشخصات فنی مورد نیاز را نشان می‌دهد. در خصوص مدیریت حرارت اتلافی اطلاعاتی وجود ندارد [۱۱۸-۱۱۶].



جدول ۷-۷: فناوری‌های ذخیره‌سازی قابل استفاده به منظور تامین خدمات در کلاس حرارتی از ذخیره‌سازها و مشخصات مربوطه

نوع سرویس	مشخصات	مقیاس توان	زمان دشارژ	زمان پاسخگویی	تکنولوژی‌های مناسب
ذخیره‌سازی مقطعی	ذخیره‌سازی مقطعی	کیلووات	ساعت- روز	دقیقه- ساعت	انواع ذخیره‌سازهای حرارتی
انتقال بار پیک	انتقال بار پیک	کیلووات	دقیقه- ساعت	ثانیه- دقیقه	ذخیره‌ساز یخ
نیروگاه‌های خورشیدی متمرکز کننده	نیروگاه‌های خورشیدی متمرکز کننده	صد کیلووات- مگاوات	ساعت	دقیقه	سیستم‌های نمک مذاب
تجمیع حرارت از منابع تجدیدپذیر	تجمیع حرارت از منابع تجدیدپذیر	کیلووات- یک مگاوات	ساعت	دقیقه	ذخیره‌سازهای گرمای محسوس
تبدیل برق به حرارت	تبدیل برق به حرارت	کیلووات- مگاوات	ساعت	ثانیه	پمپ‌های حرارتی مقیاس بزرگ و بویلرهای برقی
تبدیل حرارت به برق	تبدیل حرارت به برق	مگاوات	ساعت	ثانیه	سیستم‌های نمک مذاب
پایدارسازی دما	پایدارسازی دما	کیلووات	دقیقه	دقیقه	بویلرهای برقی
سیستم‌های گرمایش منطقه‌ای	سیستم‌های گرمایش منطقه‌ای	مگاوات	ساعت- روز	دقیقه	ذخیره‌سازهای گرمای محسوس

۷-۳- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

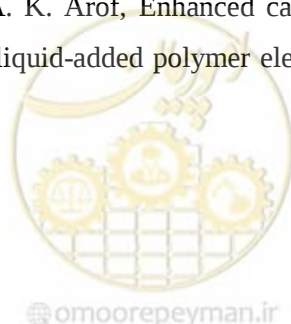
در این فصل از ضابطه مطالعه تطبیقی انواع روش‌های ذخیره‌سازی انرژی انجام شد. در گام اول، وضعیت ذخیره‌سازی انرژی، آمار و ظرفیت نصب شده از انواع ذخیره‌سازها در دنیا مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه روش‌های ذخیره‌سازی انرژی به تفکیک تجهیزات از لحاظ مشخصات فنی و اقتصادی و نوع کاربرد (بخصوص کاربرد در صنعت برق) با یکدیگر مقایسه شدند. مطالعه تطبیقی انجام شده در این فصل راهگشای انتخاب ذخیره‌سازها با توجه به نوع سرویس یا خدمت مورد انتظار از آنها و مشخصات فنی و اقتصادی مربوطه خواهد بود.



مراجع



- [1]. O.Palizban, K.Kauhaniemi, Energy storage systems in modern grids—Matrix of technologies and Applications, Journal of Energy Storage, vol. 6, pp. 248-259, 2016.
- [2]. https://en.wikipedia.org/wiki/Memory_effect
- [3]. X.Tan, Q.Li, H.Wanga, Advances and trends of energy storage technology in Microgrid, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 44, Issue 1, pp. 179-191, 2013.
- [4]. A.Ter-Gazarian, Energy Storage for Power System, 2nd edition., Institution of Engineering and Technology, London, UK, 2012.
- [5]. A.Rufer, Energy Storage Systems and Components, CRC Press, Taylor & Francis Group, NewYork, USA, 2018.
- [6]. H.Ibrahim, A.Ilincaa, J.Perron, Energy storage systems—Characteristics and comparisons, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 12, pp. 1221–1250, 2008.
- [7]. F.S. Barnes, J.G. Levine, Large Energy Storage Systems Hand book, CRC Press, Taylor & Francis Group, NewYork, USA, 2011.
- [8]. A.Yu, V.Chabot, J.Zhang, Electrochemical Supercapacitors for Energy Storage and Delivery: Fundamentals and Applications, CRC Press, Taylor & Francis Group, NewYork, USA, 2013.
- [9]. N.Kularatna, Energy Storage Devices for Electronic Systems Rechargeable Batteries and Supercapacitors, Academic Press, Elsevier, UK, 2015.
- [10]. J.Libich, J.Máca, J.Vondrák, O.Čech, M.Sedlářiková, Supercapacitors: Properties and applications, Journal of Energy Storage, vol. 17, pp. 224-227, 2018.
- [11]. P.Nikolaidisa, A.Poullikkasb, A Comparative Review of Electrical Energy Storage Systems for bBetter Sustainability, Journal of Power Technologies, vol. 97, no. 3, pp. 220–245, 2017.
- [12]. F.Nadeem, S.M. S. Hussain, P. K.Tiwari, A.K.Goswami, T.S.Ustun, Comparative Review of Energy Storage Systems, Their Roles, and Impacts on Future Power Systems, IEEE Access, vol. 7, pp. 4555 – 4585, 2018.
- [13]. K. Sahay, B. Dwivedi, “Supercapacitors Energy Storage System for Power Quality Improvement : An Overview,” Quality, vol. 5, pp. X–XX, 2009.
- [14]. J. Schindall, The charge of the ultracapacitors, IEEE Spectr., vol. 44, no. 11, pp. 42–46, 2007.
- [15]. A. Burke, Ultracapacitors: Why, how, and where is the technology, Journal of Power Sources, vol. 91, no. 1, pp. 37–50, 2000.
- [16]. C. W. Liew, S. Ramesh, and A. K. Arof, Enhanced capacitance of EDLCs (electrical double layer capacitors) based on ionic liquid-added polymer electrolytes, Journal of Energy, vol. 109, pp. 546–556, 2016

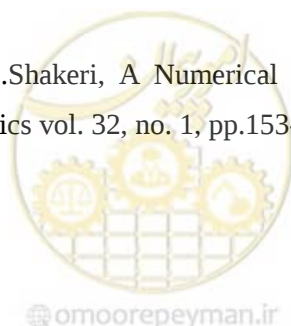


- [17]. M. Beaudin, H. Zareipour, A. Schellenberg, and W. Rosehart, Energy Storage for Mitigating the Variability of Renewable Electricity Sources, *Energy Storage Smart Grids Plan. Oper. Renew. Var. Energy Resour.*, vol. 14, no. 4, pp. 1–33, 2014.
- [18]. K. Chatzivasiladi, Electrical energy storage technologies and the built environment, 7th International Renewable Energy Storage Conference, Berlin, Germany, 2012.
- [19]. P. Alotto, M. Guarnieri, F. Moro, Redox flow batteries for the storage of renewable energy: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, pp. 325–335, 2014.
- [20]. Y. Wang, Y. Song, Y. Xia, Electrochemical capacitors: mechanism, materials, systems, characterization and applications, *Chemical Society Reviews*, vol. 45, pp. 5925–5950, 2016.
- [21]. Y. Shao, M. F. El-Kady, J. Sun, Y. Li, Q. Zhang, M. Zhu, H. Wang, B. Dunn, R. B. Kaner, Design and Mechanisms of Asymmetric Supercapacitors, *Chemical Reviews*, vol. 118, pp. 9233–9280, 2018.
- [22]. A. Muzaffara, M. B. Ahamed, K. Deshmukha, J. Thirumalaib, A review on recent advances in hybrid supercapacitors: Design, fabrication and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 101, pp. 123–145, 2019.
- [23]. S. Iro. Zaharaddeen, C. Subramani, S. S. Dash, A Brief Review on Electrode Materials for Supercapacitor, *International Journal of Electrochemistry Science*, vol. 11, pp. 10628–10643, 2016.
- [24]. <https://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor>
- [25]. https://en.wikipedia.org/wiki/Leyden_jar
- [26]. W. Yuan, W. Xian, M. Ainslie, Z. Hong, Y. Yan, R. Pei, Y. Jiang, T. A. Coombs, Design and Test of a Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) Coil, *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, vol. 20, no. 3, 2010.
- [27]. Md. A. Al Zaman, S. Ahmed, N. J. Monira, An Overview of Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) and Its Applications, *International Conference on Nanotechnology and Condensed Matter Physics (ICNCMP)*, Bangladesh, 2018.
- [28]. K. I. Sato, Present Status of International Standardization Activities for Superconductivity, *SEI Technical Review* no. 74, 2012.
- [29]. N. Kumar, Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) System, Technical Report, 2015.
- [30]. P. Tixador, Superconducting Magnetic Energy Storage: Status and Perspective, *IEEE/CSC & Esas European Superconductivity News Forum*, no. 3, 2008.
- [31]. X. Xue, K. Cheng, D. Sutanto, “Power system applications of superconducting magnetic energy storage systems,” *Ind. Appl. ...*, pp. 1524–1529, 2005.
- [32]. M. H. Ali, B. Wu, R. A. Dougal, “An overview of SMES applications in power and energy systems,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 1, no. 1, pp. 38–47, 2010.

- [33]. A.Mamen, U.Supatti, A survey of hybrid energy storage systems applied for intermittent renewable energy systems, 14th Int. Conf. Electr. Eng. Comput. Telecommun., pp. 729–732, 2017.
- [34]. R.A.Huggins, Energy Storage, Springer, New York, USA, 2010.
- [35]. S.Behrens, Electrical Energy Storage: Technology Overview and Applications, Prepared for the Australian Energy Market Commission, CSIRO Energy Flagship, Australia, 2015.
- [36]. https://en.wikipedia.org/wiki/Superconducting_magnetic_energy_storage
- [37]. L.Chen, T.Zheng, S.Mei, X. Xue, B.Liu, Q.Li, Review and Prospect of Compressed Air Energy Storage System, Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 4, Issue 4, pp. 529–541, 2016.
- [38]. G.Venkataramani, P.Parankusam, V.Ramalingam, J.Wang, A review on compressed air energystorage – A path way for smart grid and polygeneration, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 62, pp. 895–907, 2016.
- [39]. J.Wang, K.Lu, L.Ma, J.Wang, M.Dooner, S.Miao, J.Li, D.Wang, Overview of Compressed Air Energy Storage and Technology Development, Energies, vol 10, no. 991, 2017.
- [40]. F.Crotogino, K.B.B.Gmbh, K.Mohmeyer, R.Scharf, E.O.N.K. Bremen, Huntorf CAES : More than 20 Years of Successful Operation, 2001.
- [41]. R.Madlener, J.Latz, “Centralized and Decentralized Compressed Air Energy Storage for Enhanced Grid Integration of Wind Power, Institute for Future Energy Consumer Needs (FCN) and Behavior Faculty of Busin, 2010.
- [42]. 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, vol. 137, pp. 511–536, 2015.
- [43]. A.Khamis, Z.M.Badarudin, A.Ahmad, A.A.Rahman, M.H.Hairi, Overview of Mini Scale Compressed Air Energy Storage System, Int. Power Eng. Optim. Conf, Malaysia, pp. 23–24, 2010.
- [44]. H.Liu, Q.He, S.B.Saeed, Thermodynamic analysis of a compressed air energy storage system through advanced exergetic analysis, Journal of Renewable and Sustainable Energy, vol. 8, 2016.
- [45]. https://en.wikipedia.org/wiki/Compressed-air_energy_storage
- [46]. <https://kraftwerkforschung.info/en/storing-electricity-using-compressed-air/>
- [47]. S.Rehman, L.M.Al-Hadhrani, Md.M.Alam, Pumped hydro energy storage system:A technological review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 44, pp. 586-598, 2015.
- [48]. V.A.Boicea, Energy storage technologies: The past and the present, Proc. IEEE, vol. 102, no. 11, pp. 1777–1794, 2014.

- [49]. R.Lacal-Arantequi, N.Fitzgerald, P.Leahy, Pumped-hydro energy storage: potential for transformation from single dams. 2011.
- [50]. K.Bradbury, Energy Storage Technology Review, A Br. Introd. to Batter., pp. 1–33, 2010.
- [51]. E.arboura, I.A.G.Wilsonb, J.Radcliffea, Y.Dinga, Y.Li, A review of pumped hydro energy storage development in significant international electricity markets, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 61, pp. 421-432, 2016.
- [52]. https://en.wikipedia.org/wiki/Siah_Bishe_Pumped_Storage_Power_Plant
- [53]. M.E.Amiryar, K.R.Pullen, A review of flywheel energy storage system technologies and their applications, Appl. Sci., vol. 7, no. 3, 2017.
- [54]. T.M.Aljohani, The Flywheel Energy Storage System: A Conceptual Study, Design, and Applications in Modern Power Systems, International Journal of Electrical Energy, vol. 2, no. 2, 2014.
- [55]. R.Östergård, Flywheel energy storage a conceptual study, Master Thesis provided by ABB Cooperate Research in Västerås, 2011.
- [56]. T.Kamf, High speed flywheel design Using advanced composite materials, Master Thesis in UPPSALA University, 2011.
- [57]. Beacon Power, 20 MW Flywheel Energy Storage Plant, Hazle Project, Massachusetts, USA, 2015.
- Also→https://www.sandia.gov/essssl/docs/pr_conferences/2014/Thursday/Session7/02_Aresenex_Jim_20MW_Flywheel_Energy_Storage_Plant_140918.pdf
- [58]. <https://en.wikipedia.org/wiki/Flywheel>.
- [59]. A.Berrada, KH.Loudiyi, Gravity Energy Storage, Elsevier, 2019.
- [60]. A.Berrada, K.Loudiyi, I.Zorkani, Sizing and economic analysis of gravity storage, Journal of Renewable and Sustainable Energy, vol. 8, Issue 2, 2016.
- [61]. P.Ralon, M.Taylor, A.Ilas, H.D. Bone, Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030, The International Renewable Energy Agency (IRENA), 2017.
- [62]. M.Winter, Handbook of Battery Materials, 2nd Edition, Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, Germany, 2011.
- [63]. G.E.Blomgren, The Development and Future of Lithium Ion Batteries, Journal of The Electrochemical Society, vol. 164, no. 1, pp. 5019-5025, 2017.
- [64]. Y.Miao, P.Hynan, A.V.Jouanne, A.Yokochi, Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements, Energies, vol. 12, no. 6, 2019.
- [65]. D.Deng, Li-ion batteries: basics, progress, and challenges, Energy Science & Engineering, 2015.

- [66]. M.A.Hannan, MD.M.Hoque, A.Hussain, Y.Yusof, P.J.Ker, State-of-the-Art and Energy Management System of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicle Applications: Issues and Recommendations, IEEE ACCESS, vol. 6, 2018.
- [67]. https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_battery.
- [68]. A.Eftekhari, Lithium-Ion Batteries with High Rate Capabilities. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, vol. 5, no. 3, pp. 2799–2816, 2017.
- [69]. V.S. Bagotsky, A.M.Skundin, Y.M.Volfkovich, Electrochemical Power Source Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors, Wiley, New Jersey, USA, 2015.
- [70]. G.J. Maya, A.Davidsonb, B.Monahovc, Lead batteries for utility energy storage: A review, Journal of Energy Storage, vol. 15, pp.145-157, 2018.
- [71]. H.Keshan, J.Thornburg, T.S.Ustun, “Comparision of lead acid and lithium ion Batteries for stationary storage in off-Grid energy systems,” in 4th IET Clean Energy and Technology Conference (CEAT 2016), Malaysia, 2016.
- [72]. L.T.Lam, N.P.Haigh, C.G.Phyland, A.J.Urban, Failure mode of valve-regulated lead-acid batteries under high-rate partial-state-of-charge operation, J. Power Sources, vol. 133, no. 1, pp. 126–134, 2004.
- [73]. Battery University, https://batteryuniversity.com/learn/article/new_lead_acid_systems, 2017.
- [74]: K.T.Chau, Y.S.Wong, C.C.Chan, An Overview of energy sources for electric vehicles, Energy Convers. Manag., vol. 40, no. 10, pp. 1021–1039, 1999.
- [75]: M.Shiomi, T.Funato, K.Nakamura, K.Takahashi, M.Tsubota, Effects of carbon in negative plates on cycle-life performance of valve-regulated lead/acid batteries, J. Power Sources, vol. 64, no. 1–2, pp. 147–152, 1997.
- [76]: D.Akinyele, J.Belikov, Y.Levron, Battery Storage Technologies for Electrical Applications Impact in Stand-Alone Photovoltaic Systems, Energies, vol.10, no. 11, 2017.
- [77]: https://en.wikipedia.org/wiki/Lead%E2%80%93acid_battery
- [78]: The History of the Lead Acid Battery, <http://lead-acid.com/lead-acid-battery-history.shtml>.
- [79]: <http://www.corrosion-doctors.org/Biographies/PlantelBio.htm>
- [80]: M.S.Kazacos, M.H.Chakrabarti, S.A.Hajimolana, F.S.Mjalli, M.Saleem, Progress in Flow Battery Research and Development, Journal of The Electrochemical Society, vol. 158, no. 8, pp.55-79, 2011.
- [81]: P.Hasannasab, A.A.Ranjbar, M.Shakeri, A Numerical Simulation of Vanadium Redox Flow Batteries, IJE Transaction A: Basics vol. 32, no. 1, pp.153-161, 2019.



- [82]: L.F.Arenasa, A.Lohb, D.P.Trudgeonb, X.Lib, C.P.d.Leóna, F.C. Walsha, The characteristics and performance of hybrid redox flow batteries with zinc negative electrodes for energy storage, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 90, pp. 992–1016, 2018.
- [83]: C.Liu, L.Shaw, A High Capacity, Room Temperature, Hybrid Flow Battery Consisting of Liquid Na-Cs Anode and Aqueous NaI Catholyte, *Batteries*, vol. 4, no. 4, 2018.
- [84]: N.Roznyatovskaya, J.Noack, H.Mild, M.Fühl, P.Fischer, K.Pinkwart, J.Tübke, M.S.-Kazacos, Vanadium Electrolyte for All-Vanadium Redox-Flow Batteries: The Effect of the Counter Ion, *Batteries*, vol. 5, no. 10, 201.
- [85]: A.Khor, P. Leung, M.R.Mohamed, C.Flox, Q.Xu, L.An, R.G.A.Wills, J.R.Morante, A.A.Shah, Review of zinc-based hybrid flow batteries: From fundamentals to applications, *Materials Today Energy*, vol. 8, pp. 80-108, 2018.
- [86]: J.A.Mellentine, Performance Characterization and Cost Assessment of an Iron Hybrid Flow Battery, Master Thesis Submitted to the University of Iceland and the University of Akureyri, 2011
- [87]: C.Choia, S.Kima, R.Kima, Y.Choia, S.Kimb, H.Y.Jungc, J.H.Yangd, H.T.Kima, A review of vanadium electrolytes for vanadium redox flow batteries, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 263–274, 2017.
- [88]: <https://www.upsbatterycenter.com/blog/flow-batteries-history/>
- [89]: J.Tarabay, N.Karami, Nickel Metal Hydride Battery: Structure, Chemical Reaction, and Circuit Model, Third International Conference on Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering (TAECE), Lebanon, 2015.
- [90]: T.T.Nguyen, V.Martin, A.Malmquist, C.A.S.Silva, A review on technology maturity of small scale energy storage technologies, *Renew. Energy Environ. Sustain*, vol. 2, no. 36, 2017.
- [91]: C.Glaize, S.Genies, Lead and Nickel Electrochemical Batteries. 2013.
- [92]: https://en.wikipedia.org/wiki/Nickel%E2%80%93cadmium_battery
- [93]: A.Chatzivasiladi, E.Ampatzi, I.Knight, Characteristics of electrical energy storage technologies and their applications in buildings, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 25, pp. 814–830, 2013.
- [94]: https://en.wikipedia.org/wiki/Nickel%E2%80%93metal_hydride_battery#History
- [95]: J.Cho, S.Jeong, Y.Kim, Commercial and research battery technologies for electrical energy storage applications, *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 48, pp. 84–101, 2015.
- [96]: B.Dunn, B.Dunn, H.Kamath, J.Tarascon, Electrical energy storage for the Grid : A Battery of choices, *Sci. Mag.*, vol. 334, no. 6058, pp. 928–936, 2011.

- [97]: J.Dixon, I.Nakashima, E.F.Arcos, M.Ortúzar, Electric vehicle using a combination of ultracapacitors and ZEBRA battery, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 57, no. 3, pp. 943–949, 2010.
- [98]: <https://www.ngk.co.jp/nas/why/history.html>
- [99]: O.Veneri, F.Migliardini, C.Capasso, P.Corbo, ZEBRA battery based propulsion system for urban bus applications: Preliminary laboratory tests, Electr. Syst. Aircraft, Railw. Sh. Propulsion, ESARS, 2012
- [100]. M.Hosseinfar, A. Petric, Effect of High Charge Rate on Cycle Life of ZEBRA (Na/NiCl₂) Cells, J. Electrochem. Soc, vol. 163, no. 7, pp. A1226–A1231, 2016.
- [101]. https://en.wikipedia.org/wiki/Molten-salt_battery
- [102]. S. Kalaiselvam, R. Parameshwaran, Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability Systems Design, Assessment and Applications, 1st ed, Academic Press, USA, 2014.
- [103]. ASHRAE. ASHRAE handbook—HVAC systems and equipment. Atlanta, GA: ASHRAE, Inc; 2012.
- [104]. C.Christenson, Thermal energy storage. Energy management handbook. 6th ed. Lilbum, GA: The Fairmont Press, Inc, pp. 519–537, 2007.
- [105]. I.Dincer, Thermal energy storage systems as a key technology in energy conservation. International Journal Energy Resources, vol. 26, pp. 567–88, 2002.
- [106]. Y.Sun, S.Wang, F. Xiao, D.Gao, Peak load shifting control using different cold thermal energy storage facilities in commercial buildings: a review. Journal of Energy Conversion and Management, vol.71, pp.101–114, 2013.
- [107]. P.Tatsidjodoung, NL.Pierrès, L.Luo, A review of potential materials for thermal energy storage in building applications, Journal of Renew Sustain Energy Rev, vol.18, pp. 327–49, 2013.
- [108]. Al.Fernandez, M.Martínez, M.Segarra, I.Martorell, LF.Cabeza. Selection of materials with potential in sensible thermal energy storage, Journal of Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 94, pp.1723–1729, 2010.
- [109]. S.Khare, M.Dell'Amico, C.Knight, S.McGarry, Selection of materials for high temperature sensible energy storage. Journal of Solar Energy Materials and Solar Cells, vol.115, pp. 114–122, 2013.
- [110]. H.Chen, T.N. Cong, W.Yang, C.Tan, Yo.Li, Y.Ding, Progress in electrical energy storage system: A critical review, Progress in Natural Science, vol. 19, pp. 291–312, 2009.
- [111]. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Hydrogen: Fuel Cells, 2003.
- [112]. U.S. Department of Energy, Fossil Energy.Gov, Future Fuel Cells, 2003.

- [113]. D.Shekhawat, J.J.Spivey, D.A.Berry, Fuel Cells, Technologies for fuel processing. Oxford, Elsevier B.V, pp. 1-566, 2011.
- [114]. International Energy Agency , Technology Roadmap - Energy storage , 2014.
- [115]. <https://www.iea.org/tcep/energyintegration/energystorage/>
- [116]. A.Darmani, A.Saleem, B.Normark, L.Krosse, C.Jullien , F. Gardumi, G.Avgerinopoulos, B. Zakeri, REEEM Innovation and Technology Roadmap for Energy Storage Application, 2017.
- [117]. 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, Appl. Energy, vol 137 , pp.511-536, 2015.
- [118]. EASE, European energy storage technology development and application roadmap towards 2030, 2017



خواننده گرامی

امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور، با گذشت بیش از چهل سال فعالیت تحقیقاتی و مطالعاتی خود، افزون بر هفتصد عنوان نشریه تخصصی- فنی، در قالب آیین نامه، ضابطه، معیار، دستورالعمل، مشخصات فنی عمومی و مقاله، به صورت تالیف و ترجمه، تهیه و ابلاغ کرده است. گزارش حاضر در راستای موارد یاد شده تهیه شده، تا در راه نیل به توسعه و گسترش علوم در کشور و بهبود فعالیت های عمرانی به کار برده شود. فهرست نشریات منتشرشده در سال های اخیر در سایت اینترنتی nezamfanni.ir قابل دستیابی می باشد.



Energy Storage Guide

Sixth Part: Studies and Documentation of Energy Storage

[No. 840-6]

Implementation Niroo research institute

Project Manager Omid Shahhosseini M.Sc. of Electrical Eng.

Authors & Contributors Committee:

Omid Shahhosseini Niroo research institute M.Sc. of Electrical Eng.

Seyyed Saeed Mohtavipoor Niroo research institute M.Sc. of Electrical Eng

Confirmation Committee:

Morteza Torabi Niroo research institute M.Sc. of Metallurgy Eng.

Niki Moslemi Niroo research institute M.Sc. of Electrical Eng.

Zahra Madihi Bidgoli Niroo research institute M.Sc. of Electrical Eng.

Steering Committee(Plan and Budget Organization):

Farzaneh Agharamzanali Head Group of Technical and Executive Affairs Department

Alirez Totonchi Deputy of Technical and Executive Affairs Department

Mohamad reza talaakoob Expert Engineering, Technical and Executive Affairs Department

Seyed Vahidedin Rezvani Expert Engineering, Technical and Executive Affairs Department

Alireza Fakhrrahimi Expert Engineering, Technical and Executive Affairs Department



Abstract:

Before the industrial revolution of the nineteenth century, there was a stable balance between energy supply and demand. The industrialization of countries and the advent of new technologies increased the demand for energy significantly. With the discovery of electricity and its use as a driver for many equipment and technologies, the problem of energy demand and its growth doubled, especially since initially the primary sources for mass production of electricity did not include renewable sources and fossil fuels included oil, gasoline and natural gas were used as primary sources of energy. Electricity, heat and cold are generated from the above-mentioned sources with high reliability and therefore no additional or auxiliary sources are needed. In the meantime, these resources are limited and have negative environmental effects. Among these effects are global warming and the acidification of ocean water, both of which have devastating effects on the growth and development of plants and animals on Earth.

As the demand for fossil fuels increased, so did the price of these resources, creating a variety of crises that had devastating economic effects. The first crisis occurred in 1973, when oil prices suddenly doubled and provoked widespread global reactions. Since then, the world's industrialized nations, including France, have put other methods of generating electricity on their agenda, including nuclear power generation, which continues to this day. Although nuclear power generation is associated with a reduction in issues such as greenhouse gas emissions, the risk of emissions of radioactive material over a wide geographical area due to unforeseen events affecting nuclear power plants has always been doubt is accompanied.

Possible nuclear accidents and global warming, along with the significant price of fossil fuels and their limitations, have led to an increasing share of renewable energy in the supply of energy needed. The sun and wind as two major sources of energy have far less environmental impact than fossil fuels and are not exhaustive. Despite these advantages, these resources are unpredictable and controllable, and there is considerable uncertainty in their use. Supplying electricity and even heat and cold in a certain place and time with a certain amount is a big challenge that makes it difficult to use renewable sources. Supplying electricity and even heat and cold in a certain place and time with a certain amount is a big challenge that makes it difficult to use renewable sources. Therefore, the problem can be solved if the energy from these sources can be stored at low load or low consumption time and used at peak consumption. This advantage, along with other advantages (eg frequency control in the power grid), has led to the use of various storage devices in the form of five storage methods including electrical, mechanical, electrochemical, chemical and thermal. The output of storage devices is independent of the storage method, electricity, heat and in some cases cold. In the meantime, electricity or heat output, and especially electricity, has received much more attention.

In addition to the above, the possibility of using technologies in mobile mode, regardless of the amount of energy they require, requires that energy be stored in a source and then retrieved and used while using the technology. It is practically impossible to imagine life in today's world simply by relying on the constant use of the various technologies available in it (mobile phones, electric cars, etc.) and therefore energy storage is all the more necessary.

As mentioned, the use of energy storage devices is expanding in the world. In the meantime, diversification of storage methods and equipment, economization of large-scale storage and maximum storage in specific volume and mass are the goals that have defined the path of research and development in this field. Prospects, forecasts and review of the current situation show that storage and related

equipment will play a very important role in future human life, especially energy supply networks. Due to the widespread use of storage equipment in the world and consequently in Iran, the need to use them in the near future will be felt. In addition to comprehensive research and research activities, it is obvious that one of the measures needed to prepare the necessary conditions for the optimal and widespread use of storage devices is the development of technical guidance for these systems. With regard to this issue, the preparation and compilation of energy storage guide has been considered in this project and in the first step, in order to become more familiar with the problem under study and its different angles, the literature has been reviewed and existing experiences have been reviewed. The leading criterion addresses these issues in the form of 7 chapters.



**Islamic Republic of Iran
Plan and Budget Organization**

Energy Storage Guide

Sixth Part: Studies and Documentation of Energy Storage

No.840-6

Last Edition: 10-06-2021

Deputy of Technical and Infrastructure
Development Affairs

Ministry of Energy

Department of Technical and Executive
Affairs

Niroo Research Institute

nezamfanni.ir

Nri.ac.ir



omoorepeyman.ir

این ضابطه با عنوان «مستندات و مطالعات ذخیره‌سازهای انرژی» به تفکیک دربردارنده ذخیره‌سازی انرژی و مفاهیم مربوطه، روش‌های الکتریکی ذخیره‌سازی انرژی و فناوری‌های مربوطه، روش‌های مکانیکی ذخیره‌سازی انرژی و فناوری‌های مربوطه، روش‌های الکتروشیمیایی ذخیره‌سازی انرژی و فناوری‌های مربوطه، روش‌های حرارتی ذخیره‌سازی انرژی و فناوری‌های مربوطه، روش‌های شیمیایی ذخیره‌سازی انرژی و فناوری‌های مربوطه و مقایسه انواع روش‌های ذخیره‌سازی می‌باشد.

