نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۳، شماره ۱، بهار ۱۳۹۹، صفحه ۸۲ – ۴۷

سیستم‌های نوین ذخیره‌سازی انرژی با روش فشرده‌سازی هوا

[۱] مجید خزعلی، [۲] اشکان عبدالی سوسن*

تاریخ دریافت:
۱۳۹۸ / ۴ / ۲۲

تاریخ پذیرش:
۱۳۹۹ / ۳ / ۱۹

کلمات کلیدی:
ذخیره‌سازی انرژی،
هوای فشرده،
ذخیره‌سازی حرارتی،
مایع‌سازی هوا،
تلمبه ذخیره‌ای

چکیده

با افزایش استفاده از سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر و متغیر بودن دسترسی به این نوع انرژی، جهت پایداری سیستم نیاز به سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی است. در این میان، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی با خصوصیات و کاربردهای مختلفی وجود دارد که سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده یکی از آنها است. در مقاله حاضر، جدیدترین پژوهش‌ها وسیستم‌های نوین در زمینه ذخیره‌سازی انرژی برپایه فشرده‌سازی هوا و خصوصیات آنها با طبقه‌بندی و مقایسه فرایندهای این سیستم‌ها، مورد بررسی قرار گرفت. وجه مشترک همه این سیستم‌ها استفاده از هوای فشرده، یا به بیان بهتر سیال تراکم‌پذیر، برای ذخیره‌سازی انرژی به‌صورت پتانسیل مکانیکی است. از نظر نحوه ذخیره شدن هوا می‌توان این سیستم‌ها را به سه دسته هم‌حجم، هم‌فشار و مایع‌سازی تقسیم کرد. با توجه به پیچیدگی‌های متعدد سیستم‌های مورد بررسی در مقاله حاضر، آنها به دو دسته اصلی ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده به‌همراه ذخیره‌سازی حرارتی و سیستم‌های نوین و ترکیبی تقسیم‌بندی شدند. رشد و توسعه سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده با ذخیره‌سازی حرارتی، به‌علت بالا بودن هزینه سرمایه‌ای، دشوارتر به‌نظر می‌رسد اما سیستم‌های نوین و ترکیبی باوجود این‌که کمی فراتر از مرزهای تکنولوژیکی موجود هستند، به‌واسطه ترکیب و تجمیع فناوری فشرده‌سازی هوا با فناوری‌های دیگر نظیر سیستم‌های کاهنده فشار گاز شهری، تلمبه ذخیره‌ای و مایع‌سازی هوا می‌توانند نقش به‌سزایی در چشم‌انداز ذخیره‌سازی انرژی داشته باشند.

۱. دانشجوی دکتری گروه تخصصی مهندسی انرژی و اقتصاد، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران majid.khazali@srbiau.ac.ir
۲. استادیار گروه فنی و مهندسی، واحد آستارا، دانشگاه آزاد اسلامی، آستارا، ایران (نویسنده مسئول) a.abdali@srbiau.ac.ir

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-30]

۱. مقدمه

با گذشت زمان، لزوم استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی (ESS[1])، بیش از پیش احساس می‌شود. یکی از دلایل این نیاز، رشد استفاده از منابع انرژی ناپایدار نظیر سیستم‌های تولید انرژی تجدیدپذیر است. از طرفی با توجه به شرایط زیست‌محیطی و افزایش روزافزون قیمت انرژی، رشد و کاربرد هرچه بیش‌تر سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر (RE[2]) امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. در ایران نیز با وجود هزینه اولیه بالای تولید انرژی تجدیدپذیر، به‌دلیل جهشی که سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر در تولید ناخالص داخلی ایجاد می‌کند، توسعه این سیستم‌ها ضمن جبران هزینه‌های اولیه و ایجاد رشد اقتصادی پایدار و مطمئن، سبب افزایش امنیت انرژی و بالا رفتن سطح سلامت جامعه خواهد شد [۵]. بنابر اطلاعات ارزیابی‌شده، ایران دارای ۹۴۱۷۰ مگاوات ظرفیت تولید انرژی تجدیدپذیر است که ۹۵٪ آن پتانسیل خورشیدی و بادی است و بخش اندکی از آن مورد استفاده قرار گرفته است [۴]. علاوه‌بر این، طبق تعهدات بین‌المللی باید تا سال ۲۰۳۰ میلادی حداقل ۴٪ از میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ایران کاهش یابد و به‌منظور تأمین برق مورد نیاز بخش‌های مختلف باید تا همین سال حداقل ۳۷۵۰۰ مگاوات ظرفیت جدید در صنعت برق ایجاد شود که اگر این نیاز تا سال ۲۰۳۰ به‌صورت مساوی توسط انرژی‌های بادی و خورشیدی تأمین شود نه‌تنها تعهدات انتشار بر اساس توافق‌نامه پاریس محقق می‌شود بلکه بدون انجام هیچ اقدامی در سایر صنایع نظیر نفت و گاز، سیمان، فولاد و... میزان انتشار فراتر از تعهد ۴٪ کاهش خواهد یافت [۱]. سیستم ذخیره‌سازی انرژی در ارتباط با سیستم انرژی تجدیدپذیر می‌تواند برخی مزایای زیست‌محیطی، فنی و اقتصادی را برای یک سیستم قدرت فراهم کند [۳۳]. علاوه‌بر این، سیستم ذخیره‌سازی انرژی بین تولید و مصرف ایجاد توازن می‌کند و مدیریت و قابلیت اطمینان سیستم را بهبود می‌بخشد، همچنین نرخ نفوذ و کیفیت تولید انرژی منابع تجدیدپذیر را با کنترل بهتر فرکانس و ولتاژ، افزایش می‌دهد [۱۶]. از جمله کاربردهای ذخیره‌سازی انرژی می‌توان به تسطیح منحنی بار [۳۸]، تولید بی‌وقفه توان [۴۳]، پیکسایی منحنی بار [۳۹] و همچنین به‌کارگیری در مناطق دورافتاده [۱۵] اشاره کرد.

1. Energy Storage System
2. Renewable Energy

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-30]

از طرفی با توجه به اهمیت بالای سیستم‌های تولید پراکنده (DG[1]) [۵۷]، ریزشبکه‌ها[2] [۱۷]، شبکه‌های هوشمند[3] [۴۸] و به‌کارگیری روزافزون این سیستم‌ها، کاربرد سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی بیش‌تر از گذشته افزایش یافته است. چراکه سیستم ذخیره‌سازی انرژی بخش مهمی از این سیستم‌ها و قسمت جدایی‌ناپذیر شبکه‌های هوشمند است.

از میان انواع مختلف سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده (CAES[4]) دارای مزیای متعددی از نظر مدت زمان و حجم ذخیره‌سازی انرژی و همچنین هزینه‌های سرمایه‌ای و تولید انرژی است [۱۰]. در سال‌های اخیر پژوهش‌های متعددی بر روی این نوع سیستم ذخیره‌سازی انرژی انجام شده و چندین ثبت اختراع صورت گرفته است [۲۱]. اساس کار سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بر پایه فشرده‌سازی هوا به‌وسیله کمپرسور در هنگام تولید انرژی مازاد (توسط شبکه یا سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر) و استحصال انرژی پتانسیل مکانیکی ذخیره‌شده، در زمان نیاز است. به‌طور معمول فشرده‌سازی هوا به‌وسیله کمپرسور در یک مخزن زیرزمینی یا صلب اتفاق می‌افتد و در زمان استحصال انرژی از یک چرخه توربین گاز استفاده می‌شود. سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده متداول از توربین گاز برای استحصال انرژی بهره می‌برد، این سیستم نسل اول سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده است. مطابق بررسی‌های انجام‌شده، ۳۰ سایت مناسب برای ساخت این سیستم در کشور وجود دارد که می‌توان بدون تأسیس نیروگاه حرارتی جدید اقدام به احداث آن نمود و با مزارع بادی یکپارچه کرد [۴۱]. همان‌طور که گفته شد، این نوع سیستم ذخیره‌سازی انرژی در مکان‌های مشخصی قابل احداث است، همچنین به‌منظور استحصال انرژی نیازمند سوخت فسیلی است. به همین دلیل، نسل دوم سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده، که سیستمهای بی‌دررو[5] و هم‌دما[6] هستند در سال‌های اخیر بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته‌اند [۲]. این سیستم‌ها می‌توانند به شکل یک سیستم تولید چندگانه یا تولید هم‌زمان استفاده شوند، اساس کار چنین سیستمی به‌کار بردن گرمای مازاد استحصال یا

1. Distributed Generation
2. Micro Grid
3. Smart Grid
4. Compressed Air Energy Storage
5. Adiabatic
6. Isothermal

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-30]

تولید انرژی به‌منظور تأمین گرمایش و سرمایش است و از نظر تولید سرمایش می‌توان آنها را به سه دسته تولید سرمایش با چیلر جذبی، منبسط‌کننده[1] و اجکتور[2] تقسیم کرد [۳].

در مقاله حاضر انواع مدرن و متفاوتی از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده مطرح شده و مورد بحث و بررسی قرار گرفته که ترکیبی از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده نسل دوم به‌همراه سایر سیستم‌های انرژی است. وجه مشترک تمامی این سیستم‌ها، فشرده‌سازی سیال تراکم‌پذیر (به طور معمول هوا) است اما عملکرد آنها از نظر نوع و روش ذخیره‌سازی، مخازن فشاربالا، روش استحصال انرژی ذخیره‌شده و موقعیت مکانی، تفاوت‌های چشمگیری دارد.

۲. روش انجام کار

به‌منظور یافتن مراجع و مستندات مرتبط با مقاله حاضر جستجوهای متعددی در فاصله زمانی ابتدای سال ۲۰۱۱ تا انتهای سال ۲۰۱۹ میلادی با کلیدواژگان انگلیسی ذخیره‌سازی انرژی[3]، هوای فشرده[4]، فشرده‌سازی هوا[5]، اختصار عبارت ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده[6] و سیستم انرژی نوین[7] در پایگاه‌های داده ساینس‌دایرکت[8]، اشپرینگر[9] و کتابخانه برخط وایلی[10] انجام شد. در هر نوبت، این جستجوها به‌صورت ترکیبی از کلیدواژگان ذکرشده اجرا شد که در نتیجه آن بیش‌تر از ۳۰۰ عنوان متفاوت یافت شد. در میان این عنوان‌ها، با مطالعه چکیده پژوهش‌ها و ارزیابی ارتباط آنها با پژوهش حاضر کمتر از ۱۳۰ پژوهش انتخاب گردید. با مطالعه دقیق پژوهش‌های منتخب، پژوهش‌های مشابه دسته‌بندی شدند و با توجه به ضریب تأثیر[11] مجلات، نوین بودن سیستم ارائه‌شده و دارا بودن گواهی ثبت اختراع تعداد آنها به حدود ۷۰ پژوهش کاهش یافت. همچنین کلمات کلیدی «ذخیره‌سازی انرژی»، «هوای فشرده»، «فشرده‌سازی

1. Expander
2. Ejector
3. Energy storage
4. Compressed air
5. Air compression
6. CAES
7. Novel energy system
8. Sciencedirect
9. Springer
10. Onlinelibrary.wiley
11. Impact Factor

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-30]

هوا» و «سیستم انرژی» در پایگاه‌های داده «مگیران» و «سیویلیکا» در فاصله زمانی سال ۱۳۹۶ تا سال ۱۳۹۹ جستجو شد که از میان ۷ نتیجه مرتبط به پژوهش حاضر، ۵ مقاله انتخاب شد. سپس طبقه‌بندی موضوعی پژوهش‌ها صورت پذیرفت که بدین ترتیب به دو دسته کلی ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده به‌همراه ذخیره‌سازی انرژی حرارتی و ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده با ترکیبی از سیستم‌های انرژی و روش‌های نوین، تقسیم شدند.

زیرمجموعه‌های این دو دسته کلی را می‌توان از نظر مقیاس به سه دسته کوچک (کم‌تر از ۱۰ مگاوات)، متوسط (بین ۱۰ تا ۱۰۰ مگاوات) و بزرگ‌مقیاس (بیش‌تر از ۱۰۰ مگاوات) تقسیم کرد. از نظر مخزن ذخیره‌سازی هوای فشرده نیز انواع متفاوتی وجود دارد؛ مخازن زیر سطحی و یا شناور که خود دارای انواع صلب و کیسه انرژی[1] هستند [۴۶]، مخازن صلب بزرگ و یا کوچک بر روی سطح زمین و در نهایت غارهای زیرزمینی که متداول‌ترین مخزن ذخیره‌سازی هوای فشرده است [۴۲]. همه این مخازن می‌توانند فشار ثابت و یا حجم ثابت باشند؛ کیسه‌های انرژی به‌دلیل ماهیت انعطاف‌پذیر برای کاربردهای فشارثابت استفاده می‌شوند، اما برای ثابت نگه‌داشتن فشار هوا بر روی سطح زمین از مخازن یا دریاچه‌های آب متصل به مخزن هوا استفاده می‌شود [۳۰]. به‌علت پیچیدگی‌های متعدد سیستم‌های نوین و ترکیبی و همچنین برای حفظ انسجام مقاله حاضر، آنها در دو زیرمجموعه سیستم‌های پاک و سیستم‌های نیازمند سوخت فسیلی قرار گرفتند.

۳. سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده به‌همراه ذخیره‌سازی حرارت

سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده مورد بحث در این بخش از گرمای تولید شده توسط کمپرسورها در فرایند بارگیری[2] برای بهبود عملکرد سیستم در فرایند تخلیه[3] استفاده می‌کنند یعنی این سیستم‌ها بی‌دررو (A-CAES[4]) هستند و با ذخیره‌سازی حرارت نیازی به استفاده از سوخت فسیلی ندارند. یکی از تفاوت‌های این سیستم‌ها با سیستم‌های تولید هم‌زمان در این است که سیستم‌های تولید هم‌زمان اصولا در مقیاس‌های کوچک‌تر طراحی شده و محل به‌کارگیری آنها فاصله چندانی با مصرف کننده

1. Energy Bag
2. Charge
3. Discharge
4. Adiabatic Compressed Air Energy Storage

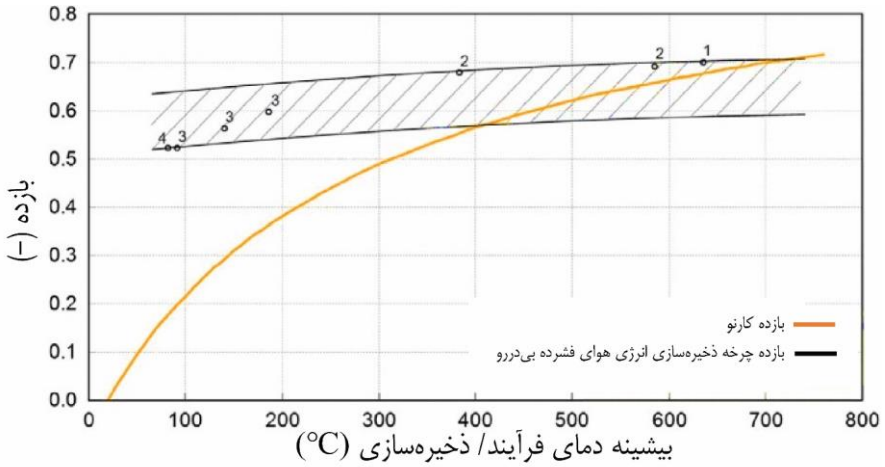
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-30]

نهایی ندارد ولی سیستم‌های بی‌دررو بزرگ‌مقیاس در فاصله دورتری از شهرها یا مصرف کننده نهایی قرار دارند که این موضوع سبب می‌شود انتقال حرارت به مصرف کننده به راحتی امکان‌پذیر نبوده و یا صرفه اقتصادی نداشته باشد. بنابراین تمامی حرارت تولید شده در سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بی‌دررو برای بهبود عملکرد خود سیستم مصرف می‌شود.

اصولاً در سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بی‌دررو از یک واحد ذخیره‌سازی انرژی حرارتی (TES[1]) برای نگه‌داشت حرارت و استفاده‌ی آن در زمان تخلیه استفاده می‌شود. ولی نگه‌داری انرژی گرمایی در دماهای بالا بدون تلفات انرژی چندان راحت نیست، به‌خصوص که در سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بی‌دررو فاصله زمانی بین چرخه بارگیری و تخلیه معمولا طولانی است. در سال ۲۰۱۴، ولف و بوت[2] [۵۶] نگه‌داشت انرژی گرمایی در دماهای پایین‌تر را بررسی کردند. این‌که تلفات حرارتی در دماهای پایین‌تر، کم‌تر خواهد شد بنا به قانون شار حرارتی (فوریه) امری بدیهی است اما باید افت توان و بازده سیستم نیز بررسی شود. به همین علت با بررسی و تحلیل دماهای عملکرد و ذخیره‌سازی انرژی حرارتی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده و همچنین بازده سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده عملیاتی‌شده، در دست احداث و پیشنهادی، تأثیر دما بر بازده سیستم بررسی شده است. نتایج این تحلیل در شکل (۱) قابل مشاهده است.

1. Thermal Energy Storage
2. Wolf and Budt

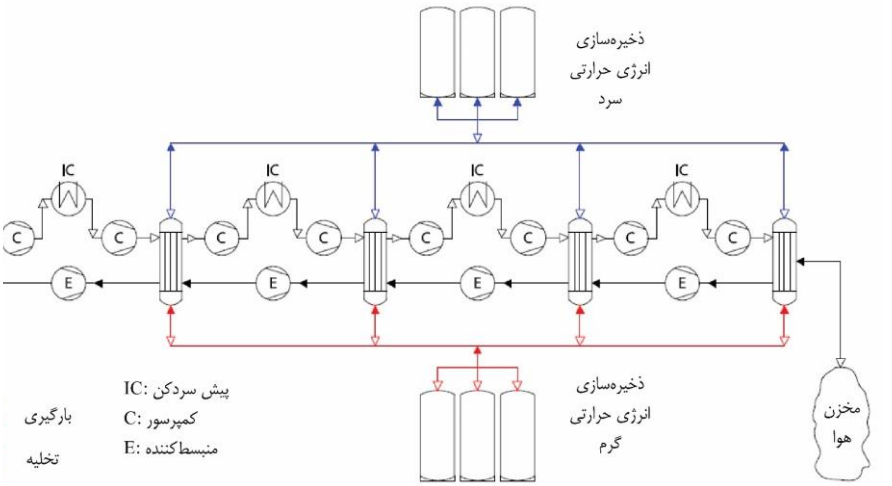
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-30]



شکل ۱. نمودار ترسیم شده با استفاده از داده‌های پژوهش‌های دیگر برای بررسی ارتباط دما با بازده سیستم [۵۶]

ناحیه هاشور خورده در شکل (۱) نشان دهنده تغییرات بازده سیستم با تغییرات دما است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود اختلاف دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد تنها حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد بر بازده سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده تأثیرگذار است. نظر به این‌که تلفات اگزرژی مربوط به نیروگاه ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بی‌دررو تابعی از دمای ذخیره‌سازی است بنابراین این مقدار کاهش بازده به‌علت پایین آمدن دمای ذخیره‌سازی قابل چشم‌پوشی است [۲۳, ۵۶]، هرچند که ممکن است این کاهش دما به‌علت زیاد شدن تعداد فرایندهای تبدیل گرمای لازم برای نگه‌داری فرایند دماهای پایین‌تر، موجب افزایش تلفات اگزرژی شود. از مزایای این سیستم قابلیت شروع به‌کار سریع (کم‌تر از ۵ دقیقه [۵۶]) است اما بازده آن از حد مورد انتظار پایین‌تر است. شکل ۲ شماتیک طرح ارائه‌شده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-30]



شکل ۲. شماتیک فرایند یک نیروگاه ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بی‌دررو دما پایین ۵۰ مگاواتی با فشار ۱۵۰ بار [۵۶]

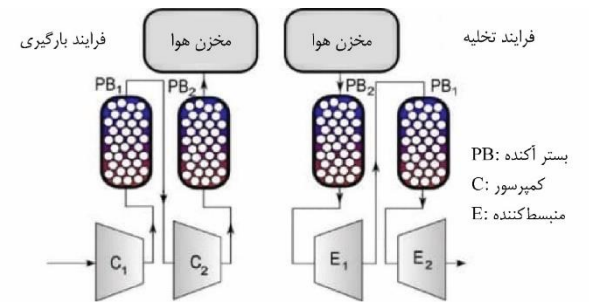
در سال ۲۰۱۶ لو[1] و همکاران [۳۵] مطالعه‌ای به‌منظور بهینه‌سازی و بهبود بازده سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بی‌دررو دما پایین (LTA-CAES[2]) انجام دادند. در این مطالعه حدود مقدار پارامتر اولیه برای شبیه‌سازی سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بی‌دررو از یک نیروگاه ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده عملیاتی تشخیص داده شد و استراتژی بهبود بازده سیستم از طریق یک مطالعه پارامتری با یک آنالیز حساسیت مورد بررسی قرار گرفت و به‌منظور تحلیل پتانسیل‌های بهبود بازده سیستم، پیکربندی‌های مختلفی طراحی و در مورد آن بحث شد. نتایج این پژوهش نشان دهنده برتری این سیستم نسبت به سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بی‌دررو معمول دما بالا است.

پژوهش‌های بسیاری نیز در رابطه با سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده به‌همراه سیستم ذخیره‌سازی حرارتی دما بالا انجام شده است. در سال ۲۰۱۵ باربور[3] و همکاران [۱۱] به بررسی نقش استفاده از تقویت‌کننده‌های بستر آکنده در بهبود بازده سیستم پرداخته است. در این پژوهش مخزن بستر

1. Luo
2. Low Temperature Adiabatic CAES
3. Barbour

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-30]

آکنده از مواد خاصی مانند کربن فعال یا کاتالیزورها، برای افزایش جذب گرما، پر می‌شود. شکل (۳) دیاگرام عملکرد این سیستم را به‌صورت شماتیک نشان می‌دهد.



شکل ۳. نمای شماتیک سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بی‌دررو با استفاده از مبدل‌های حرارتی بستر آکنده [۱۱]

بستر آکنده استفاده شده در این سیستم از ستون‌های جامد پر منفذ یا مواد جامد ذره‌ای بسته‌بندی شده با فضای خالی بین ذرات، تشکیل شده است. استفاده از یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی حرارتی بستر آکنده این امکان را فراهم می‌آورد تا بازده یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بی‌دررو بزرگ‌مقیاس تا ۷۵ درصد برسد [۵۰]. همان‌طور که از شکل ۳ مشخص است بستر آکنده ۱ (PB1[1]) سرمایش بین فرایند فشرده‌سازی را با ذخیره گرمای تولیدی در کمپرسور فراهم کرده و بستر آکنده۲ هوای وارد شده به مخزن ذخیره‌سازی را سرد می‌کند. این کار علاوه‌بر کاهش حجم مخزن مورد نیاز برای ذخیره‌سازی هوا، موجب افزایش کارایی کمپرسورها می‌شود. همچنین این بستر آکنده در سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بی‌دررو می‌تواند جایگزین مبدل‌های حرارتی غیرمستقیم و ذخیره جداگانه انرژی حرارتی شده و سیستم را از یک سیال حرارتی جداگانه بی‌نیاز کند. مطابق نتایج این پژوهش، افزایش حرارت در بسترها به‌طور پیوسته مقداری از بازده را می‌کاهد که یافته‌های مربوط به ولف و بوت [۵۶] را تأیید می‌کند. تحقیقاتی نیز بر روی نوع حرکت جریان سیال حرارتی در بستر آکنده انجام شده

1. Packed Bed

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-30]

است. به‌عنوان نمونه، مک تیگو و وایت[1] [۳۷] در سال ۲۰۱۸ بر روی حرکت شعاعی سیال انتقال حرارت در بستر آکنده و مقایسه آن با حرکت محوری، مطالعه دقیقی انجام دادند که ثابت می‌کند حرکت شعاعی از نظر کارایی عملکرد مشابه حرکت محوری است اما در حرکت شعاعی نیاز به حجم بستر آکنده بیش‌تری است که موجب افزایش هزینه سرمایه‌ای می‌شود.

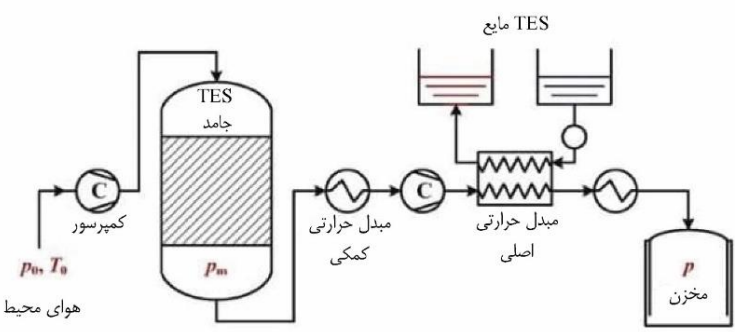
ارزیابی تئوری بر روی تأثیر مبدل حرارتی بر عملکرد سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بی‌دررو توسط یانگ[2] و همکارن [۶۰] در سال ۲۰۱۴، بررسی اثرات ترمودینامیکی محفظه ذخیره‌سازی هوا بر سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بی‌دررو پیشرفته (AA-CAES[3]) در پژوهش ژانگ[4] و همکارن [۶۷] و تأثیر ترمودینامیکی ذخیره‌سازی انرژی حرارتی بر سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده توسط ژانگ و همکاران [۶۵] در سال ۲۰۱۳ ثابت می‌کند حتی زمانی که بازده سیستم به حداکثر می‌رسد باز هم نسبتی از انرژی گرمایی به‌منظور استفاده‌های دیگر در ذخیره‌سازی انرژی حرارتی وجود دارد. همچنین تحقیقات دیگری، از جمله جوبه و نجار[5] [۲۶] و هارتمن[6] و همکارن [۲۵] در سال ۲۰۱۲ در زمینه استفاده از ذخیره‌سازی حرارت در دماهای بالا و تأثیر آن بر سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده انجام شد که تأثیر مثبت ذخیره‌سازی انرژی حرارتی بر بازده سیستم را تأیید می‌کنند. مسئله مهمی که در این دو پژوهش به آن توجه شده است اهمیت کنترل دما در سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بی‌دررو و تأثیر این موضوع بر بازده سیستم است. یعنی دماهای مورد استفاده در سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بی‌دررو باید تعریف شده باشند و نباید تغییر زیادی در دمای مشخص‌شده برای عملکرد بهینه سیستم اتفاق بیافتد. برای مثال اگر گرمای خروجی کمپرسور بیش از حد مجاز باشد، جدا از بی‌دررو بودن سیستم، باید دمای آن ترجیحاً به‌صورت هم‌فشار کاهش یابد. به‌طور مثال به ناچار باید دمای مازاد را از بین برد و حالت بهینه برای این کار استفاده از منابع طبیعی (مانند یک رودخانه) است که خود می‌تواند اثرات نامطلوبی بر روی محیط‌زیست داشته باشد.

1. McTigue and White
2. Yang
3. Advanced Adiabatic CAES
4. Zhang
5. Jubeh and Najjar
6. Hartmann

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-30]

هردو موضوع باقی ماندن حرارت در سیستم (با وجود ذخیره‌سازی انرژی حرارتی) و کنترل حرارت آن، اهمیت سیستم‌های تولید چندگانه و ریزشبکه را مشخص می‌کند.

در سال ۲۰۱۸ ژو[1] و وایت [۵۹] سه سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بی‌دررو با ذخیره‌سازی انرژی حرارتی جامد، مایع و ترکیبی[2] را مورد مقایسه و بررسی فنی و اقتصادی قرار دادند. در سیستم ترکیبی از هردو نوع ذخیره‌سازی حرارت جامد و مایع بهره‌گیری شده است، به‌نحوی که از ذخیره‌سازی انرژی حرارتی جامد برای هوای فشارپایین و از ذخیره‌سازی انرژی حرارتی مایع برای هوای فشاربالا استفاده شده است، شکل (۴).



شکل ۴. نمای شماتیک سیستم سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بی‌دررو ترکیبی در مرحله ذخیره‌سازی انرژی [۵۹]

همان‌طور که در شکل (۴) مشخص است این سیستم دارای یک مرحله ذخیره‌سازی انرژی حرارتی جامد بعد از فشرده‌سازی اولیه (فشارپایین) و دو مرحله ذخیره‌سازی انرژی حرارتی مایع بعد از فشرده‌سازی ثانویه (فشاربالا) است. مطالعات پارامتری و بهینه‌سازی انجام‌شده در این پژوهش نشان داد که سیستم ترکیبی از منظر ترمودینامیکی و اقتصادی به دو سیستم دیگر برتری دارد. دلیل مزیت اقتصادی سیستم ترکیبی به سیستم‌هایی که فقط از ذخیره‌سازی انرژی حرارتی جامد یا مایع استفاده می‌کنند این است که ذخیره‌سازی انرژی حرارتی جامد هنگامی که در فشار پایین کار می‌کند ارزان‌تر است و نیازی به مبدل حرارتی غیرمستقیم ندارد، درحالی که در فشار بالا از ذخیره‌سازی انرژی حرارتی مایع گران‌تر است. مطابق

1. Xue
2. Hybrid

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-30]

این پژوهش، فاکتورهای اصلی کنترل‌کننده که هزینه – بازده را به تعادل می‌رسانند عبارتند از بازده پلیتروپیک توربین‌ها و کمپرسورها، تعداد واحدهای تبادل (NTU[1]) مبدل‌های حرارتی (برای سیستم‌های مایع و ترکیبی)، نسبت زمان بارگیری واقعی به زمان بارگیری اسمی مخزن و نسبت طول به قطر مخزن (برای سیستم‌های ترکیبی و جامد) [۵۹]. همچنین مشخص شد روغن معدنی به‌دلیل دمای نسبتاً بالای قابل قبول و هزینه واحد پایین، بهترین سیال حرارتی برای ذخیره‌سازی انرژی حرارتی مایع است.

٤. سیستم‌های نوین و ترکیبی

در این بخش به بررسی سیستم‌هایی پرداخته شده که از یک فناوری متفاوت و یا ترکیب چند فناوری برای بهبود عملکرد سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده استفاده کرده‌اند. به‌علت پیچیده بودن این سیستم‌ها دسته‌بندی آنها قدری دشوار است، به همین جهت به دو دسته پاک (بدون مصرف سوخت فسیلی) و نیازمند به سوخت فسیلی تقسیم شده‌اند. با این حال، نمی‌توان با قطعیت کامل اظهار داشت که سیستم‌های پاک مورد بحث هیچ نیازی به سوخت فسیلی ندارند، اما با توجه به تحلیل‌های دقیق، مطالعات انجام شده و همچنین پژوهش‌های آزمایشگاهی می‌توان به نتایج این مقالات تا حد بالایی اطمینان کرد.

٤-١. سیستم‌های نیازمند به سوخت فسیلی

در سال ۲۰۱۵ پای[2] و همکاران [۴۴] تأثیر استفاده از نفوذپذیری سفره‌های آبی زیرزمینی به‌منظور ذخیره‌سازی هوای فشرده در سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده را بررسی کردند. در اصل، در این پژوهش یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده معمولی مورد بررسی قرار گرفته که از گاز طبیعی برای احتراق و استحصال انرژی استفاده می‌کند، اما نوع مخزن ذخیره‌سازی هوای فشرده در آن متفاوت است. ذخیره‌سازی هوای تحت فشار در سفره‌های آبی زیرزمینی چندین مزیت دارد که شامل؛ ظرفیت ذخیره‌سازی بالا، در دسترس بودن گسترده از منظر زمین‌شناسی، فشار نسبتا ثابت و هزینه ساخت نسبتاً کم است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با فزایش نفوذپذیری، تخریب اگزرژی به‌علت افت

1. Number of Transfer Units
2. Pie

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-30]

فشار سیال عامل در یک سفره آب زیرزمینی، کاهش یافته و همچنین بازده‌های اگزرژی و حرارتی افزایش می‌یابد که در نتیجه خروجی خالص نیروگاه افزایش خواهد یافت.

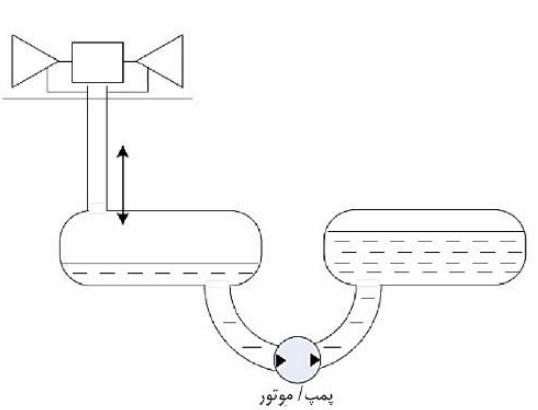
ژائو[1] و همکاران [۷۰] نیز در سال ۲۰۱۵ سیستم ترکیبی نوینی ارائه کردند که بر اساس ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده ، چرخه قدرت دی‌اکسیدکربن شبه‌بحرانی (CTPC[2]) و انرژی سرمایش گاز مایع طبیعی (LNG[3]) کار می‌کند. این سیستم می‌تواند توان مورد نیاز فشرده‌سازی در چرخه بارگیری را کاهش دهد، انرژی خروجی را در چرخه تخلیه بهبود بخشد و انرژی گاز مایع طبیعی سرد را در هردو حالت عملکرد (بارگیری و تخلیه) به‌کار گیرد. گاز مایع طبیعی برای خنک‌سازی دمای هوای ورودی به کمپرسور در طول فرایند بارگیری استفاده شده است، که به موجب آن مصرف توان کاهش یافته و بنابراین زمان پر شدن غار ذخیره‌سازی هوا کاهش می‌یابد. از طرف دیگر چرخه قدرت دی‌اکسیدکربن شبه‌بحرانی به‌همراه گاز مایع طبیعی به‌عنوان چاه گرمایی[4] برای بازیافت گرمای تلف‌شده در دودکش به‌واسطه انبساط متوالی، به تولید بیش‌تر الکتریسیته می‌انجامد. اما می‌توان گاز طبیعی را تاحد مایع شدن سرد کرد که این امر تأثیر مثبتی بر کارایی سیستم دارد [۲۹, ۶۳].

همچنین در همین سال، ژائو و همکاران [۶۹] به تحلیل سیستم ترکیبی ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده به‌همراه چرخه «کالینا۶»[5] پرداختند. چرخه کالینا از محلولی با دو سیال با دماهای جوش متفاوت برای سیال عامل خود استفاده می‌کند. به‌دلیل این‌که محلول دوسیالی سیکل کالینا۶ در گستره وسیع‌تری از دما به جوش می‌آید، لذا قادر است نسبت به سیال کاری خالص، گرمای بیش‌تری را از منبع حرارتی استحصال کند. اولین مشخصه‌ی چرخه کالینا۶ این است که سیال در آن به‌جای آب به‌طور معمول مخلوط آب و آمونیاک است. این چرخه بازدهی به‌مراتب بالاتر از چرخه رانکین دارد. همچنین در چرخه کالینا۶ چون خروجی توربین، بر خلاف رانکین که دوفازی است، بخار اشباع است لذا مشکلاتی مانند خوردگی ایجاد نمی‌شود. بازده قانون دوم سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده–کالینا۶ ارائه‌شده می‌تواند نزدیک ۴٪ در مقایسه با سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده تنهای مرسوم بهبود داده شود [۶۹].

1. Zhao
2. CO2 Transcritical Power Cycle
3. Liquid Natural Gas
4. Heat Sink
5. KCS6

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-30]

اما در سال ۲۰۱۱ کیم[1] و همکاران [۳۱] یک سیستم ترکیبی نوین بر اساس ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده فشارثابت و سیستم ذخیره‌سازی تلمبه‌ذخیره‌ای (PHES[2]) را مورد تحلیل و بررسی قراردادند. سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده فشارثابت بزرگ‌مقیاس برای جلوگیری از افت فشار از یک منبع آب طبیعی استفاده می‌کنند. بدین صورت که مخزن ذخیره‌سازی هوا در عمق زیاد و در ارتباط با یک مخزن آب در سطح زمین است که این اختلاف ارتفاع به‌وسیله فشار هیدرواستاتیکی، مانع افت فشار غار ذخیره‌سازی می‌شود. در این سیستم نوین از یک پمپ – توربین آبی استفاده شده که در فرایند تخلیه، آب با عبور از این توربین، تولید توان می‌کند و در زمان غیر پیک مصرف انرژی، پمپ کار می‌کند. بدین‌وسیله بخش زیادی از توان مصرفی پمپ جبران می‌شود. نمای شماتیک این سیستم در شکل (۵) قابل مشاهده است.



شکل ۵. نمای شماتیک سیستم ترکیبی ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده–تلمبه ذخیره‌ای فشارثابت [۳۱]

از مزایای این سیستم نسبت به ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده فشارثابت متداول، عدم نیاز به عمق زیاد مخزن ذخیره‌سازی است. یکی از چالش‌هایی که این سیستم با آن روبه‌رو است تبادل حرارت بین دو سیال آب و هوا است که می‌تواند تأثیر منفی زیادی در عملکرد سیستم بگذارد.

1. Kim
2. Pumped Hydroelectric Energy Storage

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-30]

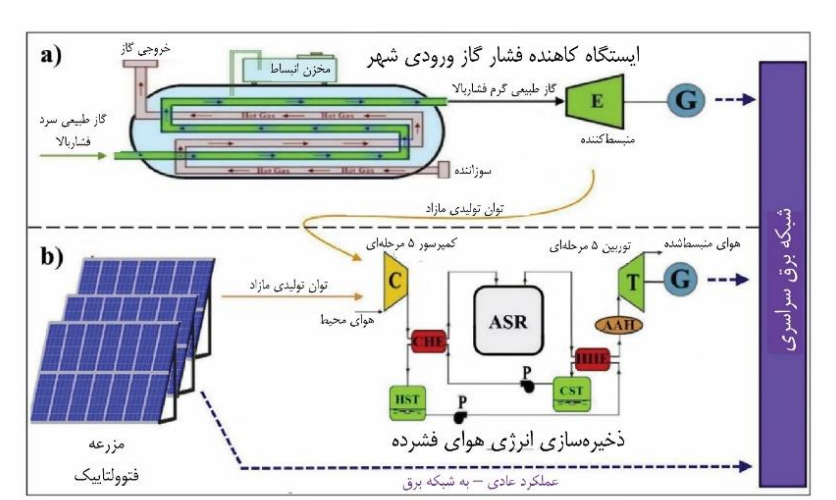
٤-۲. سیستم‌های پاک

اساس کار این سیستم‌ها مانند سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بی‌دررو است، یعنی با ذخیره‌سازی حرارت تولید شده در فرایند بارگیری در ذخیره‌سازی انرژی حرارتی از سوزاندن سوخت فسیلی بی‌نیاز می‌شوند. البته استفاده از سوختی که میزان آزادسازی دی‌اکسیدکربن و گازهای آلاینده آن صفر باشد نیز راه‌کار مناسبی است.

به‌تازگی استفاده از ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده به‌جای سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی متداول در نیروگاه‌های فتوولتاییک بزرگ‌مقیاس متصل به شبکه مورد بررسی ترمو – اقتصادی قرار گرفته که نتایج آن بسیار رضایت بخش بوده است، این کار توسط لی[1] و همکاران [۳۴] درسال ۲۰۱۸ انجام شده است. از سوی دیگر ثابت شده ایستگاه کاهنده فشار گاز ورودی شهر (CGS[2])، که در آن گاز طبیعی فشاربالا تا سطوح فشار بسیار پایین‌تر منبسط می‌شود، یک مکان بسیار مناسب برای تولید برق رایگان با به‌کارگیری توربو – اکسپندر[3] به‌جای شیرهای انبساط[4] رایج است [۸, ۱۸, ۲۰]. عرب‌کوهسر[5] و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۶ یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده که با یک نیروگاه فتوولتاییک و یک ایستگاه کاهنده فشار ورودی شهر، یکپارچه شده است را مورد بررسی قرار دادند. نمای شماتیک این سیستم ترکیبی در شکل (۶) قابل مشاهد است.

1. Li
2. City Gate Station
3. Turbo Expander
4. Expansion Valve
5. Arabkoohsar

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-30]



شکل ۶. نمای شماتیک سیستم ترکیبی ارائه‌شده در پژوهش [۹]

در سال ۲۰۱۵ مینوتیلو[1] و همکاران [۴۰] به ارزیابی یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده کوچک‌مقیاس یکپارچه شده با یک نیروگاه فتوولتاییک منفصل از شبکه، برای پشتیبانی توان الکتریکی یک ایستگاه فرستنده و گیرنده پایه (BTS[2])، پرداختند. سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بی‌دررو مورد استفاده، گرمای مورد نیاز را با استفاده از بازیابی حرارت کمپرسورها و ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، بدون مصرف سوخت فسیلی، تأمین می‌کند. مطابق این پژوهش سیستم قدرت برای حصول یک هدف سرمایش از هوای سرد (۳°C) در خروجی توربین که برای خنک‌سازی تجهیزات مخابراتی مفید است، طراحی شده است. هدف از این مطالعه تعیین پارامترهای عملیاتی بهینه نیروگاه، بر حسب فشار متوسط ذخیره‌سازی و محدوده فشار عملیاتی مخزن هوا، با توجه به نصب نیروگاه در سه منطقه متفاوت آب و هوایی است. تحلیل با وارد کردن برخی از پارامترهای اجرایی مانند بازده سیستم ذخیره‌سازی، فاکتور

1. Minutillo
2. Base transceiver station

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-30]

تأمین انرژی و فاکتور تأمین سرمایش، انجام گرفت. نتایج نشان داد بهترین عملکرد می‌تواند با انتخاب پایین‌ترین فشار متوسط و بالاترین فشار عملیاتی مخزن هوا، به‌دست آید.

تالینی[1] و همکاران [۴۹] در سال ۲۰۱۵ به تحلیل انرژی و اقتصادی یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده کوچک‌مقیاس[2] پرداختند. هدف این سیستم ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی و گرمایی به‌منظور استفاده مصرف کنندگان خانگی و غیر خانگی (پناه‌گاه/ مصرف کنندگان مناطق دور افتاده)، به‌منظور کاهش هزینه‌های انرژی و افزایش قابلیت اطمینان تأمین انرژی از منابع تجدیدپذیر است. سیستم ارائه‌شده در این پژوهش، از یک فناوری نوین مبتنی بر فرایند ذخیره‌سازی انرژی با بازده بالا به‌وسیله ذخیره‌سازی هوای فشرده در فشار بالا استفاده می‌کند. در این سیستم، تراکم مخلوط مایع و هوا برای ذخیره‌سازی گرما شبه‌هم‌دما است و در طول فرایند انبساط توان الکتریکی به‌صورت ثابت تولید می‌شود [۴۹]. مخلوط هوا و مایع با نسبت مناسب بین فازها این امکان را فراهم می‌کند تا فرایند شبه‌هم‌دمای فشرده‌سازی حاصل شود و سیستم با بیشینه بازده تراکم و تبادل حرارتی بالا قادر خواهد بود تا در طول انبساط در یک فشار ثابت تخلیه، توان الکتریکی ثابت تولید کند. در این پژوهش، یک تحلیل اقتصادی و انرژتیک به‌منظور شناسایی میزان بهینه مرجع انجام شده است، سیستم تولید توان برای یکپارچه‌سازی با نیروگاه‌های بادی کوچک و فتوولتاییک با یک سیستم ذخیره‌سازی بر اساس ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده کوچک‌مقیاس تجهیز شده است. چالش تکنولوژیکی این است که سیستم قادر به تضمین سطح توان ثابت تعیین شده در سراسر روز باشد.

ژانگ و همکاران [۶۶] در سال ۲۰۱۴ تبدیل و انتقال انرژی در سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بی‌دررو یکپارچه شده با توربین بادی را تحلیل کردند. در این مقاله یک مدل شبیه‌سازی شده شامل سرعت باد، توربین بادی و سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بی‌دررو پیشرفته توسعه داده شده و تحلیل ترمودینامیکی برای تبدیل و انتقال انرژی در سیستم ترکیبی انجام گرفته است. تأثیرات پایداری و ناپایداری سرعت باد بر سیستم ترکیبی از منظر بازده سیستم و تبدیل انرژی تحلیل و بررسی شده است. علاوه‌براین، رابطه بین تبدیل انرژی با توربین بادی و سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده

1. Tallini
2. Micro-CAES

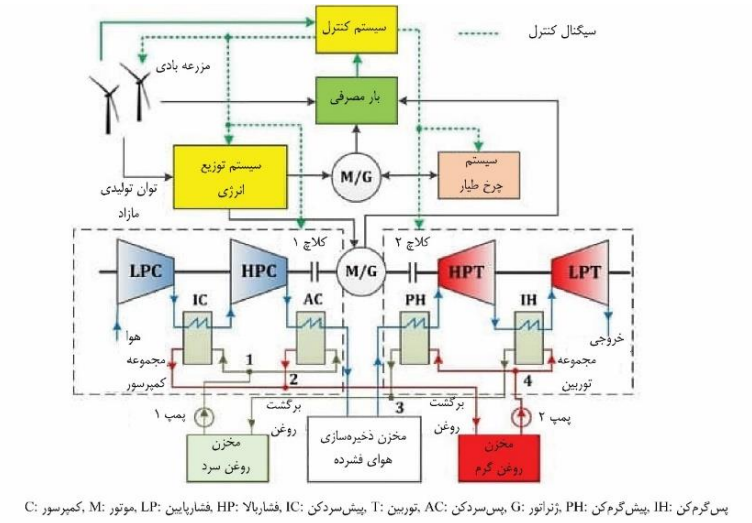
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-30]

بی‌دررو پیشرفته بر اساس تحلیل فرایند بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که چندین نوع مختلف انرژی در سیستم ترکیبی وجود دارد که رابطه تبدیل مجزایی دارند. به‌عنوان مثال برای توربین بادی، ضریب توان، بازده به‌کارگیری انرژی باد را مشخص می‌کند و در سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بی‌دررو پیشرفته، بازده کمپرسور تأثیر اصلی را بر بازده تبدیل انرژی دیگر اجزاء دارد. قدرت و نوسانات سرعت باد تأثیر مستقیم بر بازده‌های تبدیل انرژی اجزاء سیستم ترکیبی دارد و در داخل محدوده سرعت باد مناسب، می‌توان انتظار بیش‌ترین بازده سیستم را داشت.

همان‌طور که از پژوهش‌های مطرح‌شده برمی‌آید یکپارچه‌سازی سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بی‌دررو از منظر فنی، اقتصادی و محیطزیستی بسیار ثمربخش است. می‌توان برای افزایش کارایی سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده آن را با دیگر سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی ترکیب کرد. ژائو و همکاران [۶۸] در سال ۲۰۱۴ یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بی‌دررو ترکیب شده با سیستم ذخیره‌سازی انرژی چرخ طیار (FESS[1]) و نیروگاه بادی را طراحی و تحلیل ترمودینامیکی کردند. این تحلیل شامل شرایط محیطی، دمای ورودی کمپرسور، دمای غار ذخیره‌سازی، بیشینه و کمینه فشارهای غار ذخیره‌سازی است. استفاده از سیستم ذخیره‌سازی انرژی چرخ طیار در این سیستم ترکیبی تأثیر بسیار مثبتی بر عملکرد و تسطیح جریان خروجی سیستم گذاشته است. نمای شماتیک این سیستم در شکل (۷) نشان داده شده است.

1. Flywheel Energy Storage System

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-30]



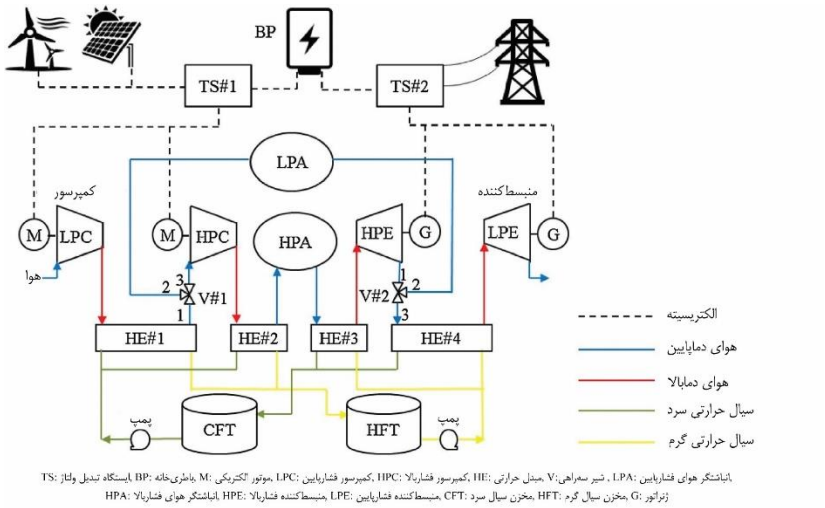
شکل ۷. طرح شماتیک سیستم ترکیبی سیستم ذخیره‌سازی انرژی چرخ طیار و ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بی‌دررو [۶۸]

همچنین در سال ۲۰۱۸ ژانگ و همکاران [۶۴] یک سیستم ترکیبی ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بی‌دررو به‌همراه یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی چرخ طیار به‌منظور یکپارچه‌سازی با یک مزرعه بادی با ظرفیت ۴۹/۵ مگاوات مورد تحلیل و بهینه‌سازی قرار دادند. در این پژوهش به‌طور خاص، انتخاب اجزای کلیدی سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بی‌دررو مانند کمپرسور، منبسط‌کننده و پارامترهای سیستم ذخیره‌سازی انرژی چرخ طیار مشخص شده است. نتایج این پژوهش نشان داد با توان متوسط بادی ۲۵/۵۵ مگاوات می‌توان توان ۲۴/۱۸ مگاوات را به‌طور پایدار تأمین کرد. همچنین مشخص شد تلفات توان بادی از ۱۷/۱درصد به ۶/۶ درصد کاهش می‌یابد.

درسال ۲۰۱۶ زد. ونگ[1] و همکاران [۵۵] یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده زیرآبی چندسطحی (UWCAES[2]) را طراحی و تحلیل کردند. این سیستم ترکیبی متشکل از باتری ذخیره‌ساز انرژی، ذخیره‌سازی بی‌دررو حرارت، منابع توان تجدیدپذیر و سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده است و به‌صورت متصل به شبکه مورد ارزیابی قرار گرفته است، شکل (۸).

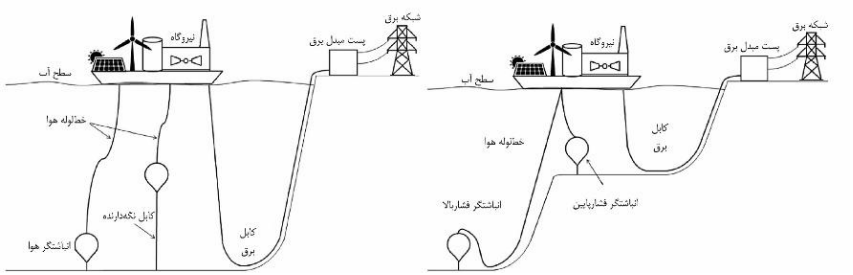
1. Z. Wang
2. Under Water CAES

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-30]



شکل ۸. نمای شماتیک و جریان انرژی سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده زیرآبی چندسطحی در دو سطح [۵۵]

تجهیزات انرژی تجدیدپذیر (توربین بادی و پنل خورشیدی) الکتریسیته را به مبدل الکتریکی[1] می‌فرستند و پس از آن بخشی از الکتریسیته به موتورهای الکتریکی رفته و مازاد آن در باتری ذخیره می‌شود. مبنای ذخیره‌سازی هوای فشرده در این سیستم استفاده از فشار اعماق آب با به‌کار بردن مخازن هوای انعطاف پذیر است. نمونه‌هایی از طرح‌های این سیستم در شکل (۹) مشخص شده است.



شکل ۹. نمونه‌هایی از طراحی‌های پیشنهادی برای سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده زیرآبی چندسطحی [۵۵]

1. Transformer

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-30]

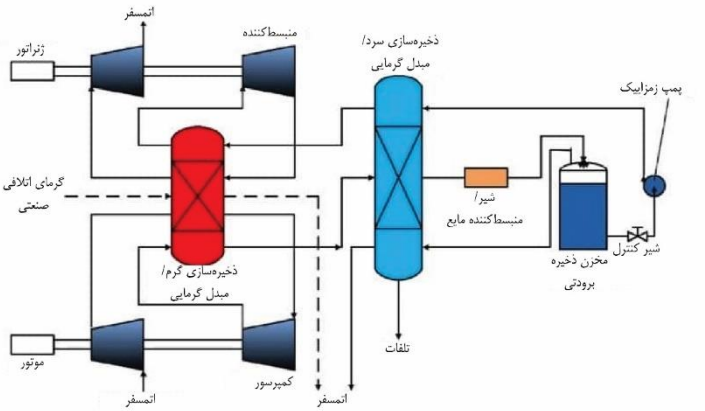
در این سیستم دو نوع انباشتگر وجود دارد، فشارپایین و فشاربالا. انباشتگر فشارپایین در عمق کم و انباشتگر فشاربالا در عمق زیاد قرار دارد. در واقع با بهره‌گیری از فشار هیدرواستاتیکی آب می‌توان بدون صرف هزینه زیاد به فشارهای بالای ذخیره‌سازی هوا دست یافت. پژوهش‌های انجام شده در زمینه این کیسه‌های انرژی بیانگر اثربخشی این سیستم است [۴۶].

چیونگ[1] و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۴ پارامترهای طراحی ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده زیرآبی چندسطحی به‌منظور مشخص کردن تأثیر بر روی بازده رفت و برگشتی[2] و تخریب اگزرژی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که حساسیت‌های مهم سیستم، قطر لوله، بازده کمپرسور و منبسط‌کننده و عمق ذخیره‌سازی هوا است. تراکم و انبساط هوا بیش‌ترین سهم را در تخریب اگزرژی برای تمام موارد پارامترهای مورد مطالعه داشته است [۱۳]. بنابراین افزایش بازده کمپرسور و منبسط‌کننده بیش‌ترین بهبود عملکرد را برای ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده زیرآبی چندسطحی درپی خواهد داشت. همچنین چیونگ و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۶ در پژوهشی به بهینه‌سازی سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده زیرآبی چندسطحی با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک پرداختند.

در سال ۲۰۱۶ گو[3] و همکاران [۲۴] یک سیستم نوین ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده فوق بحرانی (SC-CAES[4]) برای حل مشکلات سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده معمولی ارائه کردند. نمای شماتیک این سیستم در شکل (۱۰) نشان داده شده است. این سیستم وابستگی به سوخت فسیلی و غار ذخیره‌سازی بزرگ گاز ندارد و دارای مزایای بازده بالا به‌وسیله به‌کارگیری خواص ویژه هوای فوق بحرانی است. اجزا آن شامل یک کمپرسور چند مرحله‌ای با اینترکولر، یک منبسط‌کننده چند مرحله‌ای با گرم‌کن[5]، یک ذخیره ساز سرما/ مبدل گرمایی، یک ذخیره کننده گرما/ مبدل گرمایی، یک شیر یا یک منبسط‌کننده مایع، یک پمپ زمزاییک[6]، یک مخزن ذخیره‌سازی سرمازا، یک موتور، یک ژنراتور و دیگر تجهیزات مربوطه است.

1. Cheung
2. Round Trip Efficiency
3. Guo
4. Super Critical CAES
5. Reheaters
6. Cryopump

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-30]



شکل ۱۰. نمای شماتیک سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده فوق بحرانی [۲۴]

پمپ زمزاییک (سرمازا) یک پمپ خلاء است که با متراکم[1] کردن گازها و بخارات بر روی یک سطح سرد آنها را به دام می‌اندازد، اما فقط بر روی برخی گازها مؤثر است. نحوه عملکرد این سیستم بدین صورت است که در فرایند ذخیره‌سازی انرژی، هوای اتمسفر به‌وسیله کمپرسور به حالت فوق بحرانی فشرده می‌شود. در همین حال، گرمای فشرده‌سازی بازیابی شده و در ذخیره‌کننده گرما/ مبدل گرمایی، ذخیره می‌گردد. هوای فوق بحرانی به‌وسیله انرژی سرد ذخیره‌شده در ذخیره‌ساز سرما/ مبدل گرمایی سرد شده و به حالت مایع در می‌آید و سپس با استفاده از یک شیر یا منبسط‌کننده مایع تا فشار اتمسفر انبساط می‌یابد. هوای مایع خروجی از منبسط‌کننده مایع یا شیر در مخزن ذخیره‌سازی سرمازا ذخیره شده و هوای گازی به ذخیره‌ساز سرما/مبدل گرمایی، به‌منظور آزادسازی انرژی سرد، می‌رود. در فرایند آزادسازی انرژی، هوای مایع بعد از آن که توسط پمپ زمزاییک به فشار فوق بحرانی رسید به ذخیره‌ساز سرما/ مبدل گرمایی رفته و تا دمای اتمسفر گرم می‌شود. هوا با فشار بالا از ذخیره‌ساز سرما/ مبدل گرمایی خارج شده و وارد ذخیره‌کننده گرما/ مبدل گرمایی می‌شود، هوا گرمای ذخیره‌سازی (یا گرمای تلف شده صنعتی) را جذب کرده و سپس به‌وسیله منبسط‌کننده‌ها انبساط یافته و تولید کار می‌کند.

1. Condense

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-30]

همچنین پژوهش‌های جدید و متعددی در زمینه ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده مبتنی بر هوای مایع انجام شده است که از این میان می‌توان به تحلیل ترمودینامیکی یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای مایع توسط کانتاراج[1] و همکاران [۲۷] در سال ۲۰۱۵ و گویزی[2] و همکاران [۲۲] در همان سال اشاره کرد. هردوی این پژوهش‌ها پتانسیل بالای این سیستم ذخیره‌سازی انرژی را تأیید می‌کنند. تحقیق‌هایی نیز در این زمینه در سال ۲۰۱۸ انجام شده که می‌توان بررسی عملکرد این سیستم با استفاده از بستر آکنده توسط پنگ[3] و همکاران [۴۵]، ارزیابی امکان‌پذیری اقتصادی آن در انگلستان توسط زی[4] و همکاران [۵۸] و تحلیل ترمودینامیکی این سیستم به‌همراه چرخه ذخیره‌سازی انرژی پمپ حرارتی توسط فررز–آنتونیوس و همکاران [۱۹] را مورد ارزیابی قرار داد. نتایج هرسه پژوهش از کاربردی بودن مایع‌سازی هوا به‌منظور ذخیره‌سازی انرژی حکایت دارد. این سیستم نیازی به مخزن ذخیره‌سازی تحت فشار ندارد، تقریبا می‌تواند در هر نقطه‌ای واقع شود و دارای چگالی حجمی اگزرژی نسبتا بزرگی (۱۸ بار بزرگ‌تر از ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده معمولی [۲۴]) در فشار اتمسفر است که همگی از مزایای این سیستم است اما با این حال بازده رفت و برگشتی پایین‌تری نسبت به سایر فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده دارد (حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد [۲۲, ۲۴, ۲۷]).

ام. ونگ[5] و همکاران در دو مقاله جداگانه [۵۲, ۵۳] در سال ۲۰۱۵ سیستم نوینی از ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بر پایه دی‌اکسیدکربن مایع ارائه کردند و ساختارهای متفاوتی از آن را مورد تحلیل و بررسی قرار دادند. استفاده از دی‌اکسیدکربن مایع به‌جای هوای مایع دارای مزایایی نظیر دمای بحرانی بالا بوده و همچنین بیش‌تر مستعد تبدیل شدن به مایع است. علاوه‌بر این، سیستم دی‌اکسیدکربن مایع ایمنی بالاتری داشته و انعطاف پذیرتر است [۵۲]. از دیگر مزایای این سیستم این است که مانند هوای مایع دچار افت شدید دما (۸۱ درجه کلوین [۲۴]) نمی‌شود. دمای پایین سبب تردشدن و یا حتی شکسته شدن مواد متداول می‌شود.

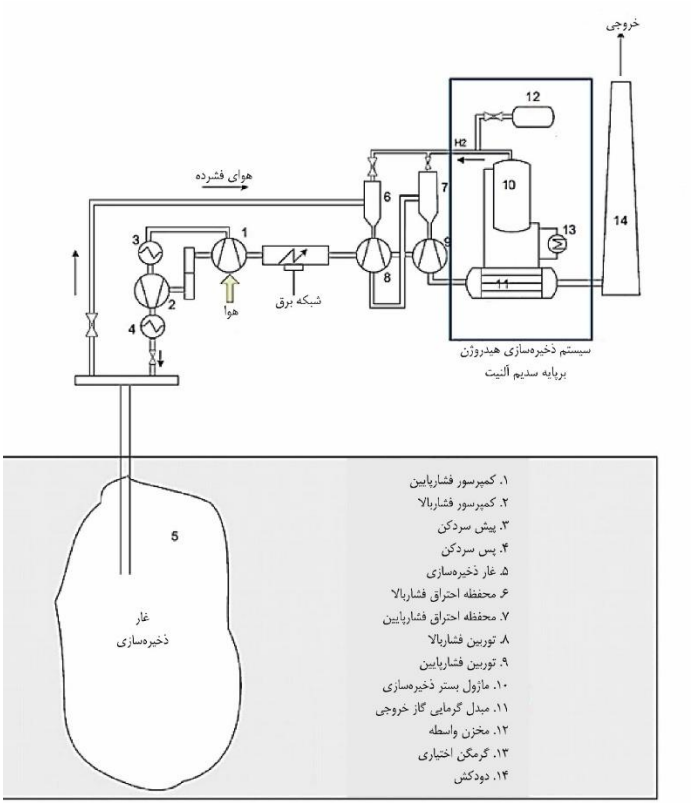
1. Kantharaj
2. Guizzi
3. Peng
4. Xie
5. M. Wang

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-30]

در سال ۲۰۱۲ خایتان و راجو[1] [۲۸] یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده ترکیبی با استفاده از هیدروژن مورد بررسی قرار دادند. استفاده از هیدروژن به‌عنوان سوخت برای توربین گاز در ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده انتشار کربن را حذف کرده که منجر به محیط زیست پاک‌تر خواهد شد. می‌توان تولید هیدروژن را با استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر همچون انرژی بادی و خورشیدی انجام داد ولی ذخیره سازی هیدروژن یک مانع برای چنین سیستمی است. در این پژوهش یک بستر ظرفیت بالای سدیم آلنیت فلزی هیدروکسید برای ذخیره سازی هیدروژن استفاده شده است. دینامیک ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده مورد استفاده بر پایه عملکرد نیروگاه توربین گاز با سوخت هیدروژن به‌همراه دینامیک تخلیه بستر هیدروکسید فلزی ارائه شده است. بنابراین بخشی از گرما توسط گازهای دودکش استخراج شده است. نمای شماتیک این سیستم در شکل (۱۱) قابل مشاهده است. به منظور حفظ مزیت پاک بودن سیستم لازم است که محفظه احتراق از هیدروژن به جای سوخت های متدول مانند گاز طبیعی استفاده کند.

1. Khaitan and Raju

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-30]



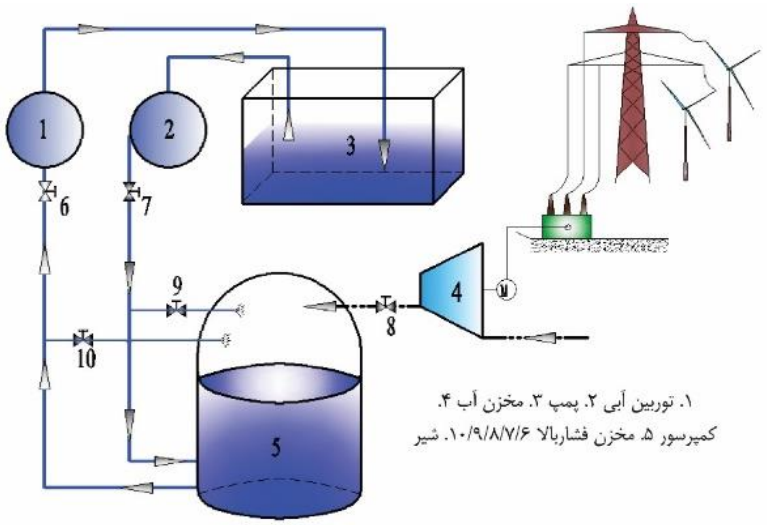
شکل ۱۱. نمای شماتیک سیستم ترکیبی ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده و ذخیره‌سازی هیدروژن [۲۸]

از میان تمام فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی توسعه یافته، تنها دو فناوری برای ذخیره‌سازی انرژی به‌صورت حجیم مناسب است: تلمبه ذخیره‌ای و ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده، همچنین سیستم تلمبه ذخیره‌ای و ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده دارای بالاترین ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی، چه از نظر میزان انرژی ذخیره‌شده و چه از نظر ساعات ذخیره‌سازی، در میان سایر روش‌های ذخیره‌سازی انرژی هستند [۶, ۷, ۱۴]. هردو فناوری بیان شده اشکالاتی دارند؛ آنها نیازمند شرایط خاص سایت احداث هستند و همچنین ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده متداول نیازمند احتراق گاز طبیعی است. اچ. ونگ[1] و همکاران

1. H. Wang

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-30]

[۵۱] در سال ۲۰۱۳ و یائو[1] و همکاران [۶۱] در سال ۲۰۱۴ سیستم نوین ترکیبی برپایه دو فناوری تلمبه ذخیره‌ای و ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده ارائه کردند که سیستم ترکیبی تلمبه ذخیره‌ای - ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده (PHCAES[2]) نامیده می‌شود، شکل (۱۲).



شکل ۱۲. نمای شماتیک سیستم ترکیبی تلمبه ذخیره‌ای – ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده [۵۱]

این سیستم از دو سیال استفاده می‌کند، یک سیال تراکم‌پذیر و یک سیال تراکم‌ناپذیر. رایج‌ترین این سیالات هوا و آب هستند. انرژی با پمپاژ سیال تراکم‌پذیر در مخزن بسته ذخیره می‌شود. بر خلاف سیستم متداول ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده، سیال تراکم‌پذیر بر روی توربین انبساط نمی‌یابد بلکه فشار لازم را به سیال تراکم‌ناپذیر اعمال می‌کند تا این سیال توربین آبی را به حرکت درآورد.

نقش کمپرسور در این سیستم ایجاد یک فشار اولیه است و افزایش فشار تا میزان هدف به‌وسیله پمپاژ آب با پمپ به مخزن ایجاد می‌شود. تفاوت سیستم این دو پژوهش در استفاده از یک کمپرسور اضافی و یک مخزن هوای فشاربالا برای ثابت نگه داشتن فشار هوای مخزن در طول فرآیند تخلیه در سیستم ارائه‌شده توسط یائو

1. Yao
2. Pumped Hydroelectric Compressed Air Energy Storage

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-30]

و همکاران [۶۱] است. بنابر مطالعات یائو و همکاران [۶۲] در سال ۲۰۱۶ این سیستم مجموعه‌ای از بهترین خصوصیات نسبت داده شده به سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده و تلمبه‌ذخیره‌ای را داراست و به مشخصه برای محل احداث و احتراق گاز طبیعی نیازی ندارد و همچنین دارای پتانسیل برای بهره‌وری بالاتر است. علاوه‌بر این، سیستم ترکیبی تلمبه ذخیره‌ای - ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده دارای مزیت اقتصادی بهتری نسبت به سایر سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی است.

استفاده از سیستم‌های ترکیبی تلمبه ذخیره‌ای و ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده به‌صورت فراساحلی[1] در پژوهش‌های اخیر بررسی شده است. به این نوع سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، انرژی شناور (BE^2[2]) گفته می‌شود. کلار[3] و همکاران [۳۲] در سال ۲۰۱۸ نوعی از این سیستم را ارائه کردند که از سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده برای افزایش هد سیستم تلمبه‌ذخیره‌ای شناور استفاده می‌کند و در واقع نوعی سیستم ترکیبی تلمبه ذخیره‌ای - ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده است. سیستم ارائه‌شده در این پژوهش، بر خلاف انواع پیشین سیستم انرژی شناور دارای بدنه صلب نیست و از منسوج[4] برای ساخت آن استفاده شده است. نمای شماتیک این سیستم در شکل ۱۳ قابل مشاهده است.

شکل (۱۳) برشی از سیستم انرژی شناور نوین است. این سیستم شامل دو مخزن جداگانه به شکل مکعب است که فرآیند پمپاژ آب به مخزن A و تخلیه آن توسط توربین آبی به‌وسیله لوله موجود در مرکز مخزن B اتفاق می‌افتد. در فرآیند ذخیره‌سازی انرژی، آب دریا توسط پمپ به مخزن A پمپاژ می‌شود. درطی این فرآیند، هوا نیز توسط لوله متصل کننده بین مخزن A و B در مخزن B تا فشار ۹/۸۴ بار فشرده می‌شود، سپس در فرآیند تخلیه آب موجود در مخزن A به دریا تخلیه شده و توربین آبی را به حرکت درمی‌آورد. طی این فرآیند، فشار مخزن A تا ۲/۴۸ بار کاهش می‌یابد. ظرفیت این سیستم ۵ مگاوات ساعت درنظر گرفته شده و کلیه فرآیندها به‌صورت هم‌حجم و هم‌دما فرض شده است. نتایج پژوهش نشان داد که این سیستم در مقایسه با سیستم‌های انرژی شناور قبلی که از ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده استفاده نمی‌کنند، کارایی بالاتری دارد و به‌کارگیری منسوج در این سیستم نوید بخش است.

1. Offshore
2. Buoyant Energy
3. Klar
4. Fabric

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-30]

با استراتژی صحیح کنترلی نیروگاه‌های بادی فراساحلی می‌توان بارهای نامتوازن را کاهش داد، این امر نیازمند استفاده از سیستم ذخیره‌سازی انرژی است که می‌تواند از هدر رفت بخش زیادی از انرژی نیز جلوگیری کند [۵۴]. در سال ۲۰۱۸ سنت[1] و همکاران [۴۷] یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده نوین ارائه دادند که با یک توربین بادی فراساحلی شناور (FOWT[2]) ادغام شده است. این سیستم ذخیره‌سازی انرژی نیز در واقع یک سیستم ترکیبی تلمبه ذخیره‌ای - ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده است با این تفاوت که برخلاف سیستم پژوهش کلار و همکاران [۳۲] به‌صورت شناور نیست و در کف اقیانوس نصب می‌شود. این سیستم شامل یک مخزن صلب و پمپ/ موتور هیدرولیکی است که به موتور/ ژنراتور متصل شده است و کل سیستم در زیر توربین بادی شناور قرار دارد. ظرفیت توربین بادی مورد استفاده در این سیستم ۵ مگاوات درنظر گرفته شده که طی این پژوهش ثابت شد از نظر فنی امکان ذخیره‌سازی فراساحلی انرژی به‌صورت کوتاه مدت وجود دارد. همچنین این پژوهش ثابت کرد اگرچه سیستم تلمبه ذخیره‌ای - ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده سبب افزایش وزن سازه می‌شود اما پایداری آن در اقیانوس را افزایش می‌دهد.

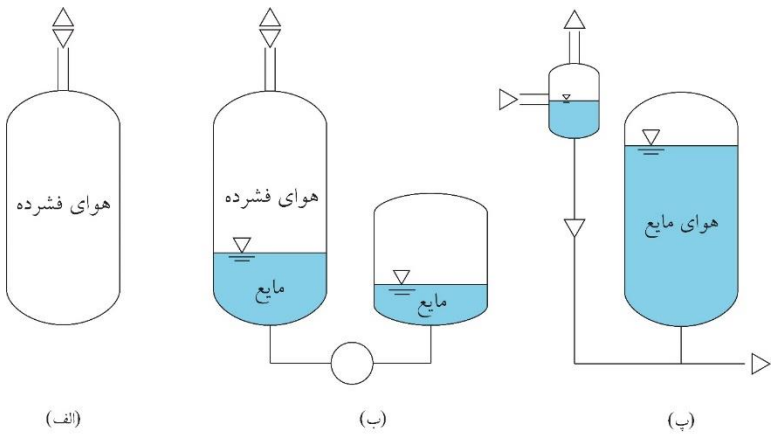
در سال ۲۰۱۸ میسوناو[3] و همکاران [۳۶] یک سیستم تلمبه ذخیره‌ای - ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده هم‌دما با یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده متداول مقایسه کردند. هدف اصلی این پژوهش دست‌یابی به مدیریت بهینه انرژی این سیستم است. طراحی این سیستم به‌منظور ذخیره‌سازی انرژی شبکه یا سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر است. مخازن ذخیره‌سازی هوای فشرده به‌صورت صلب در کف دریاچه یا دریا قرار می‌گیرند، هوا در مرحله ذخیره‌سازی به‌وسیله پمپ آب فشرده شده و در مرحله تخلیه، هوای فشرده شده آب را بر روی توربین آبی می‌راند تا انرژی استحصال شود. نتایج شبیه‌سازی برای یک سیستم ۳ مگاواتی نشان داد تقسیم‌بندی توان از طریق قابلیت اطمینان تحمل خطا[4]، اثربخش است [۳۶].

1. Sant
2. Floating offshore wind turbine
3. Maisonnave
4. Fault tolerance

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-30]

۵. بحث و نتیجه‌گیری

هرکدام از سیستم‌های نوین و ترکیبی مطرح‌شده دارای ویژگی‌های خاصی هستند اما می‌توان از نظر نحوه ذخیره‌شدن انرژی پتانسیل مکانیکی آنها را به سه دسته‌ی هم‌حجم، هم‌فشار و سردسازی (مایع‌سازی) تقسیم کرد، طرح مفهومی این سه دسته در شکل ۱۴ مشخص شده است.



شکل ۱۴. انواع مختلف ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بر اساس نوع ذخیره‌سازی هوا

مطابق شکل (۱۴) ذخیره‌سازی هوا در مخازن صلب از نوع هم‌حجم است (الف) در چنین سیستم‌هایی، که غالب پژوهش‌ها از این نوع هستند، فشار در فرآیند تخلیه کاهش می‌یابد. این امر موجب ناپایداری فرآیند استحصال انرژی می‌شود. نوع دوم یا (ب) از ارتباط هوای فشرده (سیال تراکم‌پذیر) با آب (سیال تراکم‌ناپذیر) حکایت دارد. به‌طور متداول، از این روش برای ثابت نگه‌داشتن فشار هوا در فرآیند تخلیه استفاده می‌شود. در پژوهش‌های پیشین از یک منبع آب طبیعی در سطح (مانند دریاچه) و ارتباط آن با یک مخزن زیرزمینی در عمق زیاد استفاده شده است. در این روش به‌وسیله فشار هیدرواستاتیک آب، فشار مخزن هوا در طی فرآیند تخلیه ثابت می‌ماند، اما در پژوهش‌های نوین از یک پمپ/ توربین برای ارتباط بین مخازن هم سطح و ثابت نگه‌داشتن فشار هوا استفاده شده است، لذا سطح بالای مخزن دوم می‌تواند هوای فشرده باشد یا خیر. علاوه‌بر این، با استفاده از اصل ارتباط دو سیال تراکم‌پذیر و تراکم‌ناپذیر سیستم‌های نوینی مطرح شده که به‌جای استفاده از فشار هوا در یک توربین گازی، از فشار هوا برای

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-30]

راندن یک توربین آبی در فرآیند تخلیه استفاده می‌کند که سیستم تلمبه ذخیره‌ای - ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده نامیده می‌شود. از مزایای سیستم تلمبه ذخیره‌ای - ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده، چگالی انرژی بالا، عدم نیاز به مشخصات خاص سایت محل احداث، عدم مصرف سوخت فسیلی، هزینه پایین‌تر و کنترل بهتر گرما و تولید انرژی سیستم است.

اما نوع سوم یا (پ) که در شکل (۱۴) نشان داده شده بر اساس فناوری ذخیره‌سازی انرژی هوای مایع (LAES[1]) کار می‌کند. انواع سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای مایع را می‌توان به سه دسته بی‌دررو، معمولی (دیاباتیک[2]) و هم‌دما تقسیسم کرد، درست مانند انواع سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده. مایع‌سازی گاز یا هوا می‌تواند با سردسازی یا فشرده‌سازی صورت گیرد. از مزایای این سیستم می‌توان به عدم نیاز به خصوصیات خاص محل نصب، هزینه سرمایه‌گذاری پایین و محل نصب کوچک به‌علت چگالی انرژی بالای آن اشاره کرد.

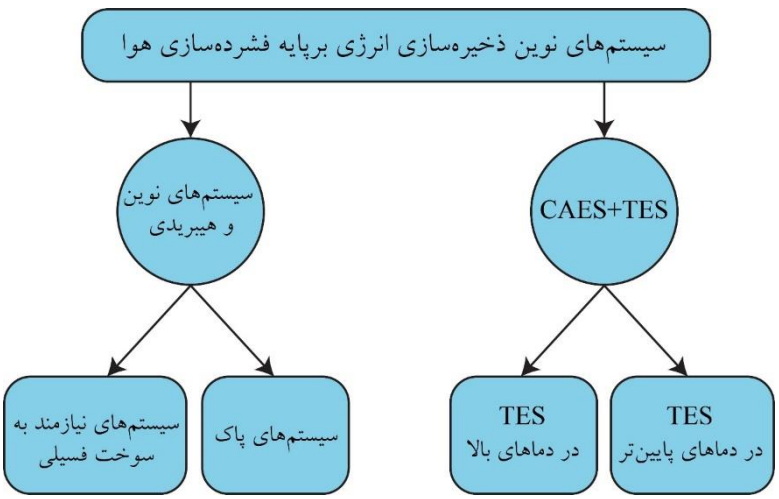
در مقاله حاضر انواع متفاوتی از سیستم‌های نوین ذخیره‌سازی انرژی مورد بررسی قرار گرفت. وجه مشترک همه این سیستم‌ها استفاده از هوای فشرده، یا به بیان بهتر سیال تراکم‌پذیر، برای ذخیره‌سازی انرژی به‌صورت پتانسیل مکانیکی است. پیش از این، انواع سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی از نظر فنی و کاربرد مورد بررسی قرار گرفته، اما در این مقاله سعی شده جدیدترین سیستم‌ها و راه‌حل‌های نوین برای کاربردی کردن سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده معرفی شود و مورد بررسی قرار گیرد. در این میان سیستم‌هایی وجود دارند که روی مرز فناوری حرکت می‌کنند و ساخت نمونه اولیه آن‌ها، در مقیاس‌های آزمایشی، حتی در زمان کنونی امکان‌پذیر است. طبق مطالعات متعدد انجام شده، این سیستم‌ها از نظر اقتصادی نیز مقرون به‌صرفه هستند.

با وجود امکان‌پذیر بودن عملیاتی شدن سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده با ذخیره‌سازی حرارتی، از آن‌جا که این سیستم‌ها نیازمند سرمایه‌گذاری بالایی هستند رشد و توسعه آنها دشوارتر به‌نظر می‌رسد. در همین حال، لزوم مطالعات بیش‌تر برای افزایش کارایی و برطرف نمودن موانع تکنولوژیکی و اقتصادی این سیستم‌ها بیش از پیش وجود دارد. در این میان سیستم‌های ترکیبی می‌توانند راه‌گشا

1. Liquid Air Energy Storage
2. Diabatic

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-30]

باشند؛ تحقیقات انجام‌شده در زمینه‌ی سیستم‌های انرژی ترکیبی بر پایه ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده اغلب فراتر از مرزهای تکنولوژیکی موجود هستند و می‌توانند در چشم‌انداز ذخیره‌سازی انرژی تأثیرگذار باشند. به هرحال، برای رشد و توسعه فناوری سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده علاوه‌بر تحقیقات در زمینه روش‌های ذخیره‌سازی و استحصال انرژی و پیکربندی‌های جدید، لازم است تا تحقیقات گسترده‌ای برای برطرف کردن موانع فناوری‌ها صورت گیرد. تحقیقات در زمینه تجهیزات مورد نیاز در این سیستم‌ها مانند کمپرسورها، توربین‌ها، مخازن ذخیره‌سازی فشاربالا، پمپ‌ها، نازل‌ها و همچنین سیالات مورد استفاده در آنها و رابطه بین سیال و تجهیزات، ضروری است و می‌تواند بسیاری از موانع را برطرف کند. به‌طور کلی سیستم‌های مورد بررسی در مقاله حاضر به‌صورت زیر است، شکل (۱۵).



شکل ۱۵. دسته‌بندی کلی سیستم‌های مورد بررسی در مقاله حاضر

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-30]

منابع

[۱] جنگ‌آور، حسین؛ نوراللهی، یونس و حسین یوسفی (۱۳۹۸). "بررسی امکان‌پذیری تحقق اهداف کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از طریق تولید برق از منابع تجدیدپذیر در ایران." دو فصلنامه انرژی‌های تجدیدپذیر و نو، ۶(۲)، صص ۷۰-۶۲.

[۲] خزعلی، مجید و عبدالرزاق کعبی نژادیان (۱۳۹۹). "مطالعه‌ای بر سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده." مجله علمی ترویجی انجمن مهندسان مکانیک ایران، ۲۹(۳)، صص ۵۹-۴۷.

[۳] خزعلی، مجید؛ آذرسینا، فرهود و علیرضا حاج ملاعلی کنی (۱۳۹۸). "بررسی سیستم‌های نوین تولیدچندگانه برپایه ذخیره‌سازی هوای فشرده." دو فصلنامه انرژی‌های تجدیدپذیر و نو، ۶(۲)، صص۱۰۴-۹۴.

[۴] سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق ایران (ساتبا).

[۵] صادقی، سیدکمال؛ سجودی، سکینه و فهیمه احمدزاده دلجوان (۱۳۹۶). "تأثیر انرژی‌های تجدیدپذیر بر رشد اقتصادی و کیفیت محیطزیست ایران." فصلنامه پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی، ۳(۶)، صص ۲۰۲-۱۷۱.

[6] Akinyele, D. O. and R. K. Rayudu (2014). “Review of energy storage technologies for sustainable power networks”. Sustainable Energy Technologies and Assessments, No. 8, pp. 74-91.

[7] Al-hadhrami, L. M. and M. Alam (2015). “Pumped hydro energy storage system : A technological review”. No. 44, pp. 586-598.

[8] Arabkoohsar, A. et al. (2015). “A new design for natural gas pressure reduction points by employing aturbo expander and a solar heating set”. Renewable Energy. No. 81, pp. 239-250.

[9] Arabkoohsar, A. et al. (2016). “Operation analysis of a photovoltaic plant integrated with a compressed air energy storage system and a city gate station”. Energy, No. 98, pp. 78-91.

[10] Argyrou, M. C. et al. (2018). “Energy storage for electricity generation and related processes: Technologies appraisal and grid scale applications”. Renewable and Sustainable Energy Reviews. No. 94, pp. 804-821.

[11] Barbour, E. et al. (2015). “Adiabatic Compressed Air Energy Storage with packed bed thermal energy storage”. Applied Energy. No.155, pp. 804-815.

[12] Cheung, B. C. et al. (2014). “Multi-objective optimization of an underwater compressed air energy storage system using genetic algorithm”. Energy. No.74, pp. 396-404.

[13] Cheung, B. C. et al. (2014). “Parameters affecting scalable underwater compressed air energy storage”. Applied Energy. No. 134, pp. 239-247.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-30]

[14] Das, C. K. et al. (2018). "Overview of energy storage systems in distribution networks: Placement, sizing, operation, and power quality". Renewable and Sustainable Energy Reviews. No. 91, pp. 1205-1230.
[15] Dehdashti, E. (2019). "The Energy Bank-Roadmap for the 21st Century Green power grid". Electricity Journal. No. 32, pp. 14-20.
[16] Denholm, P. and T. Mai (2019). "Timescales of energy storage needed for reducing renewable energy curtailment". Renewable Energy. No. 130, pp.388-399.
[17] Dey, B. et al. (2018). "Optimal Sizing of Distributed Energy Resources in a Microgrid System with Highly Penetrated Renewables". Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering. No. 43, pp.527-540.
[18] Diao, A. et al. (2018). "Development and application of screw expander in natural gas pressure energy recovery at city gas station". Applied Thermal Engineering. No. 142, pp. 665-673.
[19] Farres-Antunez, P. et al. (2018). "Thermodynamic analysis and optimisation of a combined liquid air and pumped thermal energy storage cycle". Journal of Energy Storage. No. 18, pp. 90-102.
[20] Ghaebi, H. et al. (2018). "Energy, exergy, economic and environmental (4E) analysis of using city gate station (CGS) heater waste for power and hydrogen production: A comparative study". International Journal of Hydrogen Energy. No. 43, pp. 1855-1874.
[21] GooglePatents. Available: https://patents.google.com/?q=Compressed+air&q=energy&q=storage&before=priority:20190707&after=priority:20090101
[22] Guizzi, G. L. et al. (2015). "Thermodynamic analysis of a liquid air energy storage system". Energy. No. 93, pp. 1639-1647.
[23] Guo, C. et al. (2019). "Comprehensive exergy analysis of the dynamic process of compressed air energy storage system with low-temperature thermal energy storage". Applied Thermal Engineering. No. 147, pp. 684-693.
[24] Guo, H. et al. (2016). "Thermodynamic characteristics of a novel supercritical compressed air energy storage system". Energy Conversion and Management. No. 115, pp. 167-177.
[25] Hartmann, N. et al. (2012). "Simulation and analysis of different adiabatic Compressed Air Energy Storage plant configurations". Applied Energy. No.93, pp. 541-548.
[26] Jubeh, N. M. and Y. S. H. Najjar (2012). "Green solution for power generation by adoption of adiabatic CAES system". Applied Thermal Engineering. No. 44, pp. 85-89.
[27] Kantharaj, B. et al. (2015). "Thermodynamic analysis of a hybrid energy storage system based on compressed air and liquid air". Sustainable Energy Technologies and Assessments. No. 11, pp. 159-164.
[28] Khaitan, S. K. and M. Raju (2012). "Dynamics of hydrogen powered CAES based gas turbine plant using sodium alanate storage system". International Journal of Hydrogen Energy. No. 37, pp. 18904-18914.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-30]

[29] Kim, J. et al. (2018). "Storage system for distributed-energy generation using liquid air combined with liquefied natural gas". Applied Energy. No. 212, pp.1417-1432.
[30] Kim, Y.-M. et al. (2012). "Potential and Evolution of Compressed Air Energy Storage: Energy and Exergy Analyses". Entropy. No.14, pp. 1501-1521.
[31] Kim, Y. M. et al. (2011). "Operating characteristics of constant-pressure compressed air energy storage (CAES) system combined with pumped hydro storage based on energy and exergy analysis". Energy. No. 36, pp. 6220-6233.
[32] Klar, R. et al. (2018). "A floating energy storage system based on fabric". Ocean Engineering. No. 165, pp. 328-335.
[33] Letcher, T. M. (2018). "Storing electrical energy," in Managing Global WarmingCambridge, Massachusetts: Academic Press. pp. 365-377.
[34] Li, Y. et al. (2018). "The performance investigation of increasing share of photovoltaic generation in the public grid with pump hydro storage dispatch system, a case study in Japan". Energy. No. 164, pp. 811-821.
[35] Luo, X. et al. (2016). "Modelling study, efficiency analysis and optimisation of large-scale Adiabatic Compressed Air Energy Storage systems with low-temperature thermal storage". Applied Energy. No. 162, pp. 589-600.
[36] Maisonnave, O. et al. (2018). "Optimal energy management of an underwater compressed air energy storage station using pumping systems". Energy Conversion and Management. No. 165, pp. 771-782.
[37] McTigue, J. D. and A. J. White (2018). "A comparison of radial-flow and axial-flow packed beds for thermal energy storage". Applied Energy, No. 227, pp. 533-541.
[38] Mehrjerdi, H. (2019). "Simultaneous load leveling and voltage profile improvement in distribution networks by optimal battery storage planning". Energy. No. 181, pp. 916-926.
[39] Meng, H. et al. (2019). "Process design, operation and economic evaluation of compressed air energy storage (CAES) for wind power through modelling and simulation". Renewable Energy. No. 136, pp. 923-936.
[40] Minutillo, M. et al. (2015). "Assessment of design and operating parameters for a small compressed air energy storage system integrated with a stand-alone renewable power plant". Journal of Energy Storage. No. 4, pp. 135-144.
[41] Mohammad Satkin, Y. N., Majid Abbaspour, Hossein Yousefi (2014). "Multi criteria site selection model for wind-compressed air energy storage power plants in Iran". Renewable and Sustainable Energy Reviews. No. 32, pp. 579-590.
[42] Park, H. and R. Baldick (2017). "Integration of compressed air energy storage systems co-located with wind resources in the ERCOT transmission system". International Journal of Electrical Power and Energy Systems. No. 90, pp.181-189.
[43] Pazheri, F. R. et al. (2019). "Power Station Scheduling with Energy Storage". Journal of The Institution of Engineers (India): Series B 100, pp. 77-83.
[44] Pei, P. et al. (2015). "Thermodynamic impact of aquifer permeability on the performance of a compressed air energy storage plant". Energy Conversion and Management. No. 97, pp. 340-350.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-30]

[45] Peng, H. et al. (2018). "A study on performance of a liquid air energy storage system with packed bed units". Applied Energy. No. 211, pp. 126-135.
[46] Pimm, A. J. et al. (2014). "Design and testing of Energy Bags for underwater compressed air energy storage". Energy. No. 66, pp. 496-508.
[47] Sant, T. et al. (2018). "Evaluating a new concept to integrate compressed air energy storage in spar-type floating offshore wind turbine structures". Ocean Engineering. No. 166, pp. 232-241.
[48] Sufyan, M. et al. (2019). "Sizing and applications of battery energy storage technologies in smart grid system: A review". Journal of Renewable and Sustainable Energy. No. 11, pp. 014105.
[49] Tallini, A. et al. (2015). "Applications of Micro-CAES Systems: Energy and Economic Analysis". Energy Procedia. No. 82, pp. 797-804.
[50] Tola, V. et al. (2017). "Performance assessment of Adiabatic Compressed Air Energy Storage (A-CAES) power plants integrated with packed-bed thermocline storage systems". Energy Conversion and Management. No. 151, pp. 343-356.
[51] Wang, H. et al. (2013). "A Novel Pumped Hydro Combined with Compressed Air Energy Storage System". Energies. No. 6, pp. 1554-1567.
[52] Wang, M. et al. (2015). "Performance analysis of a novel energy storage system based on liquid carbon dioxide". Applied Thermal Engineering. No.91, pp. 812-823.
[53] Wang, M. et al. (2015). "Performance analysis of energy storage system based on liquid carbon dioxide with different configurations". Energy. No. 93, pp.1931-1942.
[54] Wang, X. et al. (2018). "Optimization and control of offshore wind farms with energy storage systems". Energy Conversion and Management. No. 173, pp. 426-437.
[55] Wang, Z. et al. (2016). "Design and thermodynamic analysis of a multi-level underwater compressed air energy storage system". Journal of Energy Storage No.5, pp. 203-211.
[56] Wolf, D. and M. Budt (2014). "LTA-CAES – A low-temperature approach to Adiabatic Compressed Air Energy Storage". Applied Energy. No. 125, pp.158-164.
[57] Wong, L. A. et al. (2019). "Review on the optimal placement, sizing and control of an energy storage system in the distribution network". Journal of Energy Storage. No. 21, pp. 489-504.
[58] Xie, C. et al. (2018). "An economic feasibility assessment of decoupled energy storage in the UK: With liquid air energy storage as a case study". Applied Energy. No. 225, pp. 244-257.
[59] Xue, H. and A. White (2018). "A comparative study of liquid, solid and hybrid adiabatic compressed air energy storage systems". Journal of Energy Storage. No. 18, pp. 349-359.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-30]

[60] Yang, K. et al. (2014). “Theoretical evaluation on the impact of heat exchanger in Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage system”. Energy Conversion and Management. No. 86, pp. 1031-1044.
[61] Yao, E. et al. (2014). “A Novel Constant-Pressure Pumped Hydro Combined with Compressed Air Energy Storage System”. Energies. No. 8, pp. 154-171.
[62] Yao, E. et al. (2016). “A Novel Pumped Hydro Combined with Compressed Air Energy,” in Storing Energy, vol. 6Amsterdam, Netherlands: Elsevier, pp.155-166.
[63] Zhang, T. et al. (2018). “Thermodynamic analysis of a novel hybrid liquid air energy storage system based on the utilization of LNG cold energy”. Energy. No. 155, pp. 641-650.
[64] Zhang, Y. et al. (2018). “A hybrid energy storage system with optimized operating strategy for mitigating wind power fluctuations”. Renewable Energy. No. 125, pp. 121-132.
[65] Zhang, Y. et al. (2013). “The thermodynamic effect of thermal energy storage on compressed air energy storage system”. Renewable Energy. No. 50, pp.227-235.
[66] Zhang, Y. et al. (2014). “Thermodynamic analysis of energy conversion and transfer in hybrid system consisting of wind turbine and advanced adiabatic compressed air energy storage”. Energy. No. 77, pp. 460-477.
[67] Zhang, Y. et al. (2013). “The thermodynamic effect of air storage chamber model on Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage System”. Renewable Energy. No. 57, pp. 469-478.
[68] Zhao, P. et al. (2014). “Design and thermodynamic analysis of a hybrid energy storage system based on A-CAES (adiabatic compressed air energy storage) and FESS (flywheel energy storage system) for wind power application”. Energy. No. 70, pp. 674-684.
[69] Zhao, P. et al. (2015). “Thermodynamic analysis of an integrated energy system based on compressed air energy storage (CAES) system and Kalina cycle”. Energy Conversion and Management. No. 98, pp. 161-172.
[70] Zhao, P. et al. (2015). “Thermodynamic analysis of a hybrid energy system based on CAES system and CO 2 transcritical power cycle with LNG cold energy utilization”. Applied Thermal Engineering. No. 91, pp. 718-730.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-30]