

## تحلیل فنی - اقتصادی سناریوی زیست‌محیطی سبد تولید هیبرید باد - خورشید - فسیلی با تعدیل ورود ذخیره‌ساز هوای فشرده به توربین‌های گازی؛ (مطالعه موردی: شرکت برق منطقه‌ای

خراسان)

مهدی قائمی اصل<sup>۱</sup>

دکترای علوم اقتصادی، مدرس دانشکده اقتصاد دانشگاه خوارزمی،

m.ghaemi84@gmail.com

مصطفی سلیمی‌فر

استاد دانشکده علوم اداری و اقتصادی دانشگاه فردوسی مشهد،

mostafa@ferdowsi.um.ac.ir

محمدحسین مهدوی عادل

استاد دانشکده علوم اداری و اقتصادی دانشگاه فردوسی مشهد،

madeli\_2001@yahoo.com

مصطفی رجبی مشهدی

استایار دانشکده مهندسی برق و مهندسی پزشکی دانشگاه صنعتی سجاد و معاون راهبری

شبکه برق ایران، m.rajabimashhadi@ieee.org

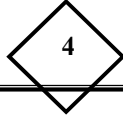
تاریخ دریافت: ۹۳/۰۸/۰۲ تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۴/۰۲

### چکیده

در سناریوی زیست‌محیطی سبد تولید هیبرید باد-خورشید- فسیلی، ۱۰۰ درصد پتانسیل تولید برق تجدیدپذیر (بادی و خورشیدی با قید پایداری شبکه)، در سیستم تولید مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد تا سیستم تولید، کمترین میزان انتشار آلاینده زیست‌محیطی را به همراه داشته باشد. با توجه به ضریب نفوذ بالای برق تجدیدپذیر با ماهیت نوسانی، به‌کارگیری سیستم‌های ذخیره‌سازی به منظور ایجاد قابلیت اطمینان و حفظ پایداری شبکه ضروری است. در این پژوهش با شبیه‌سازی سیستم تولید نیروگاه‌های شرکت برق منطقه‌ای خراسان، تأثیر ورود حداکثر پتانسیل تولید برق خورشیدی و بادی در کنار تعدیل ورود ذخیره‌ساز هوای فشرده (CAES) به توربین‌های گازی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که سناریوی زیست‌محیطی سبد هیبرید، کاهش ۴/۲۸ میلیون تنی انتشار آلاینده دی‌اکسید کربن و افزایش ۱۰ برابری هزینه تمام‌شده نسبت به مدل پایه (شرایط اولیه سیستم تولید) را به دنبال دارد. این مسئله لزوم حمایت مالی جدی و دخالت دولت در بومی‌سازی تکنولوژی برای کاهش هزینه تمام‌شده را نشان می‌دهد. علاوه بر این بیشترین نرخ کاهش قیمت، کمترین نرخ رشد انتشار آلاینده زیست‌محیطی و بیشترین نرخ رشد درآمد خالص در میان سناریوهای افزایش ظرفیت سیستم CAES، مربوط به دامنه افزایش ظرفیت از ۵۰ به ۱۰۰ مگاوات است. از این رو بر اساس هر سه معیار قیمتی، زیست‌محیطی و درآمدی، ظرفیت ۱۰۰ مگاواتی، ظرفیت بهینه سیستم CAES است که می‌تواند نقطه شروع مناسبی برای راه‌اندازی این سیستم باشد.

طبقه‌بندی JEL: N7، O13، P28، Q42.

**کلید واژه‌ها:** شبیه‌سازی سیستم قدرت، سناریوی زیست‌محیطی سبد تولید هیبرید، سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده.



## **Technical-Economic Analysis of Environmental Scenario of Hybrid Wind-Sun-Fossil Portfolio by Modification of Compressed Air Energy Storage (CAES) for Gas Turbines; (Case Study: Khorasan Regional Electricity Co.)**

**Mahdi Ghaemi Asl<sup>1</sup>**

Ph.D. Student of Economic Sciences, Management & Economic Sciences Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, m.ghaemi84@gmail.com

**Mostafa Salimifar**

Professor of Economics, Management & Economic Sciences Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, mostafaa@ferdowsi.um.ac.ir

**Mohammad Hossien Mahdavi Adeli**

Professor of Economics, Management & Economic Sciences Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, madeli\_2001@yahoo.com

**Mostafa Rajabi Mashhadi**

Assistant Professor of Electrical Engineering Faculty, Sadjad university of technology, m.rajabimashhadi@ieec.org

Received: 2014/11/24 Accepted: 2015/06/23

### **Abstract**

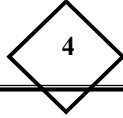
In the environmentally sensitive scenario we estimate the potential production of a hybrid wind-solar-fossil fuel system that uses 100 % of the wind and solar potential, while ensuring grid stability, in order to minimize environmental emissions. Maximising the use of renewable energies requires storage systems to deal with the fluctuating nature of such power production in order to ensure a reliable and stable grid. Our study finds that introducing the maximal extent of potential solar and wind power production, along with modification of Compressed Air Energy Storage (CAES) for gas turbines, reduces CO<sub>2</sub> emissions by 4.28 million tons and increases the cost of production ten times over the current production structure of the Khorasan Regional Electricity Co. It is thus clear that adoption of this environmentally optimal scenario requires substantial financial support of the government plus localization of renewable technology to reduce the cost of production. We also find that increasing the capacity of CAES from 50 to 100 MW produces the outcome with the highest reduction in prices, the lowest increase in environmental emissions and the highest rate of growth of net income. We thus find a CAES capacity of 100 MW to be the optimal starting point for moving towards an environmentally sensitive electricity production system.

**JEL Classification:** N7 .O13 .P28 .Q42.

**Keywords:** Simulation of production power system, environmental scenario of hybrid production portfolio, Compressed Air Energy Storage.

---

1- Corresponding author



# Technical-Economic Analysis of Environmental Scenario of Hybrid Wind-Sun-Fossil Portfolio by Modification of Compressed Air Energy Storage (CAES) for Gas Turbines; (Case Study: Khorasan Regional Electricity Co.)

**Mahdi Ghaemi Asl<sup>1</sup>**

Ph.D. Student of Economic Sciences, Management & Economic Sciences Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, m.ghaemi84@gmail.com

**Mostafa Salimifar**

Professor of Economics, Management & Economic Sciences Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, mostafaa@ferdowsi.um.ac.ir

**Mohammad Hossien Mahdavi Adeli**

Professor of Economics, Management & Economic Sciences Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, madeli\_2001@yahoo.com

**Mostafa Rajabi Mashhadi**

Assistant Professor of Electrical Engineering Faculty, Sadjad university of technology, m.rajabimashhadi@ieec.org

Received: 2014/11/24 Accepted: 2015/06/23

## Abstract

In the environmentally sensitive scenario we estimate the potential production of a hybrid wind-solar-fossil fuel system that uses 100 % of the wind and solar potential, while ensuring grid stability, in order to minimize environmental emissions. Maximising the use of renewable energies requires storage systems to deal with the fluctuating nature of such power production in order to ensure a reliable and stable grid. Our study finds that introducing the maximal extent of potential solar and wind power production, along with modification of Compressed Air Energy Storage (CAES) for gas turbines, reduces CO<sub>2</sub> emissions by 4.28 million tons and increases the cost of production ten times over the current production structure of the Khorasan Regional Electricity Co. It is thus clear that adoption of this environmentally optimal scenario requires substantial financial support of the government plus localization of renewable technology to reduce the cost of production. We also find that increasing the capacity of CAES from 50 to 100 MW produces the outcome with the highest reduction in prices, the lowest increase in environmental emissions and the highest rate of growth of net income. We thus find a CAES capacity of 100 MW to be the optimal starting point for moving towards an environmentally sensitive electricity production system.

**JEL Classification:** N7 .O13 .P28 .Q42.

**Keywords:** Simulation of production power system, environmental scenario of hybrid production portfolio, Compressed Air Energy Storage.

---

1- Corresponding author

## ۱- مقدمه

یکی از چالش‌های بزرگ منابع تجدیدپذیر، ماهیت غیرقابل پیش‌بینی این منابع است، به‌نحوی که در برخی منابع به ویژه خورشید و باد، بسته به تغییرات آب‌وهوا، توان خروجی متغیری دارند (کاناسه‌پتیل و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۱: ۲۸۱۰). در سیستم خورشیدی، با ابری شدن هوا، خروجی منبع کاهش می‌یابد، یا در طول شب، هیچ برقی تولید نمی‌کند. برای منبع بادی، هیچ قانون خاصی وجود ندارد که بیان کند در یک لحظه خاص (مثلاً لحظه پیک‌بار)، باد با چه سرعتی می‌وزد و ژنراتور بادی چه مقدار برق تولید خواهد نمود. در واقع سیستم‌هایی که به صورت منفرد و منحصرأ از یک منبع تجدیدپذیر استفاده می‌کنند (مانند سیستم‌های صرفاً برخوردار از بادی یا صرفاً خورشیدی یا هر منبع تجدیدپذیر انحصاری دیگر)، به هیچ‌وجه قادر به تأمین بار پیوسته قابل اطمینان نیستند (تانریون<sup>۲</sup>، ۲۰۰۵: ۱۴۰). به‌عبارت دیگر در تأمین یک‌بار، حتماً طی روز چندین بار خاموشی خواهند داشت که باعث کاهش شدید پایداری شبکه تولید می‌شود. برای رفع مشکل نااطمینانی خروجی منابع تجدیدپذیر، سه روش پیشنهاد شده است که عبارت‌اند از: ۱- استفاده از منابع تجدیدپذیر در ظرفیت‌های بزرگ ۲- استفاده از روش‌های ذخیره‌سازی و تجهیزات مبدل ذخیره‌ساز ۳- استفاده از سیستم انرژی تجدیدپذیر یک‌پارچه<sup>۳</sup> (IRES سیستم‌های انرژی هیبرید) (کاناسه‌پتیل و همکاران، ۲۰۱۱: ۲۸۱۱). سیستم انرژی تجدیدپذیر یک‌پارچه برخوردار از سیستم ذخیره‌سازی، که برای تأمین بار از مجموع چند منبع تجدیدپذیر به‌جای یک منبع مانند باد، خورشید، و غیره استفاده می‌کند، مقرون به‌صرفه‌ترین و قابل اطمینان‌ترین روش است؛ زیرا وجود چند منبع مختلف در کنار یکدیگر، باعث می‌شود که با بهره‌برداری از مزایای یک منبع تجدیدپذیر، چالش پیش‌روی استفاده از منبع دیگر پوشش داده شود. این بدان معنی است که منبع باد در زمانی که منبع خورشیدی توانایی تولید برق را ندارد، برق تولید کند و برعکس هنگامی که منبع بادی توانایی تأمین بار را ندارد، منبع خورشیدی توان زیادی تولید کند و بار را تأمین نماید. لذا در این سیستم، توان خروجی چند منبع تجدیدپذیر در کنار هم، از کفایت<sup>۴</sup> و ثبات قابل قبولی برخوردار است. همچنین در صورت قرار داشتن منبع ذخیره‌سازی در کنار این منابع، توان خروجی سیستم کاملاً صاف می‌شود و می‌تواند بار سیستم را با اطمینان بسیار بالایی تأمین می‌نماید (ژو و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۱۰: ۳۸۷).

1- Kanase Patil et al.  
 2- Tanrioven  
 3- Integrated Renewable Energy System  
 4- Adequaty  
 5- Zhou et al

از سوی دیگر توجه ویژه به ذخیره‌سازی انرژی برق طی دهه اخیر، ریشه در چهار عامل اساسی دارد ۱- پیشرفت‌های تکنولوژیکی- اقتصادی در فرآیندهای ذخیره‌سازی برق؛ ۲- افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی به ویژه نوسان قیمت گاز طبیعی؛ ۳- توسعه بازارهای مقررات‌زدایی شده و خصوصی‌سازی در بازارهای انرژی از جمله بازارهای برخوردار از خدمات جانبی ارزشمند و ۴- چالش‌های مرتبط با تاسیس خطوط انتقال جدید و امکانات توزیعی متناسب با شبکه قدرت (دینهولم و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۰: ۹) در این میان مسئله مهمی که امروزه در سیستم‌های قدرت (به ویژه شبکه قدرت ایران)، مورد توجه بسیار برنامه‌ریزان و بهره‌برداران سیستم است، تغییرات زیاد و عدم یکنواختی منحنی بار در ساعات مختلف شبانه‌روز است. این موضوع باعث شده تنها در ساعات پیک بار از تمامی ظرفیت نصب شده تولید کشور استفاده شود و در ساعات کم باری و میان باری، مقدار زیادی از ظرفیت نصب شده خارج از مدار باشد. این مطلب به معنای خواب سرمایه است. این مشکل تقریباً در تمامی شبکه‌های قدرت دنیا با منحنی‌های بار با تغییرات زیاد مشاهده می‌شود. این موضوع محققان را برآن داشته تا با نگاهی به تجربیات بشر و پیش زمینه ذخیره‌سازی از دیرباز، در اندیشه ذخیره کردن انرژی الکتریکی باشند. با توجه این‌که هزینه تولید برق و قیمت فروش آن در ساعات مختلف شبانه روز با توجه به راه اندازی بازار برق، تفاوت‌های چشمگیری دارد، ایده ذخیره‌سازی برق در ساعات غیر پیک (برق ارزان) و استفاده از آن در ساعات پیک (برق گران) مطرح شده است.

در این میان یکی از سوالات اساسی در حیطه برنامه‌ریزی قدرت، نحوه ساماندهی سیستم‌های هیبرید باد- خورشید- فسیلی است، به نحوی که بتوان قابلیت اطمینان تولید و پایداری شبکه را تأمین نمود. به عبارت دیگر در صورت ورود سه تعدیل اشاره شده در پژوهش کاناسه‌پتیل و همکاران (۲۰۱۱)، چه تغییری در شرایط سیستم تولید ایجاد خواهد شد؟ و آیا تعدیل سیستم تولید با «ورود حداکثر پتانسیل برق تجدیدپذیر بادی و خورشیدی به سیستم تولید<sup>۲</sup>» و «اضافه نمودن سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده»، به لحاظ فنی- اقتصادی امکان پذیر خواهد بود؟ بر این اساس در پژوهش

1- Denholm et al

۲- در این پژوهش برای ورود تعدیل استفاده حداکثری از پتانسیل برق تجدیدپذیر بادی و خورشیدی، از اصطلاح سناریوی زیست‌محیطی سبد تولید هیبرید باد-خورشید- فسیلی استفاده شده است؛ زیرا در صورت استفاده حداکثری از برق تجدیدپذیر بادی و خورشیدی، کمترین میزان انتشار در سیستم تولید به وقوع خواهد پیوست. پیشنهاد برنامه‌ریز سیستم تولید در شرایط معیار قرار دادن حفاظت زیست‌محیطی، استفاده از حداکثر پتانسیل تولید برق تجدیدپذیر است.

حاضر برای پاسخ به این سوالات و ارائه راه‌کار، ابتدا مبانی نظری تولید هیبرید تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر ذکر شده تا ضرورت و مزایای ایجاد واحدهای ذخیره‌ساز در سیستم تولید قدرت، مشخص گردد. در ادامه پس از اشاره‌ای کوتاه به روش‌های مختلف ذخیره‌سازی برق، مبانی نظری ذخیره انرژی برق در واحد ذخیره‌ساز هوای فشرده بررسی می‌شود. در بخش سوم، ادبیات پژوهش و در بخش چهارم، مدل و داده‌های موضوع به‌منظور شبیه‌سازی سیستم تولید قدرت در محدوده شرکت برق منطقه‌ای خراسان و در ادامه نتایج شبیه‌سازی و مدل پژوهش ارائه شده‌اند. بخش‌هایی نیز به نتیجه‌گیری و دلالت‌های پژوهش اختصاص پیدا کرده است.

## ۲- مبانی نظری

### مبانی نظری تولید هیبرید تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر

پیش از دوره مدرنیسم، اروپا به دلیل برخورداری از پتانسیل بالای منابع آبی، بسیاری از مصارف انرژی خود را از این طریق تأمین می‌نمود. استفاده از چرخ‌چاه عمودی را می‌توان به‌عنوان اولین تکنولوژی تولید انرژی تجدیدپذیر (که استفاده از آن دو قرن پیش از میلاد مسیح در اروپا رواج فراوانی یافته بود) قلمداد کرد (رینولدز<sup>۱</sup>، ۱۹۸۳: ۷). اما ورود انرژی بخار به معادن انگلستان در قرن ۱۸ میلادی، آغازی عصر جدید تکنولوژی‌های تولید انرژی را نوید می‌داد و با اختراع موتورهای بخاری توسط جیمز وات<sup>۲</sup> افق‌های جدیدی پیش‌روی فرآیندهای تولید انرژی گشوده شد. سرانجام اولین موتور پرفشار بخاری در سال ۱۸۷۶ در فیلادلفیا با موفقیت نصب و راه‌اندازی شد و این تکنولوژی به سرعت در صنعت کشتی‌رانی و راه‌آهن مورد استفاده قرار گرفت (هیدنل و لوبار<sup>۳</sup>، ۱۹۸۶: ۲۳). می‌توان موتور بخار را یک شاه‌راه حیاتی برای ایجاد ارتباط میان منابع انرژی فسیلی و صنعتی شدن تلقی نمود (باربور و همکاران<sup>۴</sup>، ۱۹۸۲: ۳). با این حال در پایان قرن هجدهم، پدیده‌ای به نام انرژی الکتریکی پا به میدان گذاشت که جهانیان را با نوع جدیدی از انرژی آشنا نمود که از طریق سیم منتقل می‌شد (هانتر و بریانت<sup>۵</sup>، ۱۹۹۱: ۱۷۴). در اوایل قرن بیستم، برق به منبع تأمین انرژی مطلوب در جوامع بشری تبدیل شده بود و دانشمندان تحقیقات مداومی را برای تبدیل انواع انرژی

- 1- Reynolds
- 2- James Watt
- 3- Hindle and Lubar
- 4- Barbour et al.
- 5- Hunter and Bryant

به برق آغاز کردند. متأسفانه در دهه ۱۹۶۰ کارایی مصرف سوخت در تولید برق کاهش قابل‌ملاحظه‌ای یافت و این مسئله منجر به افزایش هزینه تمام‌شده تولید برق گردید. به‌علاوه جنبش‌های زیست‌محیطی رو به رشدی در حال شکل‌گیری بودند که خواهان مقابله با آثار مخرب زیست‌محیطی نیروگاه‌ها بودند. از این رو مصرف بی‌رویه سوخت‌های فسیلی مورد انتقاد جدی قرار گرفت. در چنین شرایطی استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مورد توجه ویژه پژوهشگران حوزه انرژی قرار گرفت (کووک<sup>۱</sup>، ۲۰۰۹: ۲۸۰). در این میان ماهیت زیربنایی امنیت انرژی و لزوم تنوع بخشی روش‌های تولید برق و لزوم بهره‌گیری از منابع تجدیدپذیر، به احساس عدم امنیت و اطمینان همیشگی برنامه‌ریزان انرژی و اندیشمندان اقتصادی در مورد منابع پایان‌پذیر انرژی و پیامدهای منفی تولید و مصرف بی‌رویه این منابع باز می‌گردد. این تهدید همیشگی، جزء لاینفک تمامی مطالعات انجام‌شده در حوزه برنامه‌ریزی انرژی بوده است. مسأله پایان‌پذیری منابع فسیلی اولین بار در چارچوب نگرانی‌های مرتبط با استخراج بی‌رویه ذغال‌سنگ در سال ۱۸۶۵ در ادبیات نظری علم اقتصاد ارائه شد. در عین حال لزوم استفاده از منابع تجدیدپذیر و تکنولوژی‌های پاک در مطالعات اقتصادی به مباحث توسعه پایدار باز می‌گردد؛ زیرا از یک سو با توجه به لزوم تنوع در تولید انرژی و به دلیل پاک بودن انرژی‌های نو، تولید برق از طریق این منابع، مقرون به صرفه است و از سوی دیگر ارزیابی اهمیت اقتصادی نابودی محیط زیست و یافتن علل اقتصادی آن در کنار ارائه اهرم‌های ایجاد انگیزه اقتصادی لازم به‌منظور کند کردن، متوقف کردن معکوس کردن این روند اساس منطقی اقتصاد محیط‌زیست را تشکیل می‌دهد (دالی و کاب<sup>۲</sup>، ۱۹۹۰: ۱۷).

### روش‌های ذخیره‌سازی برق

روش‌های کنونی مورد مطالعه ذخیره‌سازی برق را می‌توان در پنج مورد خلاصه نمود  
 ۱- ذخیره‌سازی چرخ طیار<sup>۳</sup>؛ ۲- ذخیره‌سازی هوای فشرده<sup>۴</sup> (CAES)؛ ۳- ذخیره‌سازی

1- Cooke  
 2- Daly and Cobb  
 3- Flywheel Energy Storage  
 4- Compressed Air Energy Storage

حرارتی<sup>۱</sup>؛ ۴- ذخیره ساز مغناطیسی ابر رسانا<sup>۲</sup>؛ ۵- ذخیره ساز ابرخازن<sup>۳</sup> (طباطبایی و عسکری، ۱۳۸۶، صص ۳۶-۳۴؛ با تلخیص).

نحوه عملکرد یک سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده به این صورت است که در ساعات غیر پیک برق را از شبکه می‌گیرد و به وسیله یک کمپرسور هوا را فشرده ساخته و در داخل محفظه‌ای ذخیره می‌کند. هوای فشرده را می‌توان با تلفات بسیار اندک در محفظه نگهداری کرد. در مواقع لزوم، هوای فشرده از محفظه خارج شده، در یک اتاق احتراق با مقداری سوخت مخلوط و پس از احتراق وارد یک توربین گازی می‌شود و در نهایت با استفاده از ژنراتور، برق تولید می‌گردد. این ذخیره ساز در عمل کار کمپرسور در نیروگاه گازی را به انجام می‌رساند. از آنجا که بیش از نیمی از ظرفیت تولید توربین‌های گازی برای چرخاندن کمپرسور مورد استفاده قرار می‌گیرد، لذا با روش سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده می‌توان کار کمپرسور نیروگاه را در ساعات پیک انجام داد و کمپرسور نیروگاه از مدار خارج و قابلیت تولید تقریباً دو برابری را به دست آورد. ظرفیت‌های معمول سیستم‌های ذخیره‌ساز هوای فشرده، حدود ۵۰ تا ۳۰۰ مگاوات است و به دلیل تلفات کم این سیستم، طول دوره ذخیره گاهی به یک سال هم می‌رسد. زمان راه اندازی سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده کمتر از ۱۰ دقیقه است که نسبت به زمان مشابه برای نیروگاه‌های گازی (۳۰-۲۰ دقیقه) بسیار کمتر است. چگالی انرژی معمول هوای فشرده در حدود ۱۰۸۶ ژول بر گرم است. نمونه‌های اجرایی شده سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده شامل واحد ۲۹۰ مگاواتی هانتورف<sup>۴</sup> در آلمان و واحد ۱۱۰ مگاواتی مکینتاش<sup>۵</sup> در آمریکا می‌باشد.

#### مبانی ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی در واحد ذخیره‌ساز هوای فشرده (CAES)

برای ذخیره‌سازی انرژی برق می‌بایست استراتژی اقتصادی- تجاری<sup>۶</sup>، به منظور بهینه‌سازی سود خالص خرید و فروش برق مدنظر قرار گیرد. بدین منظور بر مبنای نوسانات قیمتی بازار و هزینه‌های عملیاتی ذخیره‌سازی (شامل هزینه سوخت)، ظرفیت

- 
- 1- Electric Thermal Storage
  - 2- Superconducting Magnetic Energy Storage
  - 3- Super Capacitor
  - 4- Huntorf
  - 5- Macintosh
  - 6- business-economic strategy



بهینه ذخیره‌سازی تعیین می‌شود<sup>۱</sup>. در حقیقت فرض اساسی و بدیهی در این استراتژی این است که ذخیره‌سازی تنها در صورتی توجیه اقتصادی داشته و سودآور خواهد بود که قیمت پیشنهادی فروش به بازار، بالاتر از قیمت خرید از بازار به‌علاوه هزینه‌های ذخیره‌سازی باشد<sup>۲</sup>. تفاوت میان قیمت پیشنهادی فروش به بازار و قیمت خرید از بازار را می‌توان بر مبنای فاکتور افزایش<sup>۳</sup> (AF) و فاکتور تکاثر<sup>۴</sup> (MF) محاسبه نمود. روابط (۱-۲) و (۲-۲) نشان‌دهنده ویژگی‌های تکنولوژیکی-اقتصادی مرتبط با این دو فاکتور هستند (لوند<sup>۵</sup>، ۲۰۱۴: ۱۴۷):

$$MF_{CAES} = \frac{1}{(\alpha_{compressor} * \mu_{turbine})} \quad (1-2)$$

$$AF_{CAES} = VOC_{turbine} + [(VOC_{compressor} + TAX_{compressor}) / (\alpha_{compressor} * \mu_{turbine})] + [\varphi_{CAES} * (P_{N_{gas}} + P_{Handling-N_{gas}} + TAX_{N_{gas}-CAES}) * 3.6] \quad (2-2)$$

در روابط (۱-۲) و (۲-۲)،  $VOC_{turbine}$  نشان‌دهنده هزینه‌های عملیاتی متغیر مربوط به توربین است که بر اساس میزان تلفات موجود در فرآیند عملیاتی توربین، تعدیل شده است؛  $VOC_{compressor}$  هزینه‌های عملیاتی متغیر مربوط به کمپرسور،  $TAX_{compressor}$  مالیات کمپرسور،  $\alpha_{compressor}$  کارایی کمپرسور،  $\mu_{turbine}$  کارایی توربین است که خروجی انرژی الکتریکی به ازای هر واحد ورودی انرژی ذخیره‌شده را نشان می‌دهد،  $\varphi_{CAES}$  نسبت سوخت ورودی به میزان انرژی الکتریکی خروجی از واحد ذخیره‌ساز هوای فشرده است. همچنین  $P_{N_{gas}}$  قیمت سوخت گاز طبیعی،  $P_{Handling-N_{gas}}$  هزینه حمل و نقل گاز طبیعی و  $TAX_{N_{gas}-CAES}$  میزان مالیات بر سوخت گاز طبیعی مورد استفاده در واحد ذخیره‌ساز هوای فشرده را نشان می‌دهند. بر اساس فرض اساسی استراتژی اقتصادی-تجاری ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی، باید رابطه (۳-۲) میان قیمت پیشنهادی فروش به بازار ( $P_{sell}$ ) و قیمت خرید از بازار ( $P_{buy}$ ) برقرار باشد (لوند، ۲۰۱۴: ۱۴۸):

$$P_{sell} > P_{buy} * AF_{CAES} * MF_{CAES} \quad (3-2)$$

۱- در واحد ذخیره‌ساز هوای فشرده، کمپرسور (Compressor) مبدل انرژی الکتریکی به انرژی پتانسیل است و توربین (Turbine) وظیفه تبدیل انرژی پتانسیل به انرژی الکتریکی را بر عهده دارد.

۲- این اختلاف قیمتی را می‌توان بر اساس حاشیه سود مورد انتظار ناخالص برای ذخیره‌سازی برق در نظر گرفت.

3- Addition factor

4- Multiplication factor

5- Lund

بنابراین اگر تفاضل قیمتی مشخصی ( $P_{diff}$ )، میان قیمت خرید ( $P_{buy}$ ) و میانگین قیمت بازار ( $P_{Ave}$ ) و همچنین میان قیمت فروش و میانگین قیمت بازار وجود داشته باشد، می‌توان واحد ذخیره‌ساز هوای فشرده (CAES) را سودآور تلقی نمود. این تفاضل قیمتی در روابط (۴-۲) و (۵-۲) مشخص شده است (همان):

$$P_{sell} = P_{Ave} + P_{diff} \quad (۴-۲)$$

$$P_{buy} = P_{Ave} - P_{diff} \quad (۵-۲)$$

میزان این تفاضل قیمتی مشخص ( $P_{diff}$ )، بستگی به ویژگی‌های تکنولوژیکی-اقتصادی سیستم ذخیره‌ساز انرژی دارد. می‌توان رابطه میان تفاضل قیمتی، میانگین قیمت بازار و ویژگی‌های تکنولوژیکی-اقتصادی یک واحد ذخیره‌ساز هوای فشرده را به صورت رابطه (۶-۲) بیان نمود (همان):

$$P_{diff} = [P_{average} * (1 - \alpha_{compressor} * \mu_{turbine}) + cons] / (\alpha_{compressor} * \mu_{turbine} + 1) \quad (۶-۲)$$

در رابطه (۶-۲)، عبارت  $cons$  نشان‌دهنده هزینه‌های عملیاتی متغیر مربوط به کمپرسور، توربین و سوخت مورد استفاده در واحد ذخیره‌ساز هوای فشرده است و می‌توان معادل تکنولوژیکی-اقتصادی آن را با رابطه (۷-۲) نشان داد (همان):

$$cons = VOC_{compressor} + TAX_{compressor} + (VOC_{turbine} * \alpha_{compressor} * \mu_{turbine}) \quad (۷-۲)$$

$$+ [\varphi_{CAES} * (P_{N_{gas}} + P_{Handling-N_{gas}} + TAX_{N_{gas}-CAES}) * 3.6 * (\alpha_{compressor} * \mu_{turbine})]$$

اکنون بر اساس روابط (۴-۲) و (۵-۲) و معادل تکنولوژیکی-اقتصادی  $P_{diff}$  در رابطه (۷-۲)، می‌توان رابطه میانگین قیمت در دوره آتی ( $P_{Ave}$ ) و حداقل قیمت خرید ( $P_{buy-max}$ ) و حداکثر قیمت فروش ( $P_{sell-min}$ ) را با روابط (۸-۲) و (۹-۲) مشخص نمود:

$$P_{sell-min} = P_{Ave} + P_{diff} \quad (۸-۲)$$

$$P_{buy-max} = P_{Ave} - P_{diff} \quad (۹-۲)$$

چنانچه قیمت بازار ( $P_{mkt-sys}$ ) بالاتر از حداقل قیمت فروش ( $P_{sell-min}$ ) باشد و تولید متوازن توربین ( $BP_{turbine}$ ) نیز نشان‌دهنده میزان بهره‌برداری بهینه از توربین بر اساس هزینه نهایی تولید باشد، آن‌گاه می‌توان توربین را در سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده به کار گرفت و میزان تولید بهینه برق ( $ELC_{turbine}$ ) به شرط برآورده شدن شرط راه‌اندازی را می‌توان با رابطه (۱۰-۲) نمایش داد (همان):

$$\text{If } P_{\text{mkt-sys}} > P_{\text{sell-min}} \text{ then } ELC_{\text{turbin}} = \text{Min}(C_{\text{turbin}}, BP_{\text{turbin}}) \quad (10-2)$$

در حقیقت بر اساس رابطه (۱۰-۲)، چنانچه تولید بهینه توربین ( $BP_{\text{turbin}}$ ) با برآورده شدن قیود قیمتی بازار و هزینه نهایی تولید، بیش از حداکثر ظرفیت تولید توربین ( $C_{\text{turbin}}$ ) باشد، میزان تولید انرژی در سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده ( $ELC_{\text{turbin}}$ ) به میزان حداکثر ظرفیت تولید توربین محدود خواهد بود.

همچنین چنانچه قیمت بازار پایین‌تر از حداکثر قیمت خرید ( $P_{\text{buy-max}}$ ) باشد و مصرف متوازن کمپرسور ( $BP_{\text{compressor}}$ ) نیز نشان‌دهنده میزان مصرف بهینه کمپرسور بر اساس هزینه نهایی راه‌اندازی کمپرسور در شبکه باشد، آن‌گاه شرط راه‌اندازی کمپرسور در سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده تأمین خواهد شد و میزان مصرف برق کمپرسور ( $CON_{\text{compressor}}$ ) به شرط برآورده شدن شرط راه‌اندازی را می‌توان با رابطه (۱۱-۲) نمایش داد (همان: ۱۴۹):

$$\text{If } P_{\text{mkt-sys}} < P_{\text{buy-max}} \text{ then } CON_{\text{compressor}} = \text{Min}(C_{\text{compressor}}, BP_{\text{compressor}}) \quad (11-2)$$

در حقیقت بر اساس رابطه (۱۱-۲)، چنانچه مصرف بهینه کمپرسور ( $BP_{\text{compressor}}$ ) با برآورده شدن قیود قیمتی بازار و هزینه نهایی تولید، بیش از حداکثر ظرفیت مصرف کمپرسور ( $C_{\text{compressor}}$ ) باشد، میزان مصرف انرژی در سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده ( $CON_{\text{compressor}}$ ) به میزان حداکثر ظرفیت مصرف کمپرسور محدود خواهد شد.

بنابراین گنجایش بهینه ذخیره‌سازی انرژی در زمان  $t$  به میزان ذخیره انرژی در زمان  $t-1$  ( $S_{\text{CAES}(t-1)}$ ) و ویژگی‌های تکنولوژیکی-اقتصادی توربین و کمپرسور بستگی دارد. بر این اساس در یک واحد ذخیره‌ساز هوای فشرده به صورت رابطه (۱۲-۲) خواهد بود (همان):

$$S_{\text{CAES}(t)} = S_{\text{CAES}(t-1)} + [CON_{\text{compressor}} * \alpha_{\text{compressor}}] - [ELC_{\text{turbin}} * \mu_{\text{turbin}}] \quad (12-2)$$

اگر ظرفیت بهینه ذخیره‌سازی از ظرفیت واحد ذخیره‌ساز هوای فشرده فراتر رود، میزان بهره‌برداری از کمپرسور در واحد ذخیره‌سازی کاهش یافته و در مقابل اگر میزان ذخیره‌سازی کاهش یابد، تولید توربین کاهش خواهد یافت تا گنجایش ذخیره‌سازی به صفر برسد. بنابراین بر اساس شرایط لحظه‌ای-ساعتی سیستم تولید و قیمت بازار، امکان راه‌اندازی همزمان کمپرسور و توربین به طور همزمان وجود دارد. راه‌اندازی کمپرسور و توربین در صورتی به لحاظ فنی امکان‌پذیر و به لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر است که واحد ذخیره‌ساز هوای فشرده، مانند یک توربین گازی تلقی شده و که دو شرط بالا بودن

قیمت برق در بازار و پایین بودن قیمت گاز طبیعی مورد استفاده در واحد ذخیره‌ساز هوای فشرده تأمین گردد.

به دلیل تفاوت‌هایی که میان ظرفیت بهینه ذخیره‌سازی در ابتدا و انتهای محاسبات لحظه‌ای - ساعتی وجود دارد، ممکن است خطاهایی در سیستم ترازبایی واحد تولیدی ذخیره‌ساز ایجاد گردد که به منظور تصحیح این اشتباهات محاسباتی احتمالی، ظرفیت بهینه ذخیره‌سازی به صورت پیاپی و تکراری<sup>۱</sup> محاسبه می‌شود تا جایی که ظرفیت بهینه ذخیره‌سازی در انتها و ابتدای محاسبات لحظه‌ای - ساعتی یکسان شده و تفاوت میان ارقام بهینه ابتدا و انتهای دوره محاسبات درآمدی و فنی به صفر نزدیک شود (همان).

### ۳- ادبیات پژوهش

مطالعات متعددی در زمینه سیستم‌های هیبرید فسیلی - تجدیدپذیر انجام شده که، در این بخش به ۱۰ مورد از جدیدترین و مهمترین این مطالعات (داخلی و خارجی) اشاره خواهد شد:

ادریسیان و همکاران (۱۳۹۱) الگوی جدیدی برای هیبرید هوای فشرده در مزارع بادی ارائه کرده‌اند. در این مقاله ضمن پرداختن به چالش‌های موجود در تولیدات مزارع بادی و مدیریت مصرف شبکه با معرفی اجمالی روش ذخیره سازی هوای فشرده، یک سیستم هیبرید بر مبنای ذخیره‌سازی هوای فشرده برای تفکیک زمانی تولید و مصرف مزارع بادی ارائه شده است.

ارشادی عباس‌آباد و همکاران (۱۳۹۲) سیستم هیبریدی باد- دیزل- ذخیره هوای فشرده را بر مبنای الگوریتم ژنتیک بهینه نمودند. به منظور بهینه سازی عملکرد سیستم و کاهش هزینه‌های مصرفی، راه‌های فنی قابل دسترس سوپرشارژ کردن موتور دیزل در سیستم باد - دیزل با نفوذ بالا به همراه استفاده از سیستم ذخیره سازی انرژی هوای فشرده، مورد مطالعه قرار گرفت و که نتایج حاصل از بهینه سازی نشان می‌دهد که استفاده از سیستم هوای فشرده، کاهش مصرف سوخت را تا ۵۰ درصد در پی دارد.

اخلاقی و همکاران (۱۳۹۲) تأثیر منابع تجدیدپذیر و ذخیره ساز انرژی در بهره برداری بهینه روزانه از شبکه‌های توزیع را مورد بررسی قرار دادند. در این مقاله از منابع نامحدود انرژی باد و خورشید در قالب منابع تجدیدپذیر تولید پراکنده در کنار ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده بهره گرفته شده و با به‌کارگیری الگوریتم بهینه سازی چند منظوره

ژنتیک مبتنی بر مرتب سازی نامغلوب، برنامه ریزی بهینه کوتاه مدت به منظور کنترل واحدهای تولید پراکنده و تعیین وظایف تجهیزات تحت کنترل در شبکه نمونه برای رسیدن به اهداف تعیین شده ارائه شده است.

هادی و حقیقی خوشخو (۱۳۹۳) با طراحی مفهومی سیستم ذخیره سازی انرژی هوای فشرده در مقیاس کوچک (Micro CAES) به همراه توربین بادی آن را برای تأمین برق یک واحد مسکونی در منطقه روستای کهک مورد استفاده قرار داده و نتایج مربوط به تولید و جریان شارژ را محاسبه نموده‌اند.

کاناسه‌پتیل و همکاران (۲۰۱۱)، با مدلی بهینه از ادغام منابع تجدیدپذیر<sup>۱</sup> (IREOM)، انرژی مورد نیاز برای پخت و پز و برق مورد نیاز تعدادی از روستاهای دورافتاده در هند را شبیه‌سازی کرده‌اند. در این مدل، اندازه منابع در دسترس در آن منطقه (مانند نیروگاه آبی کوچک<sup>۲</sup>، سیستم زیست‌توده<sup>۳</sup>، سیستم بیوگاز<sup>۴</sup>، سیستم بادی و سیستم خورشیدی) به گونه‌ای تعیین می‌شود تا یک ترکیب بهینه برای منطقه مورد مطالعه به دست آید. در این ترکیب بهینه، هزینه انرژی تولیدی در یک مقدار قابل اطمینان مشخص، برای هر چهار پروفایل بار فصلی کمینه شده است.

تاسیکاراوغلو و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۱۲) روش بهینه‌سازی ظرفیت سیستم انرژی هیبرید توربین بادی- سلول سوختی<sup>۶</sup> (FC)- باتری را بررسی نمود که هدف اصلی آن بهینه‌سازی هیدروژن استفاده‌شده در سیستم و درعین حال تضمین تأمین کامل بار می‌باشد. همچنین این پژوهش برای بهینه‌سازی هیدروژن استفاده شده یک کنترل‌گر تخمین قدرت باد ارائه داده که متناسب با قدرت تولیدی باد و بار مورد نیاز، توان تولیدی سلول سوختی را تعیین می‌کند.

در پژوهش تاکاگی و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۱۳)، سیستم خورشیدی خودروهای الکتریکی را از نظر اقتصادی بررسی کردند و مقدار باتری خودروهای الکتریکی و اینورتر مورد نیاز را محاسبه و عدم قطعیت خودروهای الکتریکی را نیز مدل‌سازی نموده‌اند.

کابالرو و همکاران<sup>۸</sup> (۲۰۱۳) با شبیه‌سازی فرآیند تولید برق در شهر هانگاروا<sup>۹</sup> در جزیره ایستر شیلی<sup>۱</sup>، تأثیر ایجاد یک سیستم انرژی هیبریدی<sup>۲</sup> (HES) را با در نظر

1- Integrated Renewable Energy System

2- Micro Hydro Power

3- Biomass

4- Biogas

5- Tascikaraoglu et al.

6- Fuel Cell

7- Takagi et al.

8- Caballero et al

9- Hanga Roa

گرفتن پانل‌های خورشیدی و توربین‌های بادی مورد بررسی قرار داده‌اند. هدف این پژوهش طراحی یک سیستم بهینه تجاری برای سیستم‌های انرژی هیبریدی کوچک‌مقیاس برای ۱۵ واحد مسکونی شهری است که بتواند هزینه طول عمر<sup>۳</sup> (LLC) سیستم را به حداقل برساند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از سیستم‌های انرژی هیبریدی، نه تنها به افزایش طول عمر سیستم تولید منجر می‌شود، بلکه از آثار زیست‌محیطی قابل توجهی نیز برخوردار است. در این میان نرخ کارایی ۸۵ درصدی ژنراتورهای بادی، کمک شایانی به بالا رفتن کارایی سیستم نموده و در مقابل کارایی صفحه‌های خورشیدی، اثر کارآمدی بر سیستم نداشته است.

پرکویچ و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۳) به امکان‌سنجی تولید برق در نیروگاه‌های بادی و بررسی اثر ماگنوس<sup>۵</sup> در استفاده از منابع بادی می‌پردازند و به دنبال مدل‌سازی فنی-اقتصادی نحوه استفاده از حداکثر پتانسیل منابع بادی هستند. سناریوهای مختلف هزینه‌ای و نیروگاهی در این پژوهش بررسی و با توجه به میزان فاصله مبدا تولید و مقصد مصرف انرژی برق حاصل از منابع بادی، امکان و قابلیت عملیاتی شدن تاسیس نیروگاه‌ها، با ظرفیت‌های مختلف، ارزیابی شده‌اند.

پرزا و اوسترگارد<sup>۶</sup> (۲۰۱۳) به ارزیابی آثار قیمتی، هزینه‌ای و زیست‌محیطی استفاده از تهویه مطبوع طبیعی به جای سیستم تهویه مطبوع الکتریکی در سیستم انرژی بخش خانگی مکزیک پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهند که این جایگزینی منجر به کاهش ۲/۸۹ میلیون تنی انتشار دی‌اکسید کربن در طول دوره تولید یکساله خواهد شد که کاهش معادل ۲/۱۷ درصدی انتشار دی‌اکسید کربن در سیستم انرژی مکزیک را به دنبال خواهد داشت. به علاوه با استفاده از سیستم تهویه مطبوع طبیعی، ۱۲/۵ میلیارد مترمکعب آب در نیروگاه‌های برق‌آبی ذخیره خواهد شد.

لیو و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۱۳) به بررسی تأثیر تولید یکپارچه نیروگاه‌های بادی تولید برق بزرگ‌مقیاس و وسایل حمل‌ونقل الکتریکی در سیستم برق استان مغولستان چین در سال ۲۰۰۹ می‌پردازند. در سال مبنای شبیه‌سازی سیستم برق، ۶/۵ درصد برق تولیدی در این بخش از کشور از طریق نیروگاه‌های بادی بزرگ‌مقیاس تولید شده بود. در بهترین سناریوی توسعه نیروگاه‌های بادی و استفاده از وسایل حمل‌ونقل الکتریکی،

1- Easter Island, Chile

2- HybridEnergy System

3- Life Cycle Cost

4- Perkovic et al

5- Magnus effect

6- Perez a and Østergaard

7- Liu et al

این رقم باید به ۸ درصد برسد و در چنین شرایطی میزان انتشار دی‌اکسید کربن به حداقل رسیده و کارایی سیستم نیز حداکثر خواهد شد. سابرو و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۳) به ارزیابی تأثیر وارد شدن انرژی‌های تجدیدپذیر به سیستم انرژی کشورهای صحرای آفریقا پرداختند و بدین منظور پتانسیل انرژی‌های خورشیدی، زیست‌توده، بادی، برق آبی و زمین‌گرمایی را مورد بررسی قرار داده‌اند. قیود مالی پروژه‌های تاسیس، عملیات و نگهداشت در کنار مزایای زیست‌محیطی و اقلیمی استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر جهت تولید برق و تأثیر آن بر سطح توسعه‌یافتگی این کشورها، بخش دیگری از این پژوهش را تشکیل می‌دهد. در پایان نویسندگان چالش‌های اصلی ایجاد یک سیستم تولید انرژی‌های تجدیدپذیر برای تولید برق را فقدان اراده سیاسی، عدم سرمایه‌گذاری و نبود کالای سرمایه‌ای کافی، عدم تحقیقات و پژوهش‌های میدانی مناسب و قابل‌اتکا، فقدان استراتژی‌های توسعه بخش انرژی و عدم آگاهی عمومی مورد تأکید قرار داده‌اند.

هینینگ و پالزر<sup>۲</sup> (۲۰۱۴) به شبیه‌سازی جامع بخش تولید همزمان برق و گرمای آلمان در فرآیند آینده‌پژوهی بخش انرژی این کشور پرداخته‌اند. در این پژوهش به جایگاه ویژه انرژی‌های تجدیدپذیر در بخش انرژی آلمان توجه زیادی شده و هزینه تولید برق در هر یک از انواع منابع و تکنولوژی‌های مرتبط با سناریوهای جایگزین مقایسه شده است. در این سیستم شبیه‌سازی شده، امکان ذخیره‌سازی انرژی نیز پیش‌بینی و در نهایت سناریوی با کمترین هزینه ممکن انتخاب شده است. از این رو در مسئله بهینه‌یابی سناریوهای این پژوهش، کمترین هزینه تولید به عنوان بهینه‌نهایی معرفی خواهد شد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بخشی از تقاضای گرمایش و الکتریسته آلمان (که حدود ۶۲ درصد تقاضای انرژی این کشور را تشکیل می‌دهد) را می‌توان از طریق منابع تجدیدپذیر تأمین نمود به نحوی که علاوه بر برآورده شدن قیود سیستم تولید، ۱۰۰ درصد تقاضای بخش ساختمانی تأمین خواهد شد. نکته جالب توجه در یافته‌های این پژوهش آن است که پس از ورود منابع تجدیدپذیر به سیستم تولید برق این کشور، هزینه تولید و عرضه بلندمدت برق تغییر نکرده و منجر به گران‌تر شدن تولید نخواهد شد.

---

1- Suberu et al

2- Henning and Palzer

#### ۴- مدل و داده‌های پژوهش

در این پژوهش برای شبیه‌سازی سیستم تولید از روش برنامه‌ریزی آنالیزی<sup>۱</sup> با رویکرد همزمان توصیفی-تجویزی<sup>۲</sup> استفاده شده است. برنامه‌ریزی آنالیزی یکی از روش‌های نوین بهینه‌یابی عددی است که مبانی آن اولین بار توسط زلینکا<sup>۳</sup> (۲۰۰۱) و (۲۰۰۲ a و b) ارائه شد. در برنامه‌ریزی آنالیزی، مجموعه‌ای از توابع، عملگرها و بستارها تعریف می‌شوند و امکان تغییرپذیری یا ثابت بودن در طول زمان، برای تمامی متغیرها وجود دارد. می‌توان با استفاده از توابع، عملگرها و بستارهای موجود، برنامه‌ریزی آنالیزی را تحت یک مجموعه از مسائل تعریف نمود که پژوهشگر به دنبال یافتن راه‌حلی مناسب برای آنها باشد. به دلیل ماهیت تغییرپذیر مجموعه مسائل، از اصطلاح مجموعه تابعی عمومی<sup>۴</sup> (GFS) برای نام‌گذاری آن استفاده می‌شود. در برنامه‌ریزی آنالیزی پاسخ‌هایی مناسب شناخته خواهند شد که نگاشت<sup>۵</sup> اعضای مجموعه تابعی به مجموعه‌ای از برنامه‌های احتمالی و عملیاتی باشند. به علاوه در مجموعه تابعی عمومی، زیرمجموعه‌هایی حضور دارند که هر یک دربردارنده تعدادی تابع هستند. تعداد توابع موجود در هر زیر مجموعه نیز، کوچکتر یا مساوی تعداد اجزای زیرمجموعه است. به دست آوردن نگاشت اعضای مجموعه تابعی از یک فرآیندی دو بخشی تبعیت می‌کند: بخش اول ارزیابی مجموعه گسسته<sup>۶</sup> (DSH) و بخش دوم طراحی فرآیندهای تضمین‌کننده است. فرآیند ارزیابی مجموعه گسسته توسط زلینکا (۲۰۰۴) و زلینکا و همکاران (۲۰۰۵) در ایجاد یک شاخص گسسته مورد استفاده قرار گرفت که در یک فرآیند تکاملی همانند ارزیابی افراد جایگزین در ساختار لانه‌ای<sup>۷</sup> به خوبی می‌تواند راه‌حل مناسب را ارائه کند. از این رو می‌توان برنامه‌ریزی آنالیزی را در مورد مسائل دقیق ریاضی، شبیه‌سازی‌های سیستمی و برنامه‌ریزی‌های انرژی بخشی مورد استفاده قرار داد.

داده‌های توان، تولید، تقاضا و هزینه نیروگاه‌های فسیلی و تجدیدپذیر محدوده شرکت برق منطقه‌ای خراسان بر اساس اطلاعات و آمار سال پایه ۱۳۹۱ در سیستم شبیه‌سازی وارد شده‌اند. داده‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی سیستم در سناریوی اولیه سال پایه، در پیوست پژوهش (جدول ۱-۰ تا جدول ۴-۰) گزارش شده‌اند. برای

- 
- 1- Analytical programming
  - 2- Descriptive-Prescriptive
  - 3- Zelinka
  - 4- General Functional Set
  - 5- Mapping
  - 6- Discrete Set Handling
  - 7- Nested structure



محاسبه قیمت تمام شده تولید (که بر اساس مجموع هزینه نهایی تولید در لحظه t محاسبه می‌شود). از روش هزینه‌های هم‌ترازسازی شده تولید استفاده شده است. اقلام هزینه‌ای تولید شامل هزینه‌های عملیاتی (متغیر و ثابت) و هزینه‌های سرمایه‌گذاری می‌شوند. مراجع کسب اطلاعات لازم برای شبیه‌سازی سیستم، دفتر بودجه معاونت برنامه‌ریزی و تحقیقات شرکت برق منطقه‌ای خراسان، دفتر بازار برق، دفتر فنی نظارت بر تولید معاونت بهره‌برداری شرکت برق منطقه‌ای خراسان، دفتر اطلاعات و آمار شرکت برق منطقه‌ای خراسان، شرکت مدیریت تولید نیروی برق خراسان (نیروگاه‌ها) و دفتر پشتیبانی فنی و برنامه‌ریزی تولید شرکت توانیر می‌باشند<sup>۱</sup>.

مجموع ولتاژ نامی پست‌های انتقال شرکت‌های برق منطقه‌ای مجاور (سمنان، سیستان، یزد و مازندران) و خطوط انتقال بین‌المللی سرخس- شاتلیق و تربت جام- هرات، در مجموع ۱۹۶۲ کیلوولت است که ظرفیت ترانسی معادل ۲۵۲۵۵۵ مگاوات آمپر را در اختیار پست‌های انتقال قرار می‌دهد. علاوه بر قیود خطوط انتقال، یکی از قیود اصلی در سیستم‌های هیبرید تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر تولید قدرت، تأمین قابلیت اطمینان سیستم تولید است که بر اساس آن، باید درصد معینی از تولید کل انرژی الکتریکی شبکه از واحدهای تولیدی پایدارساز شبکه تأمین شود که در اکثر مطالعات ۳۰ درصد تعیین شده است. نیروگاه‌های فسیلی (گازی، بخاری و سیکل ترکیبی) در کنار نیروگاه‌های زمین‌گرمایی و هسته‌ای از جمله تکنولوژی‌های تولیدی هستند که توانایی پایدارسازی شبکه را دارند (لوند<sup>۲</sup>، ۲۰۱۴: ۸۶). در پژوهش حاضر نیز حداقل سهم واحدهای تولیدی پایدارساز در شبکه تولید، ۳۰ درصد تعیین شده است.

در مورد میزان استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در شرکت برق منطقه‌ای خراسان، مطالعاتی مقدماتی با هدف آشنایی با وضعیت استفاده از این انرژی، چالش‌های استفاده از آن‌ها و راه‌کارهای مورد استفاده در کشورهای برتر صورت گرفته است. در گام دوم پروفایل انرژی شرکت برق منطقه‌ای خراسان، بر اساس نظرات کارشناسی اولیه و پیش‌بینی‌های محاسباتی کارشناسی، تهیه گردید (شرکت برق منطقه‌ای خراسان، ۱۳۹۱: ۱۴). بر این اساس خراسان بزرگ به لحاظ موقعیت خاص جغرافیایی، دارای پتانسیل خوبی برای نصب توربین‌های بادی است. طبق مطالعات و پتانسیل‌سنجی

۱ - بر نویسندگان پژوهش لازم است که کمال تشکر و قدردانی خود را از همکاری و مساعدت تمامی کارشناسان و مدیران صنعت برق و شرکت برق منطقه‌ای خراسان که گامی در جهت بهبود کیفی و تسهیل فرآیند تدوین این پژوهش برداشته‌اند، به عمل آورند.

ماهواره‌ای انجام گرفته در شرکت برق منطقه‌ای خراسان (۱۳۹۱)، این استان دارای ۱۴ میلیون هکتار زمین با شدت وزش مناسب باد است و با فرض تخصیص ۲۰ هکتار زمین برای هر مگاوات توربین و با حفظ حریم توربین‌ها، این منطقه پتانسیل نصب ۷ هزار مگاوات توربین بادی را دارد (همان: ۱۰؛ شرکت مشاوره مدیریت آریانا، ۱۳۹۱). خراسان بزرگ سالانه حداقل ۳۰۰ روز آفتابی را پشت سر می‌گذارد و متوسط شدت تابش روزانه در این منطقه ۵ کیلووات ساعت در مترمربع برآورد شده است. با فرض تخصیص ۵ هکتار زمین برای هر مگاوات مولد خورشیدی و استفاده از یک درصد زمین‌های خراسان بزرگ، امکان نصب ۴۰ هزار مگاوات مولد خورشیدی در منطقه وجود دارد (همان؛ شرکت مشاوره مدیریت آریانا، ۱۳۹۱).

با توجه به دسترسی به داده‌های معتبر، سال ۲۰۱۲ نیز به عنوان سال پایه شبیه‌سازی داده‌های ورودی هزینه تولید در نظر گرفته شده است. هزینه تاسیس یک واحد ذخیره‌ساز هوای فشرده با تکنولوژی سال ۲۰۱۰ و بر اساس ارقام پیشنهادی آزمایشگاه ملی انرژی تجدیدپذیر<sup>۱</sup> (۲۰۱۲) و آژانس انرژی دانمارک<sup>۲</sup> (۲۰۱۲)، برای بازار آسیا - اقیانوسیه برای دوره ۲۰۱۵-۲۰۱۲ محاسبه و عمر مفید این واحد نیز ۳۰ سال در نظر گرفته شده است. برای پوشش ریسک، تغییرات قیمتی نیز در محاسبات مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نرخ تسعیر دلار و یورو بر اساس آمار بازار مبادلات رسمی منتشر شده در خلاصه تحولات اقتصادی کشور (۱۳۹۱)، به ترتیب ۲۴۷۵۲ و ۳۲۴۳۶ ریال است. داده‌های هزینه‌ای تاسیس واحد ذخیره‌ساز هوای فشرده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- هزینه تاسیس واحد ذخیره‌ساز هوای فشرده

ردیف	اقلام هزینه‌ای	رقم هزینه (ریال)	واحد انرژی/توان
۱	هزینه سرمایه‌گذاری	۲۲۲۷۶۸۰۰	کیلووات
۲	هزینه متغیر عملیات و نگهداشت	۳۸۳۶۵/۶	کیلووات ساعت
۳	هزینه ثابت عملیات و نگهداشت	۲۸۷۱۲۳/۲	کیلووات - سال

منبع: آزمایشگاه ملی انرژی تجدیدپذیر، ۲۰۱۲: ۵۳؛ آژانس انرژی دانمارک، ۲۰۱۲: ۱۷ و یافته‌های تحقیق

1- National Renewable Energy Laboratory

2- Danish Energy Agency (2012)

بر اساس اطلاعات دفتر بودجه معاونت برنامه‌ریزی و تحقیقات شرکت برق منطقه‌ای خراسان، هزینه سوخت گاز طبیعی برای نیروگاه‌های محدوده شرکت برق منطقه‌ای خراسان، ۷۰۰ ریال در هر مترمکعب در نظر گرفته شده است. این سوخت با نرخ تضمین شده در اختیار نیروگاه‌های گازی نیز قرار داده شده است. نرخ تنزیل سالانه سرمایه نیز بر اساس مطالعات طاهری فرد و شهاب (۱۳۸۹) و رستمی و همکاران (۱۳۹۲) در مورد پروژه‌های نیروگاهی وزارت نیرو و همچنین بر اساس مطالعات امکان‌سنجی دفتر بودجه معاونت برنامه‌ریزی و تحقیقات شرکت برق منطقه‌ای خراسان، به طور میانگین، ۱۰ درصد می‌باشد. همچنین در مورد هزینه تولید برق تجدیدپذیر بادی و خورشیدی نیز از اطلاعات دفتر بودجه معاونت برنامه‌ریزی و تحقیقات شرکت برق منطقه‌ای خراسان استفاده شده که بر اساس جداول آماری این دفتر، هزینه سرمایه‌گذاری برق خورشیدی و بادی در هر کیلووات توان به ترتیب ۱۰۴/۵ و ۳۹/۷۵ میلیون ریال و هزینه ثابت و متغیر عملیات و نگهداشت برق خورشیدی و بادی در هر مگاوات ساعت به ترتیب ۶۳۶ و ۱۵۶۸۹۷ ریال محاسبه شده است. لازم به ذکر است که این آمار بر اساس تجهیزات قابل دسترسی برای شرکت برق منطقه‌ای خراسان و متناسب با شرایط اقلیمی-تجاری شرکت برق منطقه‌ای خراسان محاسبه شده و آمار بین‌المللی یا ملی (در سایر مناطق کشور) می‌تواند تفاوت‌هایی با این آمار داشته باشد.

میزان انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی در سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده ۵۶/۹ کیلوگرم در هر گیگاژول و مالیات انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی نیز ۴۹۳۰۲۷/۲ ریال در هر تن محاسبه شده است. ارقام مربوط به میزان انتشار آلاینده و مالیات بر انتشار از آژانس انرژی دانمارک (۲۰۱۱) استخراج شده است. در این پژوهش برای شاخص‌گذاری تغییرات انتشار آلاینده زیست‌محیطی، از آلاینده دی اکسید کربن ( $CO_2$ ) استفاده شده است.

ویژگی‌های فنی با توجه به مطالعات فنی آژانس انرژی دانمارک (۲۰۱۲) و مطالعه سوکار و ویلیامز<sup>۱</sup> (۲۰۰۸) محاسبه و نسبت سوخت به طور متوسط ۱/۵ و میانگین کارایی سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده، ۳۹ درصد در نظر گرفته شده است.<sup>۲</sup> در

1- Succar and Williams

۲- برای کسب اطلاعات فنی و محاسباتی بیشتر در خصوص محاسبه نسبت سوخت ر. ک.:

EPRI-DOE, "Handbook of Energy Storage for Transmission and Distribution Applications," Palo Alto, CA, Washington, DC 2003.  
P. Zaugg, "Air-Storage Power Generating Plants," Brown Boveri Review, vol. 62, pp. 338-347, 1975.

ادامه در صفحه بعد

حقیقت تعدیل ذخیره‌سازی در این پژوهش با استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز هوای فشرده نسل اول (نظیر نیروگاه هانتورف در آلمان) انجام شده است. به منظور بررسی سناریوهای مختلف ظرفیت سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده، این سیستم با ظرفیت‌های ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ مگاواتی و ظرفیت‌های ذخیره‌سازی (به ترتیب)، ۰/۲۴، ۰/۴۹، ۰/۷۴، ۰/۹۸، ۱/۲۳ و ۱/۴۸ گیگاوات ساعتی وارد شبکه شبیه‌سازی شده برق منطقه‌ای خراسان می‌شود<sup>۱</sup>. اتکای اصلی برنامه‌ریزی آنالیزی این پژوهش بر رویکرد داده-ستاده در مدل‌سازی پایین-بالای سیستم تولید هیبرید می‌باشد و ماژول‌های شبیه‌سازی سیستم‌های هیبرید انرژی بر اساس مدل‌های پیشرفته<sup>۲</sup>. Energy PLAN 11 و 4 و energyPRO 6.3، در کنار مدل WASP-IV<sup>۳</sup> طراحی شده‌اند<sup>۴</sup>. به علاوه با توجه به امکان ایجاد یک تبادل منبع‌باز در مدل‌های رایج وجود دارد، ارتباط و تبادل نرم‌افزاری و خروجی‌های مدل‌های فوق با استفاده از بستر نرم‌افزاری اوسیموسیس<sup>۵</sup> (OSEMOSYS) انجام شده است.

## ۵- نتایج مدل

بر اساس شبیه‌سازی سیستم تولید مبتنی بر برنامه‌ریزی آنالیزی، نتایج شبیه‌سازی سیستم تولید پایه، سیستم تولید هیبرید فسیلی-تجدیدپذیر و سناریوی زیست‌محیطی سبد تولید هیبرید فسیلی-خورشیدی-بادی محاسبه شده و در جدول ۲ گزارش شده است.

ادامه از صفحه قبل

E. Macchi and G. Lozza, "Study Of Thermodynamic Performance Of and compressed air energy storage Plants, Including Unsteady Effects," in Gas Turbine Conference and Exhibition, Anaheim, CA, USA, 1987, p. 10.

برای کسب اطلاعات فنی و محاسباتی بیشتر در خصوص محاسبه کارایی سیستم ر. ک.:

I- Arsie, V. Marano, G. Nappi, and G. Rizzo, "A model of a hybrid power plant with wind turbines and compressed air energy storage," in 2005 ASME Power Conference, Chicago, IL, United States, 2005, pp. 987-1000.

۱- سناریونویسی ظرفیت‌های مختلف سیستم و ذخیره‌سازی نیز بر اساس مطالعه سوکار و ویلیامز (۲۰۰۸) طراحی شده است.

۲- این نسخه جدید از مدل EnergyPLAN در تاریخ ۲۴ می سال ۲۰۱۴ منتشر و در دسترس کاربران قرار گرفته است.

3 -Wien Automatic System Planning Package

۴- مدل‌های پیشرفته EnergyPLAN و energyPRO با همکاری گروه تحقیقاتی برنامه‌ریزی انرژی پایدار دانشگاه آلبرگ و گروه PlanEnergi دانشگاه بیرمنگام و مدل WASP نیز توسط آژانس بین‌المللی انرژی اتمی طراحی شده‌اند.

5 -OSEMOSYS: the Open Source Energy Modeling System

جدول ۲- نتایج شبیه‌سازی سیستم تولید پایه و سیستم تولید هیبرید فسیلی- تجدیدپذیر

شاخص	سناریو	مدل پایه <sup>۱</sup> (شرایط اولیه سیستم تولید)	خورشیدی <sup>۲</sup> هیبرید فسیلی- محیطی سبد تولید	سازگاری زیست- محیطی سبد تولید هیبرید فسیلی- بادی <sup>۳</sup>	سازگاری زیست- محیطی سبد تولید هیبرید فسیلی- خورشیدی- بادی <sup>۴</sup>
متوسط قیمت (ریال بر مگاوات ساعت)	۵۸۴,۸۸۵/۲۷	۶,۲۲۵,۱۸۸/۸۸	۹۵۹,۷۳۱/۳۰	۵,۸۰۱,۶۴۷/۹۱	
انتشار آلاینده زیست‌محیطی (میلیون تن)	۲۳/۱۳	۱۸/۹۱	۲۳/۱۳	۱۸/۸۵	
تولید بهینه برق تجدیدپذیر (میلیون مگاوات ساعت)	۰/۰۴	۴۶/۵۶	۱۵/۰۱	۵۷/۹	
تولید بهینه برق فسیلی (میلیون مگاوات ساعت)	۳۶/۹۲	۳۰/۱۸	۳۶/۹۲	۳۰/۰۹	
سهم برق تجدیدپذیر در پوشش تقاضا (درصد) <sup>۵</sup>	۰/۲	۳۶/۳	۱۳/۱	۴۱/۶	
حجم بهینه صادراتی <sup>۶</sup> (میلیون مگاوات ساعت)	۱۶/۳	۵۶/۰۸	۳۱/۲۶	۶۷/۳۳	
شاخص پایداری شبکه (درصد) <sup>۷</sup>	۱۰۶	۸۶	۹۱	۹۴	

منبع: یافته‌های تحقیق

- ۱- در مدل پایه صرفاً ظرفیت فسیلی و ظرفیت عملی ۸ مگاواتی نیروگاه بادی بینالود وارد شده است
- ۲- در این سناریو، حداکثر پتانسیل تولید برق خورشیدی (با تکنولوژی فتوولتائیک) به مدل پایه اضافه شده است.
- ۳- در این سناریو، حداکثر پتانسیل تولید برق بادی به مدل پایه اضافه شده است
- ۴- در این سناریو، حداکثر پتانسیل تولید برق خورشیدی (با تکنولوژی فتوولتائیک) و بادی به مدل پایه اضافه شده است
- ۵- مابقی تولید برق تجدیدپذیر، به دلیل لزوم برقرار قیود قابلیت اطمینان تولید و پایداری شبکه، وارد شبکه مصرف برق منطقه‌ای نمی‌شوند و با اهداف صادراتی تولید می‌شوند؛ زیرا در صورت بالا رفتن ضریب نفوذ برق نوسان‌پذیر تجدیدپذیر در شبکه قدرت، قابلیت اطمینان تولید و احتمال بروز خاموشی افزایش پیدا می‌کند و قیود قابلیت اطمینان سیستم تولید، اجازه تولید فراتر از محدوده مشخصی که تامین‌کننده پایداری سیستم باشد و به اطمینان سیستم تولید خدشه‌ای وارد نکند، را نخواهد داد.
- ۶- این حجم بهینه با توجه به برآورده شدن قیود انتقال بین‌منطقه‌ای و بین‌المللی تعیین شده است. به عبارت دیگر با توجه به ضریب بهره‌برداری ۲۰ و ۲۵ درصدی نیروگاه‌های خورشیدی و بادی در محدوده خراسان بزرگ که توسط شرکت برق منطقه‌ای خراسان برآورد شده است، پتانسیل ۷۰۰۰ مگاواتی برق بادی در خراسان بزرگ، تولیدی معادل ۱۵ میلیون مگاوات ساعت و پتانسیل ۴۰۰۰۰ مگاواتی برق خورشیدی در خراسان بزرگ، تولیدی معادل ۷۰ میلیون مگاوات ساعت را در سال فراهم خواهند نمود که صادرات برق مزاد بر نیاز شبکه، کاملاً بستگی میزان محدودیت‌های پست‌های انتقال دارد.
- ۷- در محاسبه این شاخص از روش لوند (۲۰۱۴) صفحات ۸۶-۸۸ استفاده شده است. برای اطلاعات بیشتر ر. ک: Lund, H. (2014) Advanced Energy Systems Analysis Computer Model, Documentation Version 11. 4, Aalborg University, Denmark  
Holttinen H, Hirvonen R, Power System Requirements for Wind Power, Wind Power in Power Systems, John Wiley & Sons Ltd., 2005, pp. 144-167.

بر اساس نتایج جدول ۲، کمترین انتشار آلاینده متعلق به سناریوی زیست‌محیطی سبب تولید هیبرید فسیلی-خورشیدی-بادی است که به دلیل ضریب نفوذ بالای انرژی‌های تجدیدپذیر در این سناریو، نتیجه‌ای دور از انتظار نیست. همچنین به دلیل برخورداری از تولید مازاد بر نیاز شبکه، بیشترین حجم صادراتی بهینه نیز، متعلق به همین سبب تولیدی است. اما چالش بزرگ این سناریو، افزایش قیمت تمام شده، با مقیاس ۱۰ برابری نسبت به مدل پایه (شرایط اولیه سیستم تولید) است؛ دلیل این قیمت بالا را باید در هزینه‌های سرمایه‌گذاری بالای تولید برق خورشیدی جستجو کرد؛ زیرا بر اساس اطلاعات بودجه‌ای شرکت برق منطقه‌ای خراسان برای سال ۱۳۹۱، هزینه سرمایه‌گذاری ایجاد ظرفیت یک مگاواتی بخاری، گازی و سیکل ترکیبی به ترتیب ۲۰۱۰۲، ۱۸۲۰۰ و ۲۲۶۳۰ میلیون ریال است و این در حالی است که هزینه سرمایه‌گذاری ایجاد ظرفیت یک مگاواتی خورشیدی و بادی در منطقه خراسان به ترتیب ۱۰۴۵۰۰ و ۳۹۷۵۰ میلیون ریال است.

همچنین بر اساس نتایج شبیه‌سازی سیستم پژوهش، در سناریوی سبب زیست‌محیطی ۴۱/۶ درصد برق تولیدی در سیستم با بهره‌گیری از تکنولوژی تجدیدپذیر بادی-خورشیدی انجام می‌شود. اما این میزان تولید برق تجدیدپذیر در کنار تولید برق فسیلی به عنوان واحدهای پایدار ساز و فراهم‌کننده قابلیت اطمینان تولید در شبکه، تولیدی فراتر از تقاضای منطقه‌ای برق را به همراه خواهد داشت که مازاد تقاضا به خارج از منطقه (به مقصد مناطق همسایه شرکت برق منطقه‌ای خراسان و یا مقاصد بین‌المللی) صادر خواهد شد. ولی محدودیت خطوط انتقال می‌تواند، مانع بزرگی بر سر راه دستیابی به اهداف صادراتی باشد. در این صورت، میزان صادرات به محدودیت‌های خطوط انتقال محدود می‌شود و چنانچه تولید مازاد بر تقاضای شبکه قدرت، فراتر از محدوده مجاز خطوط انتقال باشد، آن‌گاه تولید برق در واحدهای با بیشترین هزینه نهایی تولید، تا اندازه‌ای کاهش می‌یابد که مازاد بحرانی شبکه مرتفع گردد. در چنین شرایطی، ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی نیز راه‌کاری کارگشا برای ارتقاء امنیت سیستم و

۱- مازاد بحرانی تولید انرژی الکتریکی (Critical Excess Electricity Production) عبارت است از میزان انرژی الکتریکی مازاد تولیدشده فراتر از ظرفیت خطوط انتقال. در حقیقت در برنامه‌ریزی آنالیزی یک شبکه هوشمند، نباید به شبکه یک‌پارچه تولید این مجوز داده شود که تولیدی فراتر از مجموع تقاضای داخلی و حداکثر ظرفیت خطوط انتقال برق را در سیستم تولید، عرضه نماید. به همین دلیل به هنگام بروز مازاد بحرانی تولید انرژی الکتریکی، لازم است که سیستم تولید تصحیح شود. راه‌کار عمومی مقابله با این مازاد بحرانی، کاهش تولید در خطوط تولید تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر است. به نحوی که در نهایت کاهش انفرادی یا ترکیبی تولید در نیروگاه‌ها، منجر به تراز میان عرضه و تقاضای کلی داخلی و خارجی گردد.

ایجاد یک سیستم تولید پایدار و قابل اطمینان برای پاسخ‌گویی به تغییرات پیش‌بینی نشده بار شبکه و خروج ناگهانی نیروگاه‌های تجدیدپذیر یا فسیلی از مدار خواهد بود. نتایج اضافه شدن تعدیل ظرفیت‌های مختلف CAES به سبد زیست‌محیطی تولید هیبرید فسیلی-تجدیدپذیر نیز در جدول ۳ آورده شده است. سناریوهای مورد بررسی در این پژوهش، بر اساس نمونه‌های تحقیقاتی- عملیاتی سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده ۲۹۰ مگاواتی هانتورف<sup>۱</sup> آلمان و واحد ۱۱۰ مگاواتی مکینتاش<sup>۲</sup> آمریکا تدوین شده‌اند که بر این اساس، ظرفیت‌ها با تعدیل پلکانی ۵۰ مگاواتی به سیستم تولید اضافه می‌شوند و میزان تأثیرپذیری فنی-اقتصادی سیستم تولید از این تعدیل فنی با شاخص‌های متوسط قیمت، انتشار آلاینده زیست‌محیطی، تولید بهینه برق تجدیدپذیر، تولید بهینه برق فسیلی، تولید خالص سیستم CAES، حداکثر ذخیره‌سازی، درآمد ناخالص سیستم CAES، هزینه مصرف گاز سیستم CAES، درآمد خالص CAES، نرخ رشد متوسط قیمت، نرخ رشد انتشار آلاینده زیست‌محیطی، نرخ رشد درآمد خالص و شاخص پایداری شبکه ارزیابی می‌شود. این نتایج با در نظر گرفتن فرآیند پیاپی و تکراری ۸۷۸۴ مرتبه‌ای برای رسیدن به همگرایی فنی-اقتصادی محاسبه شده است.

جدول ۳- نتایج شبیه‌سازی تعدیل ظرفیت‌های مختلف CAES به سبد زیست‌محیطی تولید هیبرید فسیلی-تجدیدپذیر

سناریو شاخص	تعدیل ظرفیت سناریوی ورود ۵۰ مگاواتی	تعدیل ظرفیت سناریوی ورود ۱۰۰ مگاواتی	تعدیل ظرفیت سناریوی ورود ۱۵۰ مگاواتی	تعدیل ظرفیت سناریوی ورود ۲۰۰ مگاواتی	تعدیل ظرفیت سناریوی ورود ۲۵۰ مگاواتی	تعدیل ظرفیت سناریوی ورود ۳۰۰ مگاواتی
متوسط قیمت (ریال بر مگاوات ساعت)	۵,۷۹۴,۴۱۴/۶۴	۵,۷۸۴,۵۷۸/۸۰	۵,۷۷۶,۰۸۱/۴۱	۵,۷۶۷,۶۰۹/۹۹	۵,۷۵۸,۵۱۳/۶۲	۵,۷۵۰,۰۹۲/۶۹
انتشار آلاینده زیست‌محیطی (میلیون تن)	۱۸/۸۸	۱۸/۹۱	۱۸/۹۷	۱۹/۰۱	۱۹/۰۵	۱۹/۰۹
تولید بهینه برق تجدیدپذیر (میلیون مگاوات ساعت)	۵۷/۹۲	۵۷/۹۴	۵۷/۹۷	۵۷/۹۹	۵۸/۰۱	۵۸/۰۴
تولید بهینه برق فسیلی (میلیون مگاوات ساعت)	۳۰/۰۹	۳۰/۰۹	۳۰/۰۹	۳۰/۰۹	۳۰/۰۹	۳۰/۰۹

1- Huntorf  
2- Macintosh

سناریو	سناریوی ورود تغییل ظرفیت ۳۰۰ مگاواتی	سناریوی ورود تغییل ظرفیت ۲۵۰ مگاواتی	سناریوی ورود تغییل ظرفیت ۲۰۰ مگاواتی	سناریوی ورود تغییل ظرفیت ۱۵۰ مگاواتی	سناریوی ورود تغییل ظرفیت ۱۰۰ مگاواتی	سناریوی ورود تغییل ظرفیت ۵۰ مگاواتی	شاخص
تولید خالص سیستم AES (میلیون مگاوات ساعت)	۰/۶۵	۰/۵۵	۰/۴۳	۰/۳۲	۰/۲۲	۰/۰۹	
حداکثر ذخیره‌سازی (میلیون کیلووات ساعت در سال)	۰/۹۰	۰/۷۵	۰/۶۰	۰/۴۵	۰/۳۰	۰/۱۳	
درآمد ناخالص سیستم CAES (میلیون ریال)	۱۱۶۰/۲۱	۹۶۶/۸۴	۷۷۳/۴۸	۵۸۰/۱۱	۳۸۶/۷۴	۱۴۷/۳۰	
هزینه مصرف گاز سیستم CAES (میلیون ریال)	۰/۶۱	۰/۵۱	۰/۴۱	۰/۳۰	۰/۲۰	۰/۰۸	
درآمد خالص CAES (میلیون ریال)	۹۱۵/۲۵۵۰۴	۷۶۲/۷۱۲۵۳	۶۱۰/۱۷۰۰۳	۴۵۷/۶۲۷۵۲	۳۰۵/۰۸۵۰۱	۱۰۹/۱۸۳۰۴	
نرخ رشد متوسط قیمت (درصد)	- ۰/۱۴۶	- ۰/۱۵۷	- ۰/۱۴۶	- ۰/۱۴۶	- ۰/۱۶۹	-	
نرخ رشد انتشار آلاینده زیست‌محیطی (درصد)	۰/۲۰	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۳۱۷	۰/۱۵۸	-	
نرخ رشد درآمد خالص (درصد) <sup>۱</sup>	۲۰	۲۴	۳۳	۴۹	۱۷۹	-	
شاخص پایداری شبکه (درصد)	۱۰۱	۱۰۱	۱۰۱	۱۰۱	۱۰۱	۱۰۱	

منبع: یافته‌های تحقیق

- ۱- از آنجایی که در هر سناریو، مقدار یکسانی (۵۰ مگاوات) به ظرفیت سیستم ذخیره‌ساز هوا فشرده اضافه می‌شود، می‌توان درصد رشد به ازای گام‌های مشابه افزایش ظرفیت سیستم، را محاسبه نمود.
- ۲- در محاسبه این شاخص از روش لوند (۲۰۱۴) صفحات ۸۶-۸۸ استفاده شده است. برای اطلاعات بیشتر ر. ک:

Lund, H. (2014) Advanced Energy Systems Analysis Computer Model, Documentation Version 11. 4, Aalborg University, Denmark  
 Holttinen H, Hirvonen R, Power System Requirements for Wind Power, Wind Power in Power Systems, John Wiley & Sons Ltd., 2005, pp. 144-167.



نتایج شبیه‌سازی ورود تعدیل ظرفیت‌های مختلف CAES به سبد زیست‌محیطی تولید هیبرید فسیلی-تجدیدپذیر جدول ۳، نشان می‌دهد که با افزایش ظرفیت واحد ذخیره‌ساز از ۵۰ تا ۳۰۰ مگاوات، قیمت روند کاهشی و انتشار آلاینده زیست‌محیطی و درآمد خالص، روندی افزایشی خواهند داشت. به علاوه تولید خالص سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده نیز از ۰/۰۹ تراوات ساعت در ظرفیت ۵۰ مگاواتی به ۰/۶۵ تراوات ساعت در ظرفیت ۳۰۰ مگاواتی می‌رسد و حداکثر ذخیره‌سازی سیستم CAES نیز از ۰/۱۳ به ۰/۹ میلیون کیلووات ساعت در سال ارتقاء می‌یابد. با توجه به اینکه با افزایش ظرفیت سیستم CAES، شاخص‌های درآمد و انتشار روند افزایشی دارند و در مقابل شاخص قیمت متوسط روند کاهشی دارد، لازم است از نرخ رشد شاخص‌ها در تغییر دامنه یکسان ظرفیت ۵۰ مگاواتی برای مقایسه تأثیر افزایش ظرفیت واحد ذخیره‌ساز استفاده شود. بر این اساس، بیشترین نرخ کاهش قیمت، کمترین نرخ رشد انتشار آلاینده زیست‌محیطی و بیشترین نرخ رشد درآمد خالص مربوط به دامنه افزایش ظرفیت از ۵۰ به ۱۰۰ مگاوات است. بنابراین سناریوی ورود تعدیل ظرفیت ۱۰۰ مگاواتی نسبت به سایر ظرفیت‌ها، کمترین میزان رشد انتشار آلاینده زیست‌محیطی و بیشترین میزان رشد درآمد خالص واحد ذخیره‌ساز هوای فشرده را به خود اختصاص داده است. بنابراین با توجه به هر سه معیار قیمتی، زیست‌محیطی و درآمدی، ظرفیت ۱۰۰ مگاواتی واحد ذخیره‌ساز هوای فشرده، ظرفیت بهینه خواهد بود. به منظور ارزیابی تأثیر نوسان نرخ ارز در سال‌های پس از سال پایه (۱۳۹۱)، متوسط قیمت سیستم تولید برخوردار از ظرفیت ۱۰۰ مگاواتی واحد ذخیره‌ساز هوای فشرده بر اساس نرخ تسعیر دلار در سال‌های ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳ نیز محاسبه شده است. متوسط نرخ مرجع بازار بین بانکی - که بر اساس نرخ ارز روزانه توسط اداره‌های بین‌الملل و آمارهای اقتصادی بانک مرکزی محاسبه می‌شود - در سه ماه سوم سال ۱۳۹۲، معادل ۲۴۸۴۷ ریال و در سه ماه سوم سال ۱۳۹۳ معادل ۲۶۷۷۲ ریال بوده است<sup>۱</sup>. بر این اساس با برزرسانی نرخ ارز، متوسط قیمت در سیستم تولید پایه در سال‌های ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳ به ترتیب ۵,۷۹۶,۸۴۳/۷۹ ریال و ۵,۸۱۲,۸۴۳/۲۲ ریال در هر مگاوات ساعت خواهد شد که رشد ۰/۲۱ درصدی و ۰/۴۸ درصدی را به دنبال دارد. بنابراین با نوسان افزایشی نرخ ارز، هزینه نااطمینانی نرخ ارز نیز به چالش قیمتی سیستم تولید اضافه خواهد شد.

۱- برای اطلاعات بیشتر به منبع نماگرهای اقتصادی بانک مرکزی، گزارش سه ماه سوم ۱۳۹۳ و ۱۳۹۲ صفحات ۱۵ و ۱۶ مراجعه کنید.

## ۶- نتیجه‌گیری و دلالت‌های پژوهش

بر اساس نتایج این پژوهش، برای رفع مشکل نااطمینانی خروجی منابع تجدیدپذیر نوسان‌پذیر، می‌توان از روش‌های پیشنهاد شده از سوی کاناسه‌پتیل و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۱) استفاده نمود و علاوه بر استفاده از سیستم انرژی تجدیدپذیر با ظرفیت بزرگ و به صورت یک‌پارچه با برق فسیلی، از روش‌های ذخیره‌سازی نیز برای افزایش پایداری شبکه<sup>۲</sup> و قابلیت اطمینان<sup>۳</sup> سیستم تولید در سیستم‌های تولید هیبریدی استفاده نمود؛ زیرا در شرایطی که سیستم تولید با قطع شدن یکی از خطوط اصلی یا از مدار خارج شدن یک واحد تولید روبرو می‌شود (Black-Out)، لازم است که واحدی به عنوان استارت و راه‌اندازی سریع در حالت اضطراری (Black-Start) در شبکه راه‌اندازی شود که به صورت فوری و در کمترین زمان ممکن، بار شبکه را تأمین کند و شبکه را دوباره به حالت عادی باز گرداند. به عبارت دیگر از آنجایی که تنها برخی از توربین‌های گازی قابلیت استارت سریع در کمترین زمان را دارند، می‌توان در برخی مواقع از نیروگاه‌های گازی با قابلیت خود استارتی (بدون نیاز به دریافت توان اولیه از شبکه) استفاده نمود و به طور موازی از سیستم هوای فشرده نیز برای یک توان ذخیره آماده به تولید بهره‌برداری کرد. همچنین استفاده از سیستم هوای فشرده که به قابلیت استارت سریع در کمترین زمان مجهز نیستند، می‌تواند جایگزینی مناسب برای تضمین قابلیت اطمینان تولید و پایداری شبکه در مواقع اضطراری باشد<sup>۴</sup>، زیرا سیستم هوای فشرده بدون نیاز به محرک خارجی و صرفاً با به‌کارگیری انرژی پتانسیل هوای فشرده قابل بهره‌برداری است<sup>۵</sup>.

1- Kanase Patil et al

2- Grid Stability

3- Reliability

۴- لازم به ذکر است که زمان لازم برای راه‌اندازی توربین‌های گازی دارای قابلیت استارت سریع، به‌طور متوسط ۲۰-۳۰ دقیقه است. این در حالی است که زمان لازم برای راه‌اندازی سیستم هوای فشرده، کمتر از ۱۰ دقیقه است (دینه‌ولم و همکاران، ۲۰۱۰: ۱۳).

۵- در سیستم‌های هیبرید، قابلیت اطمینان به معنای ایجاد و حفظ تراز میان عرضه و تقاضای برق شبکه به هنگام مواجهه با اختلالات ناگهانی ناشی از تغییرات عرضه و تقاضا است. برای تأمین چنین قابلیت‌هایی در سیستم لازم است که سیستم به نحوی طراحی شود که بتواند فوراً به اختلالات احتمالی واکنش نشان دهد و پس از برطرف شدن این اختلالات، مجدداً به فرآیند نرمال بازگردد (AITE، ۲۰۱۱: ۲۸). در حقیقت سیستم هوای فشرده را می‌توان برای افزایش کیفیت توان، پایداری شبکه و ارتقاء قابلیت اطمینان مورد استفاده قرار داد. کیفیت توان به وجود نوسانات ولتاژ، قطع موقتی برق و بهسازی شبکه مربوط می‌شود که سیستم ذخیره هوای فشرده را می‌توان برای کاهش میزان نوسانات و اختلالات شبکه در محدوده یک استاندارد مورد استفاده قرار داد.

همچنین نتایج امکان‌سنجی استفاده از سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده نشان می‌دهد که به‌کارگیری این سیستم نه تنها به لحاظ فنی و اقتصادی، امکان‌پذیر و مؤثر است، بلکه از سود مناسبی نیز برخوردار است و با در نظر گرفتن طول عمر مفید ۳۰ ساله یک واحد ذخیره‌ساز ۱۰۰ مگاواتی و شاخص‌سازی و هم‌ترازسازی هزینه‌ها و درآمدهای آتی، حداقل سودی معادل ۹۱۵۲/۵۵ میلیون ریال را در دوره بهره‌برداری به همراه خواهد داشت. به علاوه با افزایش ظرفیت به ۳۰۰ مگاوات، سود واحد ذخیره‌ساز به ۲۷۴۵۷/۶۵ میلیون ریال افزایش می‌یابد. این در حالی است که اکثر سیستم‌های تولید برق در شرکت‌های برق منطقه‌ای که ماهیت دولتی دارند، با هدف ایجاد شبکه پایدار تولید و ایجاد قابلیت اطمینان در سیستم تولید برق طراحی شده‌اند و سودمحوری را نمی‌توان به عنوان هدف اصلی شرکت‌های برق منطقه‌ای تلقی نمود. با این حال حتی با در نظر گرفتن بالاترین هزینه‌های سرمایه‌گذاری تأمین تکنولوژی هوای فشرده برای ایران و عدم وجود هر گونه حمایت مالی از سوی دولت نیز، این سیستم از قابلیت اجراء و راه‌اندازی استاندارد در محدوده شرکت برق منطقه‌ای خراسان برخوردار بوده و از قابلیت سوددهی نیز تا محدوده مشخصی برخوردار است. البته یکی از مهمترین چالش‌های سیستم‌های هیبرید فسیلی-تجدیدپذیر، افزایش قیمت تمام‌شده سیستم تولید به هنگام وجود تعدیل خورشیدی-بادی به سیستم تولید است که با توجه به نوپا بودن انرژی‌های تجدیدپذیر در کشور، باید حمایت ویژه‌ای از سوی دولت برای تقویت و تأمین مالی این پروژه‌ها صورت گیرد. همچنین ایجاد تسهیلات برای انتقال دانش فنی و بومی‌سازی تجهیزات خورشیدی و بادی بر اساس شرایط اقلیمی ایران، می‌تواند کمک شایانی به گسترش و ارتقاء جایگاه انرژی‌های تجدیدپذیر در صنعت برق نماید.

به علاوه از آنجایی که در سیستم ذخیره‌سازی هوای فشرده، آربیتراژ<sup>۱</sup> برق با خرید برق در قیمت‌های پایین انرژی در دوره غیرپیک و فروش آن به شبکه در دوره‌های پیک بار انجام می‌شود و با توجه به اینکه به طور معمول نیروگاه‌های پیک بار، از کارایی کمتر فنی-اقتصادی و مصرف بیشتر سوخت برخوردارند، بنابراین استفاده از سیستم ذخیره‌سازی هوا فشرده می‌تواند لزوم به‌کارگیری خطوط تولید پیک بار را کاهش دهد. لازمه اجرای این راه‌کار، برخورداری از ظرفیت‌های قابل اعتماد و قابل قبول در سیستم هوای فشرده است که بتواند پاسخگوی تقاضای افزایش یافته در دوره پیک بار باشد.

اجرای چنین سیاستی، کاهش ظرفیت پشتیبان<sup>۱</sup> سیستم تولید و ذخیره‌سازی هزینه‌های سرمایه‌گذاری را نیز به دنبال دارد.

### فهرست منابع

اخلاقی، مصطفی؛ مظفری، سیدبابک و علینقی زاده اردستانی، مهدی (۱۳۹۲) تأثیر منابع تجدیدپذیر و ذخیره‌ساز انرژی در بهره برداری بهینه روزانه از شبکه‌های توزیع، سومین کنفرانس انرژی‌های تجدید پذیر و تولید پراکنده ایران، اصفهان، دانشگاه اصفهان.

ادریسیان، اشکان؛ سامانی، حمید و ناصح، مجیدرضا (۱۳۹۱) الگوی جدید هایپرید هوای فشرده برای تولید پایدار در مزارع بادی، دومین همایش ملی انرژی باد و خورشید، تهران، هم‌اندیشان انرژی کیمیا.

ارشادی عباس آباد، سالار؛ میرزائی ضیاپور، بهروز و عتابی، فریده (۱۳۹۲) بهینه‌سازی عددی سیستم هیبریدی باد- دیسل- ذخیره انرژی هوای فشرده بر مبنای الگوریتم ژنتیک، اولین همایش سراسری محیط زیست، انرژی و پدافند زیستی، تهران، مؤسسه آموزش عالی مهر اروند، گروه ترویجی دستداران محیط زیست.

ترنر، آر. ک، پیرس، د. و باتمن، ای (۱۳۷۴) اقتصاد محیط زیست، ترجمه دهقانیان، سیاوش؛ کوچکی، عوض و کلاهی‌اھری، علی، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

خلاصه تحولات اقتصادی کشور (۱۳۹۱)، بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران، تهران.

رستمی، ثریا؛ حق پرست کاشانی، آرش؛ لاری، حمیدرضا (۱۳۹۲) مطالعه و برآورد قیمت برق تولیدی از نیروگاه‌های بادی، خورشیدی و بيوگاز، نخستین کنفرانس ملی انجمن انرژی ایران، تهران، پژوهشگاه نیرو.

شرکت برق منطقه‌ای خراسان (۱۳۹۱) گزارش اقدامات شرکت برق منطقه‌ای خراسان در زمینه توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، مشهد.

شرکت مشاوره مدیریت آریانا (۱۳۹۱) تدوین نقشه راه توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر صنعت برق خراسان، پژوهشگاه نیرو، مرکز رشد برق، واحد تحقیقات برق شرکت مشاوره مدیریت آریانا، تهران.

طاهری فرد، علی و شهاب، سمیه (۱۳۸۹) بررسی جنبه‌های فنی و اقتصادی تولید برق زمین گرمایی، اقتصاد انرژی، شماره ۵۲۱.

طباطبایی، محمدجعفر و عسکری، محمدحسین (۱۳۸۶) روش‌های ذخیره سازی برق در ایستگاههای قدرت، دفتر مطالعات اقتصادی و ارتقاء بازار برق شرکت مدیریت شبکه برق ایران، ماهنامه پیک برق، مهر ۱۳۸۶.

هادی، حمید و حقیقی خوشخو، رامین (۱۳۹۳) طراحی مفهومی سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده در مقیاس کوچک (Micro CAES) به همراه توربین بادی برای تأمین برق یک واحد مسکونی، بیست و هشتمین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران.

Alberta Innovates – Technology Futures (2011) Energy Storage: Making Intermittent Power Dispatchable, Final Report, Oct 27th, 2011.

Caballero, F., Sauma, E., Yanine, F. (2013) Business optimal design of a grid-connected hybrid PV (photovoltaic) - wind energy system without energy storage for an Easter Island's block, Energy 61 (2013) 248-261.

Cooke, S., (2009) In Mortal Hands: A Cautionary History of the Nuclear Age, Black Inc.

Daly, H. and Cobb, L. (1990) for the common Good, Greenprint Press, London.

Danish Energy Agency (2012), Energinet. dk. Technology Data for Energy Plants, Danish Energy Agency.

Danish Energy Agency (2012), Assumptions for socio-economic analysis on energy, Danish Energy Agency.

Denholm, P. ; Sioshansi, R. (2009). "The Value of Compressed Air Energy Storage with Wind in Transmission-Constrained Electric Power Systems," Energy Policy 37, 3149-3158.

Denholm, P., Ela, E., Kirby, B. and Milligan, M. (2010) the Role of Energy Storage with Renewable Electricity Generation, Technical Report, NREL/TP-6A2-47187, January 2010

Henning, H. M. and Palzer, A. (2014) A comprehensive model for the German electricity and heat sector in a future energy system with a dominant

- contribution from renewable energy technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30 (2014), 1003–1018
- Hindle, B. and Lubar, S. (1986) *Engine's of Change: The American Industrial Revolution, 1790-1860*, Washington, D. C.: Smithsonian Institution Press.
- Holttinen H, Hirvonen R, *Power System Requirements for Wind Power, Wind Power in Power Systems*, John Wiley & Sons Ltd., 2005, pp. 144-167.
- Hunter, L. C. and Bryant, L. (1991) *A History of Industrial Power in the United States, 1780-1930*, vol. 3, *The Transmission of Power* (Cambridge, MA: The MIT Press, 1991).
- Kanase Patil, A. B., R. P. Saini, M. P. Sharma, “Sizing of integrated renewable energy system based on load profiles and reliability index for the state of Uttarakhand in India,” *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 2809–2821, 2011.
- Liu, W., Hu, W., Lund, H., Chen, Z., (2013) Electric vehicles and large-scale integration of wind power – The case of Inner Mongolia in China, *Applied Energy*, 104 (2013) 445–456
- Lund, H. (2014) *Advanced Energy Systems Analysis Computer Model, Documentation Version 11. 4*, Aalborg University, Denmark
- Mandil, C. “Oil crises and climate challenges-30 years of energy use in iea countries,” *International Energy Agency*, 2004.
- National Renewable Energy Laboratory (2012) *Cost and Performance Data for Power Generation Technologies*, Golden, Colorado, United States, February 2012.
- Pereza, I. O. and Østergaard, P. A. (2013) the influence of an estimated energy saving due to natural ventilation on the Mexican energy system, *Energy* 3 (2013), 1-12.
- Perkovic, L., Silva, P., Ban, M., Kranjcevic, N., Duic, N., (2013) Harvesting high altitude wind energy for power production: The concept based on Magnus’ effect, *Applied Energy*, 101 (2013) 151–160.
- Reynolds, T. S., (1983) *Stronger than a Hundred Men: A History of the Vertical Water Wheel*, Baltimore, Johns Hopkins University Press.
- Shrestha, G. B. L. Goel, “A study on optimal sizing of stand-alone photovoltaic stations,” *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 13, 373–378, 1998.
- Suberua, M. Y., Mustafa, M. W., Bashir, N., Muhamad, N. A., Mokhtar, A. S., (2013) Power sector renewable energy integration for expanding access

- to electricity in sub-Saharan Africa, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25 (2013), 630–642.
- Succar, S. ; Williams, R. H. (2008). “Compressed Air Energy Storage: Theory, Resources, And Applications for Wind Power,” published for the Princeton Environmental Institute, April 2008.
- Takagi, M. and Y. Iwafune, K. Yamaji, H. Yamamoto, K. Okano, R. Hiwatari, T. Ikeya, “Economic value of PV energy storage using batteries of battery-switch stations,” *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 4:164-73, 2013.
- Tanrioven, M., “Reliability and cost-benefits of adding alternate power sources to an independent micro-grid community,” *Journal of Power Source*, vol. 150, pp. 136–149, 2005.
- Tascikaraoglu, A. M. Uzunoglu, B. Vural, “The assessment of the contribution of short-term wind power predictions to the efficiency of stand-alone hybrid systems,” *Applied Energy*, vol. 94, pp. 156-165, 2012.
- Zelinka, I. (2001). Analytic programming by means of new evolutionary algorithms, *Proceedings of 1st International Conference on New Trends in Physics’01*, Brno, Czech Republic, pp. 210–214.
- Zelinka, I. (2002a). Analytic programming by means of soma algorithm, *Proceedings of First International Conference on Intelligent Computing and Information Systems*, Cairo, Egypt, pp. 148–154.
- Zelinka, I. (2002b). Analytic programming by means of soma algorithm, *Proc. 8th International Conference on Soft Computing*, VUT Brno, Mendel’02 Czech Republic, pp. 93–101.
- Zelinka, I., Oplatkova, Z. & Nolle, L. (2005). Analytic programming - symbolic regression by means of arbitrary evolutionary algorithms, In: *Special Issue on Intelligent Systems of International Journal of Simulation, Systems, Science and Technology* Vol. 6 (No. 9): 44–55.
- Zhou, W. C. Z. Lou, Z. S. Li, L. Lu, H. X. Yang, “Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar-wind power generation systems,” *Applied Energy*, vol. 87, pp. 380–389, 2010.

## پیوست‌ها

جدول ۱۰-۱- ویژگی‌های فنی-اقتصادی نیروگاه‌های محدوده شرکت برق منطقه‌ای خراسان (بخش اول)

نام نیروگاه	توس	مشهد	شریعتی	سیکل شیروان	سیکل کاوه	شرح
قدرت اسمی - مگاوات	۶۰۰	۳۲۵	۴۹۶	۹۵۴	۶۳۶	
متوسط قدرت عملی - مگاوات	۶۰۰	۳۰۰	۴۲۰	۸۰۲	۵۰۳	
تولید ناخالص - مگاوات ساعت	۳۹۹۲۹۰۶	۱۳۴۴۵۷۹	۲۱۸۴۷۴۷	۲۷۴۷۵۵۷	۲۴۹۵۶۱۳	
درصد از کل تولید - درصد	۱۸.۸	۶.۳	۱۰.۳	۱۲.۹	۱۱.۷	
مصرف داخلی - مگاوات ساعت	۲۹۰۱۰۷	۷۹۱۳۸	۳۷۷۲۷	۲۵۴۴۴	۲۴۸۶۰	
تولید خالص - مگاوات ساعت	۳۷۰۲۷۹۹	۱۲۶۵۴۴۱	۲۱۴۷۰۲۰	۲۷۲۲۱۱۳	۲۴۷۰۷۵۳	
حداکثر بار تولیدی - مگاوات	۵۷۴	۱۹۶	۴۱۳	۸۶۴	۵۵۱	
ضریب بار - درصد	۷۹.۴	۷۸.۳	۶۰.۴	۳۶.۳	۵۱.۷	
ضریب بهره برداری - درصد	۷۶	۵۲.۲	۵۹.۴	۳۹.۱	۵۶.۶	
سوخت گاز - هزار متر مکعب	۳۵۶۱۶۶	۴۸۲۵۲۲	۴۴۶۶۲۳	۸۳۱۷۹۶	۷۳۳۲۹۳	
سوخت مازوت - هزار لیتر	۷۲۲۱۹۷	۰	۰	۰	۰	
سوخت گاز وئیل - هزار لیتر	۳۲۲	۱۳۸۱	۶۶۰۷۸	۷۹۴۹۷	۷۸۵۶۶	
راندمان - درصد	۳۶.۴	۲۹.۵	۴۴.۹	۳۱.۹	۳۲.۵	

منبع: دفتر بودجه و مطالعات اقتصادی، معاونت برنامه‌ریزی و تحقیقات شرکت برق منطقه‌ای خراسان، کارنامه آماری ۱۳۹۱.

جدول ۲۰-۲- ویژگی‌های فنی-اقتصادی نیروگاه‌های محدوده شرکت برق منطقه‌ای خراسان (بخش دوم)

نام نیروگاه	قاین	نیشابور	فردوسی	بادی	جمع منطقه	شرح
قدرت اسمی - مگاوات	۷۵	۱۰۳۸	۹۵۴	۲۸	۵۱۰۶	
متوسط قدرت عملی - مگاوات	۵۶	۸۷۵	۷۹۲	۸	۴۳۵۶	
تولید ناخالص - مگاوات ساعت	۲۵۵۲۸	۵۹۴۵۷۷۳	۲۵۱۱۸۰۰	۴۶۷۹۴	۲۱۲۹۵۲۹۷	
درصد از کل تولید - درصد	۰.۱	۲۷.۹	۱۱.۸	۰.۲	۱۰۰	
مصرف داخلی - مگاوات ساعت	۱۰۲۶	۱۲۳۲۰۱	۱۲۰۶۹	۶۰	۵۹۳۶۳۲	
تولید خالص - مگاوات ساعت	۲۴۵۰۲	۵۸۲۲۵۷۲	۲۴۹۹۷۳۱	۴۶۷۳۴	۲۰۷۰۱۶۶۵	
حداکثر بار تولیدی - مگاوات	۵۹	۸۸۷	۸۱۹	۲۸	۴۳۹۱	
ضریب بار - درصد	۴.۹	۷۶.۵	۳۵	۱۸.۸	۶۲.۷	
ضریب بهره برداری - درصد	۵.۲	۷۷.۶	۳۶.۲	۶۶.۸	-	
سوخت گاز - هزار متر مکعب	۷۱۳۵	۱۱۴۵۷۱۷	۷۶۱۲۵۳	۰	۴۷۶۴۵۰۵	
سوخت مازوت - هزار لیتر	۰	۰	۰	۰	۷۲۲۱۹۷	
سوخت گاز وئیل - هزار لیتر	۳۶۵۳	۱۸۴۰۱۱	۸۶۵۷۴	۰	۵۰۰۰۸۲	
راندمان - درصد	۲۴.۶	۴۷.۱	۳۱.۳	-	۳۷.۱	

منبع: دفتر بودجه و مطالعات اقتصادی، معاونت برنامه‌ریزی و تحقیقات شرکت برق منطقه‌ای خراسان، کارنامه آماری ۱۳۹۱.



جدول ۳-۰- داده‌های هزینه تولید نیروگاه‌های محدوده شرکت برق منطقه‌ای خراسان (بخش اول)

نیروگاه	حقوق و دستمزد و سایر (میلیون ریال)	مواد و مصالح شیمی (میلیون ریال)	مواد و مصالح غیر شیمی ارزی (میلیون ریال)	مواد و مصالح غیر شیمی ریالی (میلیون ریال)
نیروگاه (۱)*	۲۰۴,۱۰۴	۶,۸۱۸	۸,۰۱۹	۳,۶۶۵
نیروگاه (۲)	۱۳۲,۹۸۳	۳,۰۳۶	۳,۱۵۶	۲,۲۵۵
نیروگاه (۳)	۱۰۳,۲۴۵	۱,۸۷۷	۴,۷۳۷	۸۲۸
نیروگاه (۴)	۲۷,۴۱۳	۰	۸,۶۶۵	۸۶۰
نیروگاه (۵)	۲۴,۸۹۹	۰	۷,۸۷۱	۶۹۰
نیروگاه (۶)	۱۸,۵۷۵	۰	۶۳۱	۴,۲۲۶
نیروگاه (۷)	۸۶,۳۲۷	۴,۰۹۵	۱۰,۴۲۵	۳,۰۵۸
نیروگاه (۸)	۲۵,۰۶۰	۰	۸,۴۲۲	۷۱۲
نیروگاه (۹)	۱۴,۰۴۸	۰	۱,۱۵۶	۳,۲۴۶

منبع: دفتر بودجه و مطالعات اقتصادی، معاونت برنامه‌ریزی و تحقیقات شرکت برق منطقه‌ای خراسان، کارنامه آماری ۱۳۹۱.

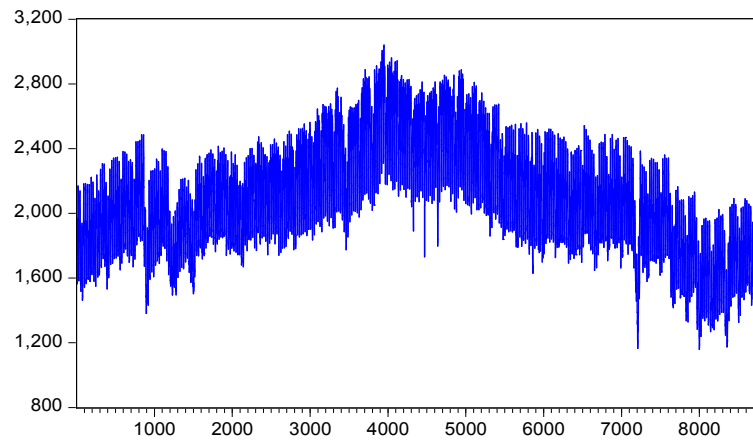
\* به جهت حفظ امانت و محرمانگی در گزارش‌دهی اطلاعات طبقه‌بندی شده نیروگاه‌های خصوصی و دولتی، نام نیروگاه‌ها ذکر نشده است.

جدول ۴-۰- داده‌های هزینه تولید نیروگاه‌های محدوده شرکت برق منطقه‌ای خراسان (بخش دوم)

نیروگاه	کنترل فرکانس (میلیون ریال)	کنترل مگاوار (میلیون ریال)	تعمیرات اساسی (میلیون ریال)	بهینه‌سازی / استهلاک (میلیون ریال)
نیروگاه (۱)*	۲,۶۶۳	۱,۸۶۴	۳۸,۵۰۰	۳۰,۰۰۰
نیروگاه (۲)	۷۷۸	۵۴۴	۹۰,۶۹۶	۳۴,۹۲۸
نیروگاه (۳)	۱,۵۷۰	۱,۰۹۹	۴۲,۵۰۰	۱۲,۲۰۰
نیروگاه (۴)	۱,۵۳۳	۱,۰۷۳	۱۵,۱۲۵	۱,۸۴۷
نیروگاه (۵)	۱,۳۹۳	۹۷۵	۲۴,۰۰۰	۱,۰۰۰
نیروگاه (۶)	۱۰۹	۷۶	۵,۵۰۰	۲,۱۰۰
نیروگاه (۷)	۴,۰۵۸	۲,۸۴۰	۱۰۰,۷۰۰	۱۶,۵۰۰
نیروگاه (۸)	۱,۴۰۲	۱,۰۲۱	۲۱,۵۰۰	۹,۰۰۰
نیروگاه (۹)	۱۹۹	۱۳۹	۴۱,۰۰۰	۵,۰۰۰

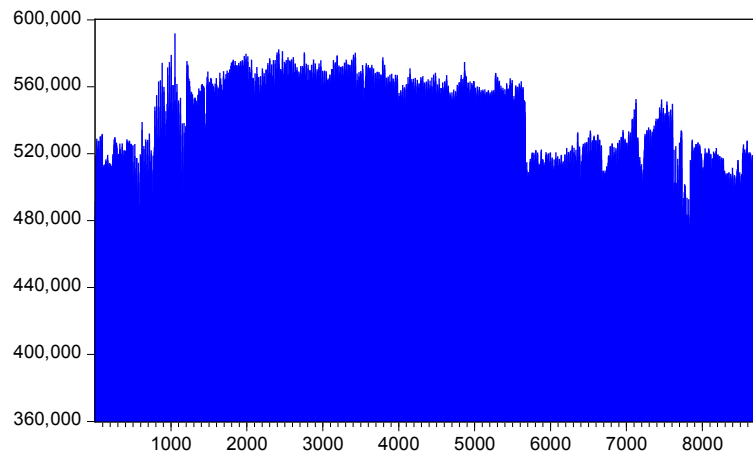
منبع: دفتر بودجه و مطالعات اقتصادی، معاونت برنامه‌ریزی و تحقیقات شرکت برق منطقه‌ای خراسان، کارنامه آماری ۱۳۹۱.

\* به جهت حفظ امانت و محرمانگی در گزارش‌دهی اطلاعات طبقه‌بندی شده نیروگاه‌های خصوصی و دولتی، نام نیروگاه‌ها ذکر نشده است.



منبع: دفتر بازار برق و اندازه‌گیری، معاونت بهره برداری شرکت برق منطقه‌ای خراسان، گزارش آماری ۱۳۹۱.

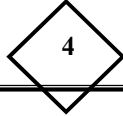
نمودار ۱-۰- توزیع لحظه‌ای-ساعتی تقاضای شبکه برق منطقه‌ای خراسان در سال ۱۳۹۱ (محور عمودی، بار شبکه (مگاوات ساعت) و محور افقی لحظه-ساعت<sup>۱</sup>)



منبع: دفتر بازار برق و اندازه‌گیری، معاونت بهره برداری شرکت برق منطقه‌ای خراسان، گزارش آماری ۱۳۹۱.

نمودار ۲-۰- توزیع لحظه‌ای-ساعتی قیمت برق مدل پایه در شرکت منطقه‌ای خراسان در سال ۱۳۹۱ (محور عمودی، قیمت (ریال بر مگاوات ساعت) و محور افقی لحظه-ساعت)

۱- از آنجایی که شبیه‌سازی بر اساس تقویم میلادی انجام شده است، روز آغازین یک ژانویه (۱۱ دی) و روز پایانی ۳۰ دسامبر است.



## Technical-Economic Analysis of Environmental Scenario of Hybrid Wind-Sun-Fossil Portfolio by Modification of Compressed Air Energy Storage (CAES) for Gas Turbines; (Case Study: Khorasan Regional Electricity Co.)

**Mahdi Ghaemi Asl<sup>1</sup>**

Ph.D. Student of Economic Sciences, Management & Economic Sciences Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, m.ghaemi84@gmail.com

**Mostafa Salimifar**

Professor of Economics, Management & Economic Sciences Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, mostafaa@ferdowsi.um.ac.ir

**Mohammad Hossien Mahdavi Adeli**

Professor of Economics, Management & Economic Sciences Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, madeli\_2001@yahoo.com

**Mostafa Rajabi Mashhadi**

Assistant Professor of Electrical Engineering Faculty, Sadjad university of technology, m.rajabimashhadi@ieec.org

Received: 2014/11/24 Accepted: 2015/06/23

### Abstract

In the environmentally sensitive scenario we estimate the potential production of a hybrid wind-solar-fossil fuel system that uses 100 % of the wind and solar potential, while ensuring grid stability, in order to minimize environmental emissions. Maximising the use of renewable energies requires storage systems to deal with the fluctuating nature of such power production in order to ensure a reliable and stable grid. Our study finds that introducing the maximal extent of potential solar and wind power production, along with modification of Compressed Air Energy Storage (CAES) for gas turbines, reduces CO<sub>2</sub> emissions by 4.28 million tons and increases the cost of production ten times over the current production structure of the Khorasan Regional Electricity Co. It is thus clear that adoption of this environmentally optimal scenario requires substantial financial support of the government plus localization of renewable technology to reduce the cost of production. We also find that increasing the capacity of CAES from 50 to 100 MW produces the outcome with the highest reduction in prices, the lowest increase in environmental emissions and the highest rate of growth of net income. We thus find a CAES capacity of 100 MW to be the optimal starting point for moving towards an environmentally sensitive electricity production system.

**JEL Classification:** N7 .O13 .P28 .Q42.

**Keywords:** Simulation of production power system, environmental scenario of hybrid production portfolio, Compressed Air Energy Storage.

---

1- Corresponding author