استفاده از گنبدهای نمکی ایران برای تولید بهینه الکتریسیته

محمدرضا مزدیان فرد[۱]، صادق ندیمی[۲]

تاریخ دریافت مقاله:
۸۸/۲/۲۰
تاریخ پذیرش مقاله:
۸۸/۴/۲۷

چکیده:

برای پیک‌سایی در مصرف انرژی در سه دهه گذشته، تکنولوژی نیروگاه‌های CAES (Compressed Air Energy Storage) بعنوان راه حلی مناسب در مدیریت مصرف پیک و همچنین ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر در شبکه برق مطرح و اجرا گشته‌اند. در این نیروگاه‌ها انرژی مازاد در اوقات غیر پیک بصورت هوای فشرده در مخازن عظیم زیرزمینی حفرات گنبدهای نمکی نگهداری شده و در اوقات پیک پس از گرم شدن در توربین گازی به احتراق در آمده و برق تولید می کنند و بدین وسیله $\frac{۲}{۳}$ انرژی توربین که صرف فشرده سازی می شود، برای تولید الکتریسیته بیشتر در دسترس قرار می‌گیرد. در این مقاله پس از معرفی نیروگاه‌های CAES و تحقیقات عملکردی ناشی از نزدیک به سه دهه تجربه نیروگاه‌های ۲۹۰ MW هانتروف آلمان و۱۱۰ MW آلاباما امریکا و نسل-های جدید این نیروگاه‌ها، به بررسی پتانسیل‌های موجود در ایران جهت بکارگیری گنبدهای نمکی در تولید برق بهینه پرداخته شده است.

کلمات کلیدی:
ذخیره‌سازی انرژی، گنبد نمکی ایران، نیروگاه CAES

۱) استادیار گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، Mozdianfard@kashnau.ac.ir
۲) کارشناس مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، Nadimi.sadegh@gmail.com

مقدمه

تهیه سوخت لازم برای نیرگاه‌های گازی ایران در زمان‌های پیک مصرف برق و گاز مشکلی است که در سال‌های اخیر مخصوصاً زمستان سال ۸۶ مناطق متعددی از کشور را دچار خاموشی، قطع گاز، برق و اختلال کرده‌است. این مسئله نمایانگر عدم موفقیت در برنامه ریزی و سرمایه گذاری صحیح و نیز هماهنگی لازم می‌باشد. چالش‌های تهیه و مصرف بهینه انرژی مختص ایران نیست بلکه معضلاتی است که جهان امروز به شدت با آن گریبان‌گیر می‌باشد. اما آیا واقعا ریشه مشکلات ایران در تهیه انرژی و برق مصرفی با بقیه کشور های جهان یکی است؟ بسیاری از صاحب نظران مدیریت نارسایی در برنامه ریزی کلان تولید و مصرف کشور را مهمترین علت این مشکلات می‌دانند نه عدم دانش فنی و سرمایه-گذاری لازم. روند تقاضای انرژی در سال‌های اخیر رشد فزاینده‌ای را نشان داده به گونه‌ای که در تراز نامه هیدروکربوری کشور در سال۱۳۸۵ پیش بینی شده که در سال ۱۴۰۴ این تقاضا به حدود ۱۹ میلیون بشکه نفت خام در روز برسد که چندین برابر بیش از ظرفیت فعلی تولید ما است. هر چند نمی‌توان به این داده‌ها استناد کرد ولی آنچه مسلم است این است که معضل مدیریت بار شبکه برق در رابطه با مصرف پیک انرژی با توجه به رشد و توسعه صنعتی ۵ تا ۷ درصد در سال در دهه ۸۰ در مقایسه با توانایی‌های تولید و سرمایه گذاری های لازم برای آن بحرانی‌تر می‌شود. مشکلات شرایط اضطراری اقتصاد کشور، تحریم‌های بین المللی، رشد جمعیت، عدم عزم ملی برای ایجاد سیستم های مالیاتی پایدار و در نتیجه تورم سنگین، هم این مشکلات را تشدید می‌نمایند. در این راستا لازم است که به جای پرداخت یارانه از محل درآمدهای فروش نفت برای هزینه‌های مصرف انرژی به دنبال پایه ریزی فرهنگ‌سازی مناسب مصرف بوده و روش‌های جدید و کم ضرر و حتی المقدور سازگار با طبیعت و محیط زیست ایران را مورد توجه قرار داد.

استفاده از حفرات ناشی از معدنکاری نمک به روش انحلال که از قرن ۱۹ در آمریکا وجود داشته و در ایران هم تقریباً بی سابقه‌اند، پیرو افزایش ناگهانی قیمت نفت و بحران انرژی در اوایل دهه ۷۰ میلادی، برای ذخایر استراتژیک سوخت، مورد توجه سیاستمداران امریکایی و آلمانی قرار گرفت، پیرو آن تحقیقات و اطلاعات وسیع و دامنه‌داری در این رابطه کسب شده است که منجر به طراحی نیروگاه‌های CAES (Compressed Air Energy Storage) – ذخایر انرژی هوای فشرده – گردیده است. متاسفانه ایران در طی این چند دهه نسبت به این تحولات علمی و صنعتی کم توجه بوده است. در این مقاله سعی شده است که پتانسیل استفاده از گنبدهای نمکی به عنوان مخازن سوخت و انرژی در قالب هوای فشرده که در طی سه دهه برای تولید بهینه الکتریسیته در نیروگاه‌های CAES مورد توجه قرار گرفته معرفی شوند تا شاید لزوم انجام تحقیقات مناسب در ساخت یک نیروگاه پایلوت CAES نسل دوم در دستور کار دولت قرار گیرد. ابتدا به معرفی گنبدهای نمکی پرداخته و سپس در رابطه با فعالیت‌های تحقیقاتی در دو نیروگاه پایلوت CAES در آلمان و امریکا توضیحاتی داده شده و در خاتمه با تطبیق نقشه‌های خطوط انتقال گاز، نیروگاه‌های گازی، پراکندگی گنبدهای نمکی و

مشخص نمودن مناطق پر مصرف انرژی برق پتانسیل‌های استفاده از گنبدهای نمکی در ایران برای تولید الکتریسیته معرفی گردیده است.

گنبدهای نمکی

نمک در طبیعت به دو صورت آبی و سنگی، در دریاها یا در لایه‌های زیر زمینی به صورت کانی هالیت متبلور تشکیل می شود. وجود نمک سنگی در اعماق زمین، تا بیش از ۱۱ کیلومتر زیر رسوبات گزارش شده است. در صورت وجود منافذی، اینگونه نمک به دلیل چگالی پایین به سمت بالا حرکت کرده و توده‌های قائم لوله‌ای شکل تشکیل می‌دهد که اصطلاحاً آنها را گنبدهای نمکی می‌نامند. در برخی موارد ضخامت سنگ نمک در لایه رسوبی تا بیش از ۱۰۰۰ متر دیده شده است. احتمالاً حرارت و فشار زیادی که در اعماق زمین روی رسوبات تبخیری تاثیر می‌گذارد، نمک را به صورت محلول جاری ساخته و به واسطه حرکت‌های تکتونیکی گازهای فراری مانند کلر تشکیل می‌شود که باعث سهولت صعود گنبد می‌گردد. هنگام رسیدن به سطح زمین مجدداً به فاز کریستالی برگشته و ضمن شکوفایی به صورت قارچ، سنگ‌های رسوبی و آذرین بالای خود را دگرگون می‌نماید.

در صنعت برای تولید نمک خوراکی با خلوص بسیار بالا (٪۹۹,۹+) از روش تبلور مجدد استفاده می‌گردد. اگر مرحله انحلال مستقیماً در معدن سنگ نمک (چه بصورت گنبد یا لایه) صورت گرفته و سپس مایع اشباع به کارخانه‌ای در جوار آن منتقل شود به این روش استخراج، معدنکاری انحلال (solution mining) گفته می‌شود که مزایای فراوانی بر دیگر روش‌های استخراج نمک (روباز-پلکانی، زیرزمینی- اتاق‌پایه) دارد[۱]. در این روش با حفر چاهی از لایه سطحی زمین تا عمق لایه نمکی و تزریق آب شیرین و پمپاژ آب شور اشباع شده از طریق همان چاه یا چاه‌های مجاور، اقدام به بازیابی نمک در اعماق کانسار نمکی می‌شود. این روش که از اواسط قرن نوزدهم در مقیاس صنعتی وسیع در آمریکا مورد استفاده قرار گرفت، منجر به ایجاد حفره‌های نمکی بسیار بزرگ در کانسارهای نمک شده است.

ذخیره‌سازی در گنبدهای نمکی

با توجه به این که ذخایر محبوس شده نفت و گاز که اغلب در جوار گنبدهای نمکی مشاهده شده‌است، استفاده از حفرات گنبدهای نمکی در جنگ جهانی دوم به منظور ذخیره‌سازی نفت و گاز مورد توجه قرار گرفت. این ذخیره‌سازی برای اولین بار در کانادا مطرح و با توجه به خصوصیات سنگ نمک در بین گزینه‌های موجود جدول (۱) بدین منظور انتخاب شد و اولین مخزن زیرزمینی گاز در سال ۱۹۴۰ در کانادا به بهره‌برداری رسید[۲]. استفاده از حفرات گنبدهای نمکی برای ذخیره‌سازی نفت، گاز و مواد هیدروکربنی در اوایل دهه ۷۰ میلادی مقارن با اولین بحران افزایش قیمت نفت، به صورت

خیلی جدی مورد توجه دولت آمریکا قرار گرفت و سرمایه گذاری زیادی برای مطالعات تحقیقاتی در رابطه با چگونگی تشکیل، شکل، خواص فیزیکی، زیست محیطی و کاربردهای ویژه این ذخایر به عمل آمد[۳]. برخی کاربردهای گنبد نمکی در شکل (۱) به اختصار معرفی شده است[۴].

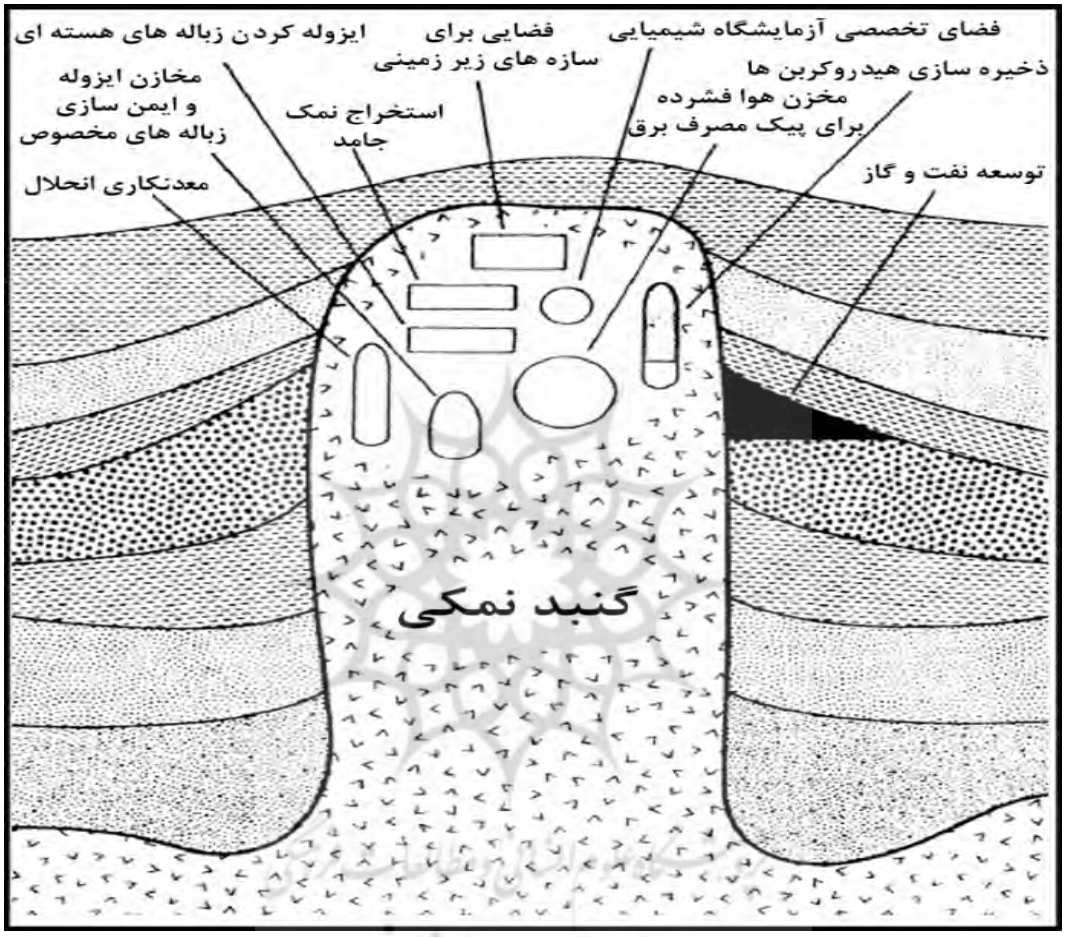
در مدت کوتاهی با تصویب لوایح قانونی ۱ بیلیون بشکه نفت خام تحت عنوان ذخایر استراتژیک نفت در ۱۹۷۵ صورت گرفت [۵] و طی چند سال بعد از آن با اضافه نمودن میزان این ذخایر به دو برابر آن اقدام به بررسی‌های فنی، اقتصادی و عملی در طراحی بیش از ۳۵۰ گنبد نمکی در آمریکا صورت گرفت[۶].

نیروگاه‌های CAES (Compressed Air Energy Storage)

برای پیک‌سایی در مصرف انرژی الکتریسیته، B.Djordjevitch در ۱۹۵۲ استفاده از انرژی مازاد شبکه برای فشرده‌سازی هوا و سپس مصرف آن در توربین‌های گازی در شرایط پیک را پیشنهاد و ثبت نمود. مقامات آلمانی به کارگیری معادن متروکه نمک و پتاس را جهت ایجاد مخازن هوای فشرده و سوخت توصیه نمودند. پیامد افزایش بی‌سابقه هزینه انرژی در دهه ۷۰ میلادی، این مطالعات بیشتر مورد توجه قرار گرفت و نیاز جدی به بررسی مدل‌های صنعتی، منجر به طراحی و ساخت دو نیروگاه CAES Plant، ابتدا در هانتروف آلمان (۱۹۷۸) و سپس در آلاباما آمریکا (۱۹۹۱) شد.

جدول ۱- گزینه‌های متفاوت برای ذخیره هیدروکربن‌ها در مقیاس وسیع در طبیعت

جنس مواد	خاک‌رس	توف	سنگهای کریستالی	سنگ نمک
منشاء	رسوبی	رسوبات آتشفشانی	آذرین/ دگرگونی	رسوبی و تبخیری
پلاستیسیته	بالا	متوسط	کم	بالا
مقاومت مکانیکیMPa	۲۰-۴۰	۲۰-۱۰۰	۱۵۰-۲۲۰	۲۰-۳۵
پایداری سینه کارمعدن	ضعیف	متوسط	بالا	بالا
معدنکاری	آسان	متوسط	آسان	آسان
حلالیت	کم	کم	خیلی کم	خیلی کم
ظرفیت جذب سطحی	بالا	خیلی بالا	بالا تا متوسط	فوق‌العاده کم



شکل ۱: کاربردهای گنبدهای نمکی

این نیروگاه‌ها به منظور بررسی کاربردی، رفع مشکلات زمین شناسی و تکنولوژیکی، درک بهتر ویژگی‌ها، طراحی و توسعه گنبدهای نمکی با توجه به فاکتورهای عملیاتی، اقتصادی و زیست محیطی به صورت پایلوت راه اندازی شدند و در طول بیش از دو دهه استفاده مستمر اطلاعات بسیار ارزشمندی را در رابطه با پتانسیل‌های به کارگیری گنبدهای نمکی در مدیریت کلان انرژی فراهم آورده‌اند. از فاکتورهای مهم عملیاتی- طراحی در رابطه با گنبدهای نمکی برای مثال می‌توان به میزان توسعه حفره، شکل حفره، پایداری حفره، نشت، آلودگی، بهینه‌سازی کاربردی، انعطاف برای توسعه‌های آینده و جنبه‌های زیست محیطی گنبد اشاره کرد. از ویژگی‌های بحرانی گنبدهای نمکی که در انتخاب آنها برای ذخیره سازی

نفت، گاز و هوای فشرده مورد توجه قرار می‌گیرند می‌توان به موارد خصوصیت سنگ نمک و ناخالصی‌های همراه آن، شکل هندسی ساختارهای داخلی گنبد، ویژگی‌های ژئومکانیکی مواد احاطه کننده آن، شرایط تنش، نفوذ آب اشاره کرد.

نیروگاه‌های CAES با تولید انرژی کم هزینه در شرایط پیک و قابلیت استفاده هم زمان با نیروگاه‌های بادی، می‌توانند نه تنها امکانات ذخیره مناسب برای سوخت و هوای فشرده در نیازهای عمومی تولید انرژی فراهم آورند، بلکه برای تولید برق در کاربردهای ویژه نظامی و دفاعی نیز قادرند کاربری بسیار داشته باشند. به صورتی که با ایجاد فضای زیرزمینی مناسب برای ماشین‌آلات در داخل یا اطراف گنبد تنها راه‌های دسترسی به سطح گنبد ورودی هوا، خطوط اگزوز و خطوط انتقال برق خواهند بود. یک نیروگاه CAES شامل ۴ واحد اصلی است. کمپرسور ها، موتور و ژنراتور، توربین گازی و مخزن زیر زمینی هوای فشرده (حفرات گنبد های نمکی). در دوره بار مصرفی غیر پیک، موتور با مصرف برق ارزان‌تر هوا را فشرده و در مخزن زیر زمینی نمکی ذخیره می‌کند. سپس در دوره بار پیک این فرایند معکوس شده، هوای فشرده شده از مخزن به سطح بازگردانده، پس از گرم شدن در گرم کننده صرف سوخت گاز طبیعی در محفظه احتراق توربین گازی شده، گاز احتراق در دو مرحله توربین گازی منبسط شده و با چرخش ژنراتور تولید الکتریسیته می‌کند. در یک نیروگاه توربین گازی تقریباً $\frac{۲}{۳}$ توان خروجی برای فشرده‌سازی هوای احتراق مصرف می‌شود، در حالی که در یک نیروگاه CAES هنگام مصرف پیک برق، نیاز به هوای فشرده در عملیات توربین نیست و چون آنتالپی مورد نیاز قبلاً در هوای فشرده ذخیره وجود دارد می‌توان $\frac{۲}{۳}$ بیشتر از برق تولیدی توربین گازی را در اختیار شبکه قرار داد. شکل (۲) شماتیکی ساده از اجزای یک نیروگاه CAES بدون مخزن سوخت را نشان می‌دهد. بطور کلی نیروگاه CAES شامل دو نوع فشار ثابت و حجم ثابت می‌باشند. در سیستم‌های فشار ثابت، که اساسا برای کاهش حجم حفرات زیر زمینی و هزینه‌های هنگفت ناشی از حفاری زیر زمینی در سنگ‌های سخت طراحی شده اند، آب از یک مخزن سطحی به داخل مخزن هوای فشرده می‌تواند راه یافته تا جبران افت فشار هوای خارج شده را بکند. در سیستم‌های حجم ثابت، فشار هوا در حفره در حین تولید برق کاهش می‌یابد. این سیستم برای حفرات گنبدهای نمکی به دلیل هزینه بسیار پایین معدنکاری انحلال بسیار مناسب است [۱۲].

فاکتور های عملیاتی در نیروگاه CAES -Huntorf

مشخصات نیروگاه هانتروف که در مراحل بعدی توسعه آن، برای بهبود بازدهی اقتصادی مجهز به حفره دوم شد، در جدول (۲) آمده است. حجم تقریبی m^3 ۳۱۰۰۰۰ مربوط به فشار عملیاتی و جرم هوای فشرده مورد نیاز است. از مزایای وجود دو حفره هوا در این طرح می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد: تسهیل در تعمیرات و توقف حفره، سهولت در شارژ مجدد حفره و فراهم سازی فشار اولیه حداقل bar ۱۳ برای راه اندازی کمپرسورهای نیروگاه. عمق حفره به منظور اطمینان از

پایداری آن در طی چندین ماه فشار داخلی اتمسفریک و همچنین فشار حداکثر ۱۰۰bar محاسبه شده است. عمق چاه های حفره با توجه به نرخ بسیار بالای تخلیه مورد نیاز (۴۱۷ kg/s)، عدم اتلاف فشار و امکان خوردگی پوشش چاه بـه واسـطه نفوذ هوای مرطوب طراحی شده‌اند. قطر لوله اصلی ۲۰ تا ۲۱ اینچ و قطر لوله نگه دارنده ۲۴/۵ اینچ در نظر گرفته شده‌انـد. به دلیل مشکلات خوردگی ناشی از نفوذ هوای مرطوب، فضای بین لوله اصلی و لوله نگه دارنده بدون پرکننده انتخاب شده و در عین حال هوای خشک در این فضا تزریق می گردد. همچنین جنس این لوله‌ها از فـولاد مخـصوص و مقـاوم سـاخته شده‌اند که به دلیل تداوم معضل خوردگی در نهایت از لوله های پلاستیک مسلح به فایبرگلاس استفاده شد. لوله اصـلی بـه طول ۸۰m در حفره بدون نگه دارنده معلق بدلیل جلوگیری از ورود غبار نمک به توربین ها طراحی شده است. در نرخ های تخلیه تا ۳۶۵ kg/s هوا، آلایش کمتر از ۱mg (salt)/kg(air) گزارش شده است[۱۰] .

در مواقعی که حفرات نمکی به عنوان مخزن گاز طبیعی مورد استفاده قرار می گیرند قاعدتاً شورآبه بوسیله گاز در اولین پر کردن جایگزین می‌شود. برای تخلیه شورآبه باید از پمپ‌های شناور استفاده کرد زیرا علیرغم وجود فشار کافی توسط کمپرسورها سرعت در لوله اصلی چاه بیش از اندازه (۲۰ m/s) زیاد خواهد بود. اثرات ترمودینامیکی در حفره نمکی در مراحل تزریق و تخلیه بسیار مهم هستند. به دلیل لزوم فشار برگشتی حداقل در کمپرسور های نیروگاه، اولین فشرده سازی در دو مرحله صورت گرفته و برای رعایت حداکثر سرعت جریان مجاز هوا در لوله اصلی چاه (۲۰ m/s) از شیر برگشتی استفاده شده است. اندازه گیری‌های زیاد فشار و دما در حفرات و شبیه سازی های عددی از رفتار ترمودینامیکی نشان می‌دهند که انتقال حرارت بین حفره و دیواره‌های سنگ نمک حداکثر در محدوده ضخامت ۱m به وقوع می پیوندد. شکل بی قاعده حفره، انتقال حرارت بین هوا و دیواره های حفره را افزایش داده که این به نوبه خود بر ظرفیت مخزن می افزاید. پایداری حفرات ذخیره هوای گنبدهای نمکی در نیروگاه های CAES با توجه به نرخ بالاتر تخلیه و نرخ کاهش فشار بالاتر (تا ۱۵ bar/h)، در مقایسه با حفرات ذخیره گازی، از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در طول بیش از ۲۷ سال دوران عملیاتی، مطالعات و نقشه برداری مداوم سونار هیچگونه شواهدی دال بر تخریب سقف یا بدنه حفره نشان نداده اند. علیرغم مشکلات عدیده در ابزار اندازه گیری در شرایط حفرات، بررسی خطوط تراز نشان داده‌اند که عملاً هیچگونه تغییری در شکل حفرات در طول مدت عملیات صورت نگرفته است.

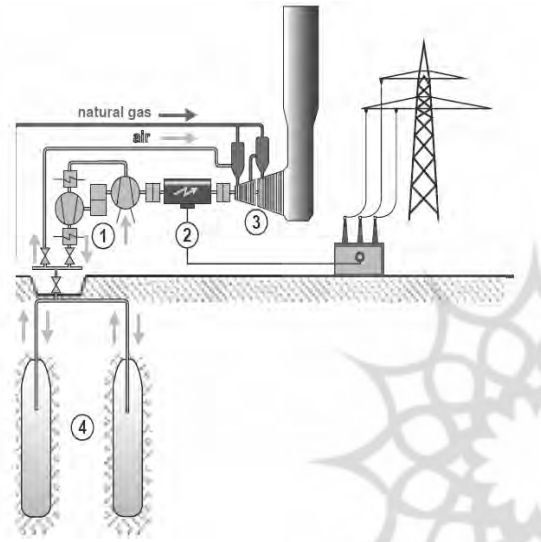
نسل های دوم نیروگاه های CAES

تجارب عملیاتی مثبت دو نیروگاه پایلوت فوق الذکر باعث شده است که طرح‌های توسعه جدیدی در چندین کشور مورد مطالعه قرار گیرند. در حال حاضر دو شرکت اصلی Dresser Rand, Alstom ، اینگونه نیروگـاه هـا را در دو مقیـاس ۱۳۵ مگاوات و ۴۰۰ مگاوات در جهان عرضه می‌کنند. شرکت ESPC که در طراحی، ساخت، تست و راه اندازی نیروگـاه

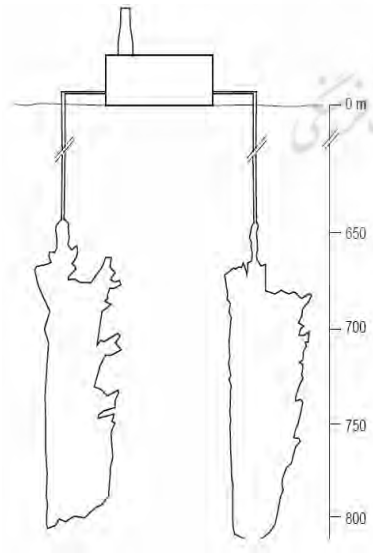
آلاباما شرکت داشته اخیراً با بهینه سازی چند مرحله‌ای موفق شده است تا نسل‌های جدید نیروگاه های CAES را معرفی کند [۱۵].

جدول۲: مشخصات نیروگاه هانتروف

توان خروجی		
	توربین	۲۹۰MW
	کمپرسور	۱۱۰MW
نرخ جریان هوا		
	توربین	۴۱۷Kg/s
	کمپرسور	۱۰۸Kg/s
تعداد حفرات		۲
حجم حفرات هوا		
	اولی	۱۴۰۰۰۰M^3
	دومی	۱۷۰۰۰۰M^3
مکان حفرات		
	بالا	۶۵۰m
	پایین	۸۰۰m
قطر بیشینه		۶۰m
فاصله چاه ها		۲۲۰m
فشار حفرات		
کمینه مجاز		۱bar
کمینه عملکردی		۲۰bar
کمینه عملکردی		۴۳bar
بیشینه مجاز		۷۰bar
نرخ کاهش فشار کمینه		۱۵Bar/h



شکل۲: شماتیک ساده از نیروگاه CAES

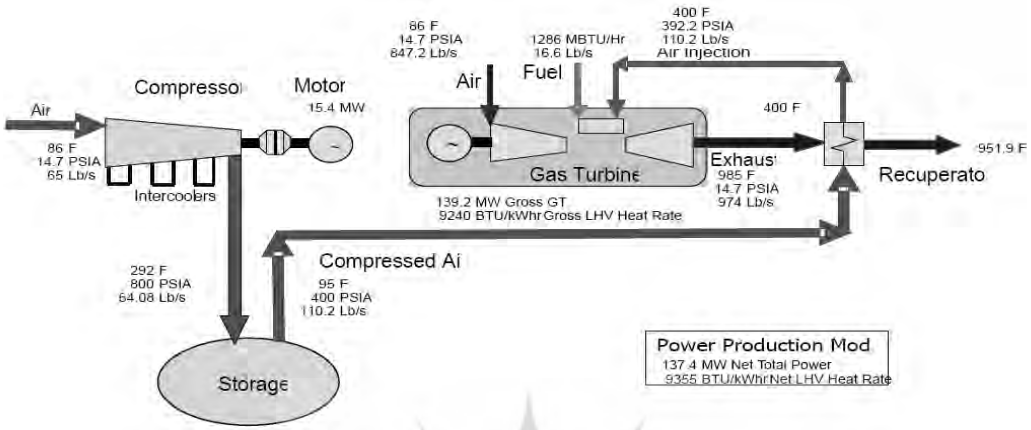


شکل ۳: شماتیک CAES-AI با مشخصات عملیاتی

این شرکت مدعی است که بسته نیروگاهی که توسط شرکت‌های Alstom و Dresser Rand ارائه می‌شوند نه تنها در اندازه نیروگاه، بلکه در اندازه فشارها و جریانات عملیاتی که بر عمق و حجم مخزن نیز تاثیر مستقیم دارند قابل انعطاف نیستند و به ادعای آن‌ها مشخصات طرح های موجود با نیاز های مخصوص ظرفیت نیروگاه‌های تجدیدپذیر، نحوه عملیات و محل آنها هماهنگی ندارند. لذا با بکارگیری توربین های گازی، کمپرسورها و منبسط کننده‌های موجود در بازار، نسل دوم اینگونه نیروگاه‌ها، کم‌هزینه‌تر و با زمان تحویل کوتاه‌تر طراحی شده‌اند. این روش طراحی برای کشور های در حال توسعه چون ایران بسیار مناسبند، زیرا امکان استفاده از ماشین آلات ساخت کشور های مختلف را فراهم می‌آورند. برای مثال پروژه ۳۰۰ مگاواتی نیروگاه CAES در شانگهای چین که اخیراً توسط ESPC اجرا می شود با تاکید بر بکار گیری لوازم ساخته شده در چین می باشد. در تجربه نیروگاه آلاباما اهمیت بهینه سازی کل نیروگاه در پارامترهای طراحی ماشین‌آلات توربو، حجم قابل دسترس مخزن، پارامترهای عملیاتی و داده های اقتصادی و عملیاتی کلی نیروگاه در رابطه با هزینه های برق پیک و غیرپیک، میزان تقاضا و قیمت های برق مصرفی و همچنین هزینه های سوخت شناخته شدند. در بخش بعد به معرفی مختصر بعضی از مفاهیم طراحی نیروگاه‌های نسل دوم توسط ESPC که حائز اهمیت می‌باشد پرداخته می‌شود.

تزریق هوا (CAES-AI)

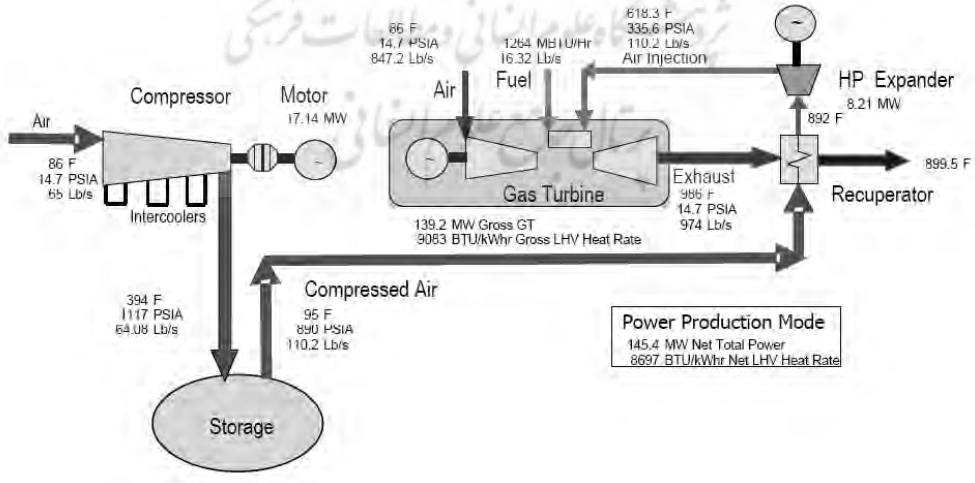
در این طرح هوای ذخیره شده و پیش گرم شده به کمپرسور توربین گازی تزریق شده و باعث افزایش توان توربین می‌شود. شماتیک CAES-AI با مشخصات عملیاتی در شکل (۳) آمده است. توربین احتراقی(CT) از نوع GE9171 می باشد که برای تزریق حداکثر جریان هوا در شرایط دمای محیط سرد ۱۰°C- مناسب است و می‌تواند با حداقل جریان ورودی (که با هوای ذخیره مخزن جبران می‌شود) و حداقل کاهش قدرت کار کند. آزمایشات ارزیابی، حداکثر جریان هوای تزریقی را ۱۲٪ جریان ورودی CT برآورد کرده‌اند. CAES-AI با قدرت کل ۱۳۷/۴ مگاواتی که با نرخ حرارت ۹۳۵۵Btu/kWh در شکل (۴) آمده است ترکیبی است از قدرت CT تقریبی ۱۱۲ مگاواتی که با نرخ گرمای تقریبی ۱۰۸۵۰ Btu/kWhو قدرت مازاد CAES از ۲۵ MW تولید شده بوسیله CT در اثر تزریق هوای پیش گرم شده با نرخ گرمای تقریبی ۴۰۰۰ Btu/kWh مستقیماً به کمپرسور صورت گرفته است.



شکل ۴: شماتیک موازنه های جرم وحرارت برای طرح CAES-AI

CAES-AI-HPE- تزریق هوا با منبسط کننده فشار بالا(HP Expander)

با اضافه کردن یک منبسط کننده فشار بالا می توان از اختلاف فشار بین هوای فشرده شده و هوایی که به داخل توربین تزریق می شود بدون صرف سوخت اضافی استفاده کرد. شماتیک این طرح در شکل (۵) آمده است که در آن توان کل ۱۴۵/۴ مگاوات با نرخ حرارتی ۸۷۰۰ Btu/kWh ترکیبی است از نیروگاه CAES-AI ۱۳۷/۴ مگاواتی با نرخ حرارتی ۹۳۵۵ Btu/kWh و ۸/۲ مگاواتی مازاد از HP Expander (با نرخ حرارتی 0 Btu/kWh) .



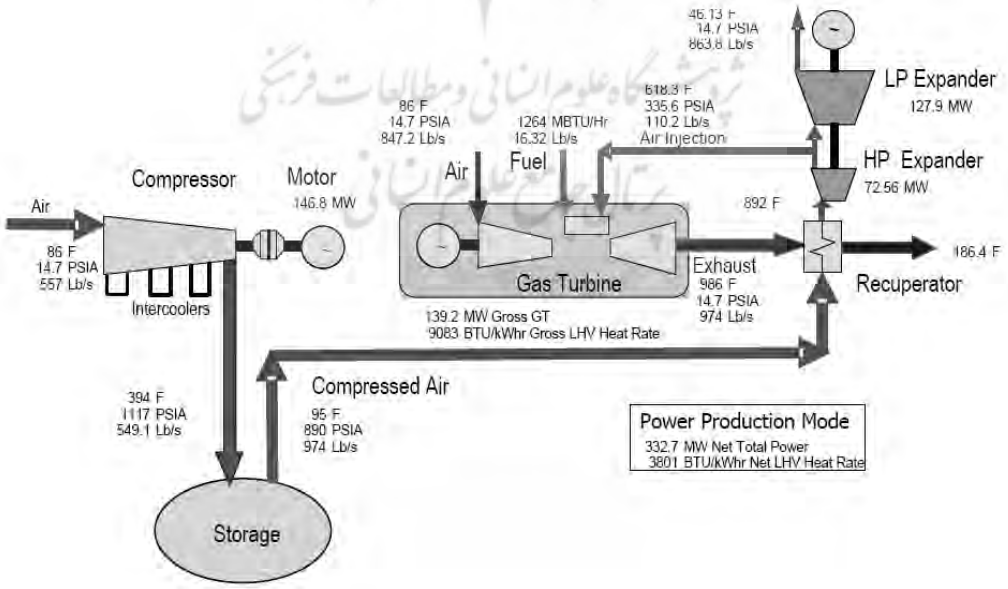
شکل۵: شماتیک موازنه های جرم وحرارت برای طرح CAES-AI-HPE

CAES-AI-BCE – تزریق هوا با سیکل زیرین (Bottoming Cycle Expander)

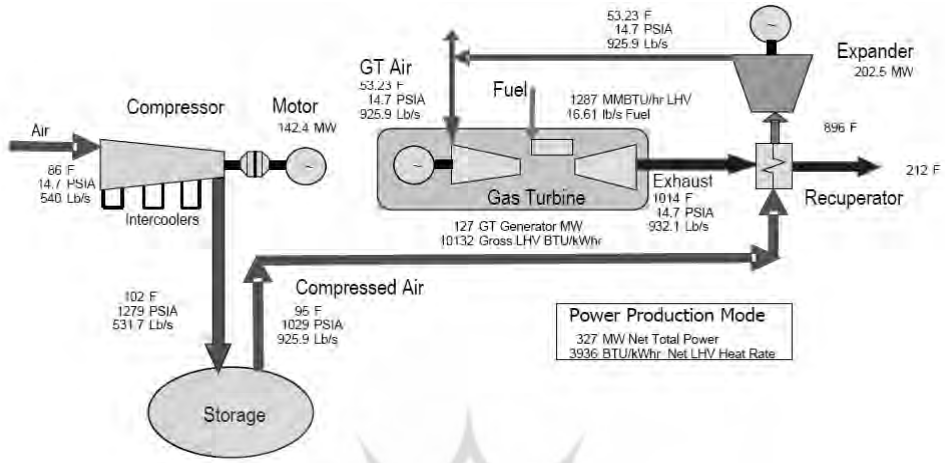
در این طرح منبسط کننده در اختلاف فشار هوای فشرده و اتمسفریک کار کرده و سپس به توربین گازی تزریق می شود. اختلاف مهم این طرح و CAES-AI-HPE در این است که جریان هوای فشرده ورودی به منبسط کننده را می توان بدون محدودیت نسبت به تزریق جریان هوا به CT بهینه کرد. شکل(۶) شماتیک این طرح را برای توان کل ۳۳۲/۷ مگاوات با با نرخ حرارتی Btu/kWh ۳۸۰۰ نشان می دهد که در حقیقت ترکیبی است از یک CAES-AI با قدرت۱۳۷/۴ مگاوات که با نرخ حرارت Btu/kWh ۹۳۵۵ و سیکل زیرین HP Expander وLP Expander با قدرت ۲۰۰/۵ مگاوات بدون مصرف سوخت اضافی بدست می آید.

CAES-BCE-IC، منبسط کننده سیکل زیرین با خنک کننده ورودی
(Bottoming Cycle Expander and Inlet Chilling)

شماتیک این طرح در شکل(۷) آمده است. در این طرح منبسط کننده هیچ تزریقی به CT ندارد و بهینه شده است تا جریان اگزوز با ورودی جریان CT در دمای°C ۱۵-۱۰ معادل شده است. افزایش قدرت CT در این طرح به دلیل دمای ورودی کمتر از دمای محیط می باشد. توان کل CAES-BCE-IC ۳۲۷ با نرخ حرارتی Btu/kWh ۳۹۳۶ در حقیقت ترکیبی از قدرت CT ۱۷۲ مگاوات و با نرخ حرارتی ۱۰۸۵۰۱Btu/kWh به اضافه سیکل زیرین HP Expander و LP Expander با قدرت ۲۰۲/۵ مگاوات بدون هیچ مصرف سوخت اضافی می‌باشد.



شکل۶: شماتیک موازنه های جرم وحرارت برای طرح CAES-AI-BCE



شکل۷: شماتیک موازنه های جرم وحرارت برای طرح CAES-BCE-IC

پتانسیل استفاده از نیروگاههای CAES در ایران

همانطور که در قسمت های پیشین توضیح داده شد موفقیت اجرایی نیروگاه CAES در سه دهه گذشته کاملاً محرز شده است. در کشور های مختلف جهان به دنبال چاره اندیشی در برطرف کردن بحران انرژی و تولید بهینه برق، ساخت اینگونه نیروگاهها را در دستور کار خود قرار داده اند. متاسفانه در ایران علیرغم شرایط بسیار مناسب، به کارگیری این گونه نیروگاهها مورد کمترین توجه قرار گرفته‌اند. برای توجیه منطقی نیروگاه‌های CAES در ایران می توان به موارد زیر اشاره کرد:

تعداد و پراکندگی گنبدهای نمکی در ایران

شکل(۸) گستردگی گنبد های نمکی را بر اساس نقشه (پراکندگی گنبد های نمکی ایران- عیوضی-۱۳۷۴) نشان می‌دهد، همانطور که از نمودار پیداست گستردگی گنبد های نمکی به طور بسیار مناسبی در اکثر نقاط پر جمعیت و پر مصرف الکتریسیته (که با هاشور نشان داده شده‌اند) به چشم می خورند و در نزدیکی اکثر آنها خطوط انتقال گاز عبور می‌کند. لذا این مخازن به خوبی می توانند نه تنها به عنوان ذخایر استراتژیک نفت و گاز برای مصارف عمومی مورد استفاده قرار گیرند بلکه می توانند سوخت لازم برای نیروگاه های گازی را در فصول پیک مصرفی فراهم آورند. لازم به توضیح است که اطلاعات ثبت شده در شکل(۸) در رابطه با گستردگی گنبد های نمکی مربوط به داده های سال ۱۳۷۴ است که فقط نزدیک به ۶۰ گنبد نمکی در آن مشخص شده است. طبق آخرین داده ها از سایت اکتشافات معدنی، ژئوتوریسم، گنبدهای نمکی ایران را به بیش از ۲۰۰ اعلام نموده است.

سیاست گذاری توسعه شبکه برق

سیاست گذاری توسعه شبکه برق کماکان بر اساس استفاده از منابع گازی است. در این راستا تعداد زیادی توربین گازی در مقیاس کوچک در کشور به صورت پراکنده نصب شده اند. منابع استحصال گاز بیشتر در جنوب کشور قرار دارد. با توجه به اینکه مصرف گاز در زمستان برای سوخت خانگی بسیار افزایش می یابد لزوم ذخایر گاز طبیعی قابل اطمینان در کنار این نیروگاههای پراکنده برای رفع تقاضای تولید برق در شرایط بار پیک در این فصول کاملاً محرز شده است. در عین حال، در مدیریت بار شبکه لازم است از افت بازدهی شبکه حتی المقدور جلوگیری شود. یکی از روش های ارتقاء بازدهی شبکه نزدیک بودن منابع تولید و مصرف می باشد. با توجه به پراکندگی گنبد های نمکی در جوار مناطق پر مصرف، امکان ایجاد منابع تجدیدپذیر انرژی در اکثر نقاط پر مصرف الکتریسیته ایران، و همچنین گستردگی شبکه خطوط انتقال گاز در این مناطق، می توانند به کار گیری نیروگاههای CAES را در کاهش افت بازدهی شبکه و سرمایه گذاری در نیروگاههای تجدید پذیر توجیه کنند.

کاربردهای ویژه استراتژیکی در تولید الکتریسیته

ذخایر هوای فشرده به تنهایی می توانند در شرایط اضطراری بدون مصرف سوخت برای مدتی محدود انواع توربین های مولد برق را به چرخش در آورده و برق تولید کند. با توجه به حساسیت های امنیتی در منطقه، معضلات تروریستی، جنگ در کشورهای همسایه و وجود تنش های مختلف بین کشور های تولید کننده نفت و گاز، در این راستا، حفرات گنبد های نمکی می توانند به عنوان ذخایر انرژی برای کاربردهای حساس نظامی و استراتژیکی مورد استفاده قرار گیرند.

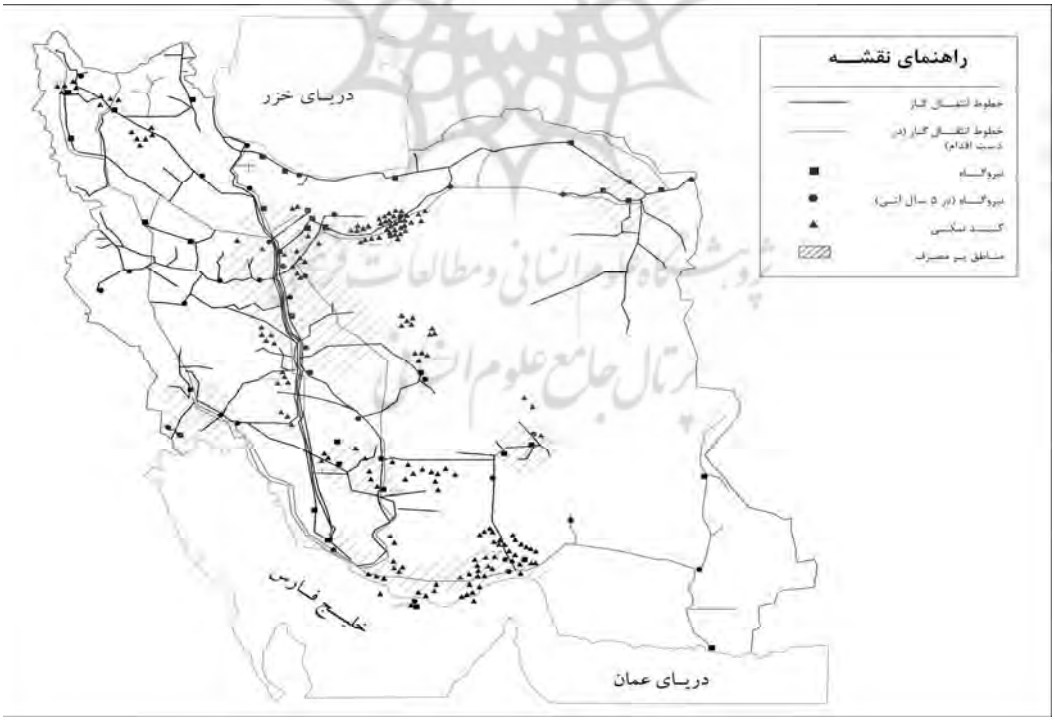
تشویق به معدنکاری انحلال و جلوگیری از استفاده نادرست و تخریب نابجای گنبدهای نمکی

متاسفانه صنعت معدنکاری انحلال به طور مستقیم از ذخایر سنگ نمک، در ایران مورد توجه قرار نگرفته است. نمک لازم برای کارخانه تصفیه و تبلور مجدد اغلب از منابع تبخیری یا روشهای سنتی استخراج روباز با انفجار صورت می گیرد و نمک به کارخانه حمل می شود. اینگونه روشهای استخراج نه تنها باعث تخریب همیشگی گنبد های نمکی می گردد بلکه بازدهی بسیار پایین در استفاده از کانسار نمک دارد، علاوه بر آن تولید نمک کم کیفیت با ناخالصی های زیاد چه برای مصارف خوراکی و چه صنعتی را در پی دارد. معدنکاری به روش انحلال که بیش از ۱۳۰ سال پیش در نیویورک در مقیاس وسیع صنعتی مورد استفاده قرار گرفت، به دلیل وجود شبکه های توزیع برق در جوار گنبدهای نمکی و ذخایر آب، توانست واحدهای تولید نمک کریستالیزه را در جنب گنبد نمکی ایجاد کند و بدین وسیله از هزینه تولید نمک بسیار با کیفیت بکاهد[۱۱]. لذا با توجه به اینکه در صورت جدی گرفتن معدنکاری انحلال در ایران نه تنها قادر خواهیم بود که نمک با

کیفیت برای مصارف مختلف صنعتی (مخصوصاً استخراج نفت و گاز که یکی از بیشترین حجم مصرفی نمک در صنایع را دارند) تهیه کنیم، بلکه می‌توانیم اقدام به ایجاد حفرات ذخیره سوخت و هوای فشرده برای استفاده نسل های آینده با کمترین معضلات زیست محیطی، حداقل به مدت چند صد سال، نماییم.

لزوم بر بومی کردن صنایع تولیدی نیروگاهی بهینه در کشور

ایران نیز مانند دیگر کشورها در راستای خودکفایی تولید انرژی برای کشور لازم است تا نیروهای متخصص در تکنولوژی های جدید و پایدار در کشور تربیت کند. تکنولوژی نیرگاههای CAES مسلماً کاندیدای بسیار مناسب در این رابطه است. اطلاعات لازم برای توسعه نیروگاههای CAES در ۳۰ سال گذشته با صرف هزینه های بسیار گزاف در آمریکا و اروپا فراهم شده است و با توجه به اهمیت موضوع انرژی خوشبختانه اطلاعات بدست آمده و داده های فنی در اختیار عموم قرار دارد. در ایران متاسفانه با اتکا به منابع عظیم نفتی و گازی کشور در این مقوله کمترین توجه مبذول گشته است و لازم است تا در استراتژی تولید الکتریسیته بازبینی جدی بعمل آید.



شکل۸: نقشه پراکندگی گنبدهای نمکی، خطوط انتقال گاز، نیروگاه های گازی و مناطق پر مصرف انرژی

نتیجه‌گیری

برای پیک‌سایی در مصرف انرژی فناوری‌های مختلفی ارائه شده است. بر اساس یک تحقیق قدرت آب پمپاژ شده (HP) و ذخیره‌سازی هوای فشرده (CAES) از بالاترین توان نسبت به روش‌های دیگر برخوردار است[۱۸]. ولی هر دو روش وابسته به موقعیت جغرافیایی می‌باشند. روش قدرت آب پمپاژ شده در مناطق کوهستانی قابل اجرا می‌باشد و در روش ذخیره‌سازی هوای فشرده ایجاد فضای بزرگ و بدون نشت برای ذخیره سازی هوای فشرده لازم است. گنبدهای نمکی ایجاد چنین فضایی را با حداقل هزینه ممکن می‌سازد. این گنبدها اکثرا در مناطق کویری می باشند. با توجه به سیاست‌های دولت در ایجاد نیروگاه‌های گازی و سیکل ترکیبی در مناطق کویری و مرکزی ایران، نیروگاه‌های CAES روشی بسیار مناسب برای مدیریت بار پیک است. با توجه به پتانسیل‌های ایران در این زمینه و مشکلات پیک سایی، اجرای یک نیروگاه پایلوت CAES می‌تواند در دستور کار دولت قرار بگیرد.

منابع

[1] M.R. Mozdianfard, S. Nadimi, Z.S. Mirzaei, “An Analysis of Salt Mining Methods in Iran and Problems Facing Production Units”, The First Iranian National Salt Conference, Iran, 2008.

[2] Alllen Kermit, “Strategic storage of crude oil in Gulf Coast salt domes”, Louisiana State University, pp. 201-208, 1977.

[3] R.L. Thoms, “ geotechnical factors and guidelines for storage of compressed air in solution mine salt cavities”, U. S. Department of Energy, 1982.

[4] J. Martinez, “Energy Programs-A Contribution to Salt Dome Knowledge”, Sixth International Symposium on Salt, vol. 2, pp. 235-248, 1983.

[5] Federal Energy Administration, “The Strategic Petroleum Reserve plan in brief”, pp. 23, 1976.

[6] U. S. Department of Energy, “Report on the explosion, fire and oil spill resulting in one fatality…”, DOE, Vol.1 pp. 531, 1978.

[7] U. S. Department of Energy, “Strategic Petroleum Reserve”, annual report, pp. 86, 1980.

[8] U. S. Department of Energy, “Strategic Petroleum Reserve”, annual report, pp. 66, 1981.

[9] U. S. Department of Energy, “NWTS program criteria for mined geologic disposal of nuclear waste”, ohio, pp.23 , 1982.

[10] K.Mohmeyer, R.Scharf, “Huntrof CAES:More than 20 Years of Successful Operation ” , spring 2001 Meeting Orlando, Florida, USA, 2001.

[11] R.L. Thoms and R.M. Gehle, " A BRIEF HISTORY OF SALT CAVERN USE " Texas , U.S.A, 2001.

[12] James D.Gustin, " Energy Storage in Salt", Sixth International Symposium on Salt, toronto Canada, 1983.

[13] W. J. Lang, "underground energy storage for electrical power generation" fourth international symposium on salt, Ohio, USA.

[14] H. Harboe "peak power plants with air storage in salt caverns" fourth international symposium on salt, Ohio, USA.

[15] M.Nakhamkin,"Available Compressed Air Energy Storage (CAES) plant concepts", Power-Gen Conference, December 2007.

[16] J. Neumiller, "Reservoir simulation of Combined Wind Energy and Compressed Air Energy Storage in Different Geologic Settings", Dec 2006.

[۱۷] دفتر برنامه ریزی تولید، "ظرفیت تجمعی نیروگاه‌های کشور به تفکیک واحد"، شرکت توانیر، معاونت هماهنگی تولید، ۱۳۸۷.

[18] G. Grazzini, A. Milazzo "Thermodynamic analysis of CAES/TES systems for renewable energy plants", Renewable Energy vol.33, 2008.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی