

بررسی آثار اجرای سیاست‌های افق چشم‌انداز 1410 انرژی‌های تجدیدپذیر در سیستم تولید هیبرید شرکت برق منطقه‌ای خراسان

مهدی قائمی اصل¹

استادیار گروه اقتصاد و بانکداری اسلامی، دانشکده
اقتصاد، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

مصطفی سلیمی‌فر²

استاد گروه اقتصاد، دانشکده علوم اداری و اقتصادی،
دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

محمدحسین مهدوی عادل³

استاد گروه اقتصاد، دانشکده علوم اداری و اقتصادی،
دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

مصطفی رجبی مشهدی⁴

معاون راهبری شبکه برق ایران و استادیار دانشکده
مهندسی برق و مهندسی پزشکی دانشگاه صنعتی
سجاد، مشهد، ایران.

تاریخ دریافت: 1393/10/7 تاریخ پذیرش: 1394/5/18

چکیده

در این پژوهش با بررسی ویژگی‌های اقلیمی منطقه خراسان و مجاورت این منطقه با استان‌های کشور (سمنان، سیستان، یزد و مازندران) و کشورهای خارجی (ترکمنستان و افغانستان)، در کنار بررسی شرایط

1 - نویسنده مسئول: Email: m.ghaemi84@gmail.com

2- Email: mostafa@ferdowsi.um.ac.ir

3- Email: madel_i_2001@yahoo.com

4- Email: m.rajabimashhadi@ieee.org

فنی-اقتصادی تولید برق هیبرید فسیلی-تجدیدپذیر، تأثیر اجرای سیاست‌های افق چشم‌انداز 1410 انرژی‌های تجدیدپذیر برق منطقه‌ای خراسان مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی سیستم تولید نشان می‌دهد اجرای این سیاست‌ها، حجم بهینه صادراتی بین منطقه‌ای و فرامنطقه‌ای 18/62 تراوات ساعتی را به دنبال خواهد داشت که 2/32 تراوات ساعت از این بهینه صادراتی به دلیل اجرای سیاست‌های افق چشم‌انداز ایجاد خواهد شد. این افزایش 14 درصدی بهینه صادراتی بین منطقه‌ای و فرامنطقه‌ای، ایجاد 5000 شغل در منطقه خراسان و افزایش قیمت تمام‌شده 32 درصدی را نیز به همراه دارد، ولی تأثیر چندانی بر کاهش انتشار آلاینده زیست‌محیطی نخواهد داشت. علت عدم کاهش قابل توجه حجم آلاینده، محدود بودن توان تجدیدپذیر ورودی به سیستم تولید و علت افزایش قابل توجه قیمت نیز هزینه سرمایه‌گذاری بالای تولید برق خورشیدی و بادی است که حمایت مالی جدی از پروژه‌های فنی-مهندسی بادی و خورشیدی، و تسهیم هزینه تولید با مشترکان را می‌طلبد. از سوی دیگر، افزایش ظرفیت‌های تولید به حداکثر پتانسیل، به منظور مقابله با ماهیت نوسانی تولید تجدیدپذیر، راه‌کاری اساسی برای توسعه حقیقی تولید برق تجدیدپذیر به شمار می‌رود.

کلیدواژه‌ها: شبیه‌سازی سیستم برق منطقه‌ای، تولید هیبرید فسیلی-تجدیدپذیر، آینده‌پژوهشی سیستم قدرت.

طبقه‌بندی JEL: N7، O13، P28، Q42.

مقدمه

متداول‌ترین تعریف از پایداری، تعریفی است که کمیسیون جهانی محیط‌زیست و توسعه¹ ارائه داده است. کمیسیون مذکور توسعه پایدار را بدین صورت تعریف می‌نماید: «توسعه‌ای که احتیاجات نسل حاضر را بدون لطمه زدن به توانایی نسل‌های آتی در تأمین نمودن نیازهای خود، برآورد می‌نماید» (World Commission on Environment and Development, 1987: 43).

با اشاعه مفهوم توسعه پایدار، حفاظت از محیط‌زیست و توجه به نیازها و شرایط زندگی نسل آینده، استفاده هدفمند و کارا از منابع، با چارچوب مفهومی جدیدی مطرح شدند به نحوی که حفاظت از محیط‌زیست و کاهش آثار زیانبار فعالیت‌های اقتصادی بر شرایط محیطی زندگی انسان‌ها در چارچوب مفهوم توسعه پایدار، لزوم تغییر در نوع نگرش به تخصیص منابع و دستیابی به

1- World Commission on Environment and Development

حداکثر کارآیی اقتصادی را ایجاب نمود (7: Paytakhti Oskuei and Nahidi, 2007).

پایداری از دیدگاه توسعه‌ای به توانمندی جامعه اکوسیستم و یا هر سیستم در حال فعالیت کنونی اطلاق می‌شود که می‌تواند تا آینده نامعلوم ادامه فعالیت دهد، بدون اینکه بر اثر فرسایش یا تهی شدن منابع کلیدی به حکم اجبار به سمت سقوط هدایت شود، توسعه‌ای که کیفیت زیستی انسان را در چارچوب ظرفیت حامل سامانه‌های پشتیبانی‌کننده محیط‌زیست (اکوسیستم‌ها) بهبود می‌بخشد (Munasinghe, 2004: 793).

در شرایط کنونی تقاضای انرژی بسیار زیاد سوخت‌های فسیلی از عواقب عمده در سراسر جهان است. مشکل اصلی محیط‌زیستی از انتشار آلاینده‌های شیمیایی سمی، گازهای گلخانه‌ای مثل دی‌اکسید کربن و دیگر آلاینده‌های هوا است. که باعث تغییر آب و هوا و آلودگی محیط‌زیست شده است. مسائل جهانی زیست‌محیطی قابل توجهی می‌تواند الگوی تولید و مصرف انرژی‌های فسیلی در سراسر جهان تحت تأثیر قرار دهد. اگرچه برق در نقطه مصرف نهایی نسبتاً کمتر روی پیامدهای محیط‌زیست و بهداشتی اثر می‌گذارد، مسائل اجتماعی و محیطی از تولید برق رخ می‌دهند. در نیروگاه‌های برق فسیلی مشکلاتی به وجود خواهد آمد از قبیل آلودگی، اتلاف قابل توجه حرارت و غیره). با این حال آثار ذاتی و حوزه‌ای میزان منابع انرژی متفاوت است. واحدهای با سوخت نفت و گاز را نه تنها آثار محلی بلکه آثار محیط‌زیستی جهانی و منطقه‌ای و آثار سلامتی بهداشتی دارد. نیروگاه‌های با سوخت زغال‌سنگ و نفت مقادیر مهمی از دی‌اکسید سولفور و اکسید نیتروژن را در اتمسفر منتشر کرده‌اند (701: Munasinghe, 2004). تغییر آب و هوا نشان دهنده ویژگی برجسته در برنامه‌های زیست‌محیطی و یا سیاست‌های اقتصادی کشورهای در حال توسعه جهان است. اشتراک مساعی بین سیاست‌های تغییر آب و هوا و برنامه‌های توسعه پایدار در کشورهای در حال توسعه و توسعه یافته وجود دارند مثل بازدهی انرژی، صرفه‌جویی در انرژی، توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، حمل‌ونقل و سیاست‌های پایداری زمین. تغییرات زیست‌محیطی همچنین ثبات محدوده‌ای از به‌هم پیوستگی‌های فیزیکی بحرانی، بوم‌شناختی و سیستم‌ها و زیر سیستم‌های اجتماعی را تهدید خواهد کرد (Bilgen et al., 2008).

در این میان یکی از چالش‌های بزرگ منابع تجدیدپذیر، ماهیت غیرقابل پیش‌بینی این منابع است که در برخی منابع به‌ویژه خورشید و باد، بسته به تغییرات آب‌وهوا، توان خروجی متغیری دارند (2810: Kanase Patil et al., 2011). در سیستم خورشیدی، با ابری شدن هوا، خروجی

منبع کاهش می‌یابد، یا در طول شب، منبع خورشیدی، هیچ برقی تولید نمی‌کند. برای منبع بادی، هیچ قانون خاصی وجود ندارد که بیان کند در یک لحظه خاص (مثلاً لحظه پیک بار)، باد با چه سرعتی می‌وزد و ژنراتور بادی چه مقدار برق می‌تواند، تولید کند. در واقع سیستم‌هایی که به صورت منفرد و منحصر از یک منبع تجدیدپذیر استفاده می‌کنند (مثل سیستم‌های صرفاً برخوردار از باد یا سیستم‌های صرفاً برخوردار از خورشید یا هر منبع تجدیدپذیر انحصاری)، به هیچ وجه قادر به تأمین بار پیوسته قابل اطمینان نیستند (Tanrioven, 2005: 140). به عبارت دیگر در تأمین یک بار، حتماً در طی روز چندین بار خاموشی خواهند داشت که باعث کاهش شدید پایداری شبکه تولید می‌شود. برای رفع بخشی از مشکل نااطمینانی خروجی منابع تجدیدپذیر، سه روش پیشنهاد شده است که عبارت‌اند از (Kanase Patil et al., 2011: 2811):

استفاده از منابع تجدیدپذیر در ظرفیت‌های بزرگ

استفاده از روش‌های ذخیره‌سازی و تجهیزات مبدل ذخیره‌ساز

استفاده از سیستم انرژی تجدیدپذیر یک‌پارچه¹ (IRES) (سیستم‌های انرژی هیبرید)

استفاده از سیستم انرژی تجدیدپذیر یک‌پارچه، که برای تأمین بار از مجموع چند منبع تجدیدپذیر به جای یک منبع مانند باد، خورشید، و غیره استفاده می‌کند، مقرون به صرفه‌ترین و قابل اطمینان‌ترین روش است؛ زیرا وجود چند منبع مختلف، مانند باد و خورشید در کنار یکدیگر، باعث می‌شود که با بهره‌برداری از مزایای یک منبع تجدیدپذیر، چالش پیش روی استفاده از منبع دیگر پوشانده شود. این بدان معنی است که منبع باد در زمانی که منبع خورشیدی توانایی تولید توان را ندارد، مقداری از توان را تأمین کند و برعکس هنگامی که منبع بادی توانایی تأمین بار را ندارد، منبع خورشیدی توان زیادی تولید کند بار را تأمین نماید. لذا در این سیستم، توان خروجی این چند منبع تجدیدپذیر در کنار هم، از کفایت² و صافی³ قابل قبولی برخوردار است. همچنین در صورت قرار داشتن باتری در کنار این منابع، توان خروجی سیستم کاملاً صاف می‌شود، که بار

1- Integrated Renewable Energy System

2- Adequaty

3- Smooth

سیستم را با قابلیت اطمینان خیلی بالا تأمین می کند (Zhou et al., 2010: 387). به منظور اهداف افق چشم‌انداز 1410 انرژی‌های تجدیدپذیر در منطقه خراسان بزرگ، مطالعات جامعی در خصوص پتانسیل انرژی‌های تجدیدپذیر در این منطقه انجام شده است. بر اساس این مطالعات، در میان انواع انرژی‌های تجدیدپذیر، خراسان از پتانسیل خوب وزش باد و تابش نور خورشید برخوردار است. از طرفی وجود شهرهای بزرگی مانند مشهد و تولید روزانه انبوه زباله‌ها، همچنین وجود زمین‌های زراعی در منطقه، فرصت خوبی را برای توسعه نیروگاه‌های زیست توده در اختیار قرار می‌دهد. بنابراین نقشه راه چشم‌انداز 1410 با تمرکز بر سه انرژی باد، خورشید و زیست توده هدف گذاری شده است. از 8 درصد تولید برق تجدیدپذیر، 6 درصد آن را برق بادی، 1/5 درصد آن را مولدهای خورشیدی و 0/5 درصد آن را برق زیست توده تشکیل خواهد داد (Khorasan Regional Electricity Company, 2012: 10). برای تأمین این میزان برق و با در نظر گرفتن ضریب بهره‌برداری 25 درصد برای توربین‌های بادی، 20 درصد برای مولدهای خورشیدی و 80 درصد برای نیروگاه‌های زیست توده، ظرفیت توربین‌های بادی در افق چشم‌انداز به 822 مگاوات، ظرفیت مولدهای خورشیدی به 257 مگاوات و ظرفیت نیروگاه‌های زیست توده به 22 مگاوات خواهد رسید. اجرای این سیاست‌ها، ایجاد 5000 شغل را به همراه خواهد داشت (Ibid).

در این پژوهش به منظور امکان‌سنجی عملیاتی-اقتصادی استفاده از «منابع تجدیدپذیر در ظرفیت‌های بزرگ در منطقه خراسان» در کنار استفاده از «سیستم انرژی تجدیدپذیر یک پارچه⁴ (IRES) (سیستم‌های انرژی هیبرید)»، با بررسی ویژگی‌های اقلیمی منطقه خراسان و مجاورت این منطقه با استان‌های کشور (سمنان، سیستان، یزد و مازندران) و کشورهای خارجی (ترکمنستان و افغانستان) در کنار بررسی شرایط فنی-اقتصادی تولید برق تجدیدپذیر، تأثیر اجرای سیاست‌های افق چشم‌انداز 1410 انرژی‌های تجدیدپذیر شرکت برق منطقه‌ای خراسان مورد بررسی قرار گرفته است. به عبارت دیگر سؤال اصلی این پژوهش عبارت است از اینکه تأثیرات اقتصادی، تجاری و زیست‌محیطی منطقه‌ای و فرامنطقه‌ای اجرای سیاست‌های افق چشم‌انداز 1410 انرژی‌های

تجدیدپذیر در منطقه خراسان از چه قرار است؟ بر این اساس و برای پاسخ‌گویی به این سؤال، در ابتدا مبانی نظری و ادبیات پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است و سپس مدل و داده‌های پژوهش به منظور شبیه‌سازی ویژگی‌های فنی-اقتصادی-اقلیمی تولید برق در منطقه خراسان ارائه شده است. در نهایت نیز نتایج مدل، نتیجه‌گیری و دلالت‌های پژوهش ارائه شده است.

ادبیات موضوع و مبانی نظری

مبانی نظری این پژوهش را می‌توان در چهار بخش مورد بررسی قرار داد. در بخش اول ویژگی‌های اقلیمی منطقه خراسان بزرگ با تأکید بر جنبه تأمین انرژی‌های تجدیدپذیر در این منطقه مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش دوم فرآیند توسعه صنعت برق و ماهیت منطقه‌ای تولید برق در ایران بررسی شده است و در بخش سوم، اشاره کوتاهی به مبانی برنامه‌ریزی تولید هیبرید فسیلی-تجدیدپذیر در چارچوب دانش میان‌رشته‌ای اقتصاد انرژی شده است.

بررسی ویژگی‌های اقلیمی منطقه خراسان بزرگ با تأکید بر انرژی‌های تجدیدپذیر

ساکنان منطقه خراسان از سال‌های پیش از دسترسی صنعتی به منابع فسیلی، از باد برای تأمین انرژی خود و آسیاب کردن گندم استفاده می‌کردند. وجود آسیاب‌های بادی نشتیفان با قدمتی 1000 ساله در منطقه خواف، گواه این واقعیت است. مجموعه آسیاب‌های بادی نشتیفان در خواف، که در گویش محلی به آن‌ها «آس‌باد» گفته می‌شود، از بزرگ‌ترین مجموعه‌های خشت، گل و چوب بازمانده از گذشته هستند. وزش دائمی باد در این منطقه عامل ساخت این آسیاب‌های بادی به دست گذشتگان بوده است. چرخش این آس‌بادها به وزش باد قوی، مداوم و شبانه‌روزی 120 روزه سیستان بستگی داشته است که در مناطق مختلف خراسان، به‌ویژه از خواف تا نهبندان می‌وزد. آغاز وزش باد 120 روزه در اردیبهشت‌ماه و درست در زمانی صورت می‌گیرد که در اغلب مناطق کشور، شدت وزش باد کم است. با حرکت پره‌های چوبی این آس‌بادها، نیروی تولید شده به سنگ آسیاب وارد و گندم‌ها آسیاب می‌شدند. با وجود میزان وزش باد مناسب، ساکنان نشتیفان برای جبران کاهش شدت وزش باد در مواقعی از سال، آب رودخانه‌های جنوب شهر را به سمت پره‌های توربین هدایت کرده و با این کار بر ماهیت متغیر و نوسانی بودن این انرژی تجدیدپذیر غلبه می‌کردند (Ibid: 11).

منطقه خواف در خراسان بزرگ با قرارگیری در مسیر بادهای 120 روزه سیستان، یکی از

مناطق کشور است که از شدت وزش بالای باد برخوردار است. متوسط شدت وزش باد در این منطقه حدود 9 متر بر ثانیه است. در این سرعت بیشتر توربین‌های بادی دارای بازدهی بیش از 80 درصد خواهند بود. نیروگاه 100 مگاواتی خواف که در بهار سال 1391 عملیات اجرایی آن آغاز شده است، اولین واحد نیروگاهی در این منطقه است (همان: 12). بنابراین واضح است که خراسان بزرگ به لحاظ موقعیت خاص جغرافیایی، دارای پتانسیل خوبی برای نصب توربین‌های بادی است. بر اساس مطالعات و پتانسیل‌سنجی ماهواره‌ای انجام گرفته در شرکت برق منطقه‌ای خراسان (1391)، خراسان بزرگ دارای 14 میلیون هکتار زمین با شدت وزش مناسب باد است و با فرض تخصیص 20 هکتار زمین برای هر مگاوات توربین و با حفظ حریم توربین‌ها، این منطقه پتانسیل نصب 7 هزار مگاوات توربین بادی را داراست (Ibid: 10).

از سوی دیگر خراسان بزرگ سالانه حداقل 300 روز آفتابی را پشت سر می‌گذارد که متوسط شدت تابش روزانه در این منطقه 5 کیلووات ساعت در مترمربع برآورد شده است. با فرض تخصیص 5 هکتار زمین برای هر مگاوات مولد خورشیدی و استفاده از یک درصد زمین‌های خراسان بزرگ، امکان نصب 40 هزار مگاوات مولد خورشیدی در منطقه وجود دارد (همان). همچنین بر اساس مطالعات مکان‌یابی و پتانسیل‌سنجی تأسیس نیروگاه‌های زیست‌توده که توسط سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا) انجام گرفته است، شهر مشهد بهترین مکان برای تأسیس نیروگاه زیست‌توده و بهره‌برداری از پسماند جامد شهری ورودی به دفن‌گاه زباله در منطقه خراسان بزرگ به شمار می‌رود. شایان ذکر است به کارگیری پتانسیل‌های برآورد شده نه تنها به استحصال انرژی بلکه به رفع بخش عظیمی از مشکلات مربوط به آلودگی و مسائل زیست‌محیطی ناشی از مدیریت پسماندها نیز کمک شایانی خواهد نمود. بر این اساس چنانچه حداکثر پتانسیل زیست‌توده شهر مشهد در قالب چهار نوع نیروگاه زباله‌سوز از پسماند ورودی به دفن‌گاه، پیرولیز-گازی سازی از پسماند ورودی به دفن‌گاه، هضم بیهوازی از پسماند ورودی به دفن‌گاه و لندفیل از پسماند ورودی به دفن‌گاه مورد استفاده قرار گیرد، ظرفیتی معادل 61/35 مگاوات وارد شبکه خواهد شد. این ظرفیت با ضریب بهره‌برداری متوسط 80 درصد، تولیدی معادل 429/87 گیگاوات ساعت را وارد شبکه خواهد نمود که با توجه به مصرف 4888/61 گیگاوات ساعتی برق شهری مشهد، قابلیت

تأمین 8 درصد تقاضای برق مشترکین شهری مشهد فراهم خواهد شد.⁵

فرآیند توسعه صنعت برق و ماهیت منطقه‌ای تولید برق در ایران

مرور رویدادهای تاریخی از جنبه ساختار و تشکیلات حاکی از آن است که طی نزدیک به یک قرن که از ظهور صنعت برق در کشور می‌گذرد، این صنعت تحولات اساسی ذیل را شاهد بوده است: 1- ورود مولدهای خصوصی تولید برق به کشور (1279 ه.ش)؛ 2- واگذاری مولدهای خصوصی تولید برق به بخش دولتی (1305 ه.ش)؛ 3- تأسیس وزارت آب و برق به منظور افزایش تولید و کاهش هزینه‌ها با اعمال سیاست ملی شدن صنعت برق (1342 ه.ش)؛ 4- تشکیل شرکت‌های برق منطقه‌ای برای مدیریت هماهنگ تولید، انتقال و توزیع در مناطق مختلف کشور (1346 ه.ش)؛ 5- تشکیل شرکت توانیر به منظور استفاده بهینه از انرژی تولیدی، گسترش، توزیع و بهره‌برداری بهینه از نیروگاه‌ها و ایجاد شبکه به هم پیوسته انتقال (1347 ه.ش). 6- تأسیس وزارت نیرو. مصوب 1353 و اصلاحیه 1357؛ به منظور حداکثر استفاده از منابع انرژی و آب کشور و همچنین تهیه و تأمین انرژی و آب.

اتخاذ و اجرای سیاست عدم تمرکز و گسترش فعالیت‌های غیردولتی از قبیل تأسیس شرکت‌های تولید و توزیع برق و واگذاری مدیریت بنگاه‌ها به شرکت‌های برق منطقه‌ای، خصوصی‌سازی و واگذاری شرکت‌های دولتی در اوایل دهه جاری با هدف ارتقای کارایی فعالیت‌ها که به واگذاری فعالیت‌های پشتیبانی و تصدی و ایجاد رقابت در این امور منجر گردید (Hamed and Habibi, 2005: 21-22). در این میان شرکت برق منطقه‌ای خراسان در سال 1343 تشکیل شد و مسئولیت تأمین برق شهرستان مشهد را با استفاده از چند دستگاه مولد دیزلی بر عهده گرفت. در سال 1347 برای تأمین برق شهرهای دیگر استان نیروگاه حرارتی مشهد به بهره‌برداری رسید. در سال 1349 بنا به تصمیم وزارت متبوع (آب و برق) مدیریت نیروگاه مشهد به شرکت تولید و انتقال نیروی برق ایران (توانیر) منتقل و بدین ترتیب این شرکت تا سال 1365 ضمن تأمین برق شهرهای جنوبی و چند شهر شمالی خراسان با نیروگاه‌های دیزلی تحت مدیریت خود

5- آمار مربوط به مصرف شهری مشهد در سال 1391 از آمار تفصیلی صنعت برق ایران، بخش توزیع نیروی برق صفحات 112-120 استخراج شده است.

مسئولیت انتقال و توزیع برق در استان خراسان را بر عهده داشت. در سال 1366 مجدداً با تصویب وزارت نیرو کلیه تأسیسات تولیدی شرکت توانیر شامل نیروگاه‌های توس، مشهد، شریعتی، شیروان و قاین به شرکت برق منطقه‌ای خراسان واگذار و این شرکت وظیفه تولید، انتقال و توزیع برق در استان را عهده‌دار شد و بخش‌های مختلف صنعت برق به‌عنوان اولین استان کشور از مدیریت واحدی برخوردار گردید.

مبانی برنامه‌ریزی تولید هیبرید فسیلی-تجدیدپذیر برق

با توجه به سابقه طولانی برنامه‌ریزی برق در ایران، تصمیم‌گیری بر مبنای عقلانیت^۶ در گزینه‌های سیستم تأمین انرژی، برنامه‌ریزی، مدیریت و اقتصاد انرژی‌های تجدیدپذیر و فسیلی، به توسعه پایدار کمک شایانی خواهد داشت. باین حال این تعامل پیچیده تصمیم‌گیری را دشوارتر می‌سازد. اثر متقابل انرژی و اقتصاد در بخش‌هایی از انرژی، به‌ویژه انقلاب صنعتی و استفاده وسیع از سوخت‌های فسیلی، به‌عنوان نیروی محرکه برای پیشرفت اقتصادی بررسی شده است. اقتصادهای مدرن نتوانستند بدون انرژی به صورت تجاری عمل کنند و در مقابل الگوهای توسعه صنعتی که در آنها ملاحظات زیست‌محیطی در نظر گرفته نشده است الگوهای ناپایدارند (Kowalski et al., 2009: 1069). بر این اساس توسعه پایدار صنعتی چنین تعریف می‌شود: «الگوهای از صنعتی شدن که موجب ارتقا منافع اقتصادی و اجتماعی دوره حال و آینده گردد بدون اینکه به فرایندهای اکولوژیکی آسیب برساند». بنابراین در برنامه‌ریزی توسعه پایدار صنعتی، دو عنصر توسعه صنعتی و پایداری زیست‌محیطی از عناصر اساسی بوده و به‌منظور برخورداری از توسعه با دوام باید توسعه صنعتی بر مفهوم پایداری زیست‌محیطی استوار گردد (Rahimi, 2005: 9).

مشکل اصلی محیط‌زیستی از انتشار آلاینده‌های شیمیایی سمی، گازهای گلخانه‌ای مثل دی‌اکسید کربن و دیگر آلاینده‌های هوا است که باعث تغییر آب و هوا و آلودگی محیط‌زیست از هوا، زمین و آب شده است و دارای تأثیر نامطلوب بر سلامت و کیفیت زندگی انسان‌هاست. مسائل جهانی زیست‌محیطی قابل توجهی می‌تواند الگوی مصرف انرژی در سراسر جهان را تحت

تأثیر قرار دهد (Bilgen et al., 2008: 380).

اگرچه برق در نقطه مصرف نهایی، نسبتاً کمتر روی پیامدهای محیط‌زیست و بهداشتی اثر می‌گذارد ولی مسائل اجتماعی و محیطی مختلفی در فرآیند تولید برق رخ می‌دهند و در تعدادی از نیروگاه‌ها به واسطه تولید برق مشکلاتی از قبیل آلودگی، اتلاف قابل توجه حرارت و انتشار آلاینده‌های مختلف به وجود خواهد آمد. با این حال آثار ذاتی و حوزه‌ای منابع انرژی متفاوت می‌باشد. واحدهای با سوخت نفت و زغال‌سنگ نه تنها آثار ملی بلکه آثار محیط‌زیستی جهانی و منطقه‌ای و آثار سلامتی-بهداشتی دارد. باران اسیدی شاید جدیدترین مسئله فراملی امروزه باشد. نیروگاه‌های با سوخت زغال‌سنگ و نفت مقادیر مهمی از دی‌اکسید سولفور و اکسید نیتروژن را در اتمسفر منتشر کرده‌اند. باران اسیدی توسط اکسیدهای گوگرد و نیتروژن باعث ایجاد صدمه به درختان و محصولات زراعی و در برخی موارد به گسترش اسیدی شدن نهرها و دریاچه‌ها و در نتیجه تخریب اکوسیستم‌های آبی خواهد شد. (Munasinghe, 2009: 720). تغییر آب و هوا نشان دهنده ویژگی بسیار مهمی در برنامه‌های زیست‌محیطی یا سیاست‌های اقتصادی کشورهای در حال توسعه جهان است. این در حالی است که اشتراک مساعی بین سیاست‌های تغییر آب و هوا و برنامه‌های توسعه پایدار مثل بازدهی انرژی، صرفه‌جویی در انرژی، انرژی تجدیدپذیر، حمل‌ونقل و سیاست‌های پایداری زمین، در کشورهای در حال توسعه وجود دارند.

در گزارش‌های متعددی روی شاخص‌های مرتبط با شاخص‌های انرژی مرتبط با توسعه پایدار بحث شده است که برای مثال شاخص‌های انرژی برای توسعه پایدار⁷ (EISD)، 30 شاخص انرژی برای توسعه پایدار را به‌طور جامع شرح می‌دهد و دستورالعمل‌ها و روش‌های خاص در مورد نحوه ساخت آن‌ها ارائه می‌دهد. شاخص‌های انرژی برای توسعه پایدار برای سیاست‌گذاران، تحلیل‌گران انرژی و متخصصان آمار برای ارزیابی از شرایط فعلی سیستم‌های انرژی مفید می‌باشد. این شاخص‌ها به منزله چراغ راه برای بهبود وضعیت آماری و توسعه سیستم‌های انرژی منطقه‌ای و ملی تفسیر شده است؛ همچنین تأکید بر این نماگرها با بالا بردن آگاهی نیاز به پیگیری توسعه پایدار در فرمولاسیون پروژه‌های انرژی، به کشورها به خصوص کشورهای در حال توسعه برای

7- Energy indicators for sustainable development

تعریف یک رویکرد یکپارچه در جهت توسعه و پایداری انرژی کمک خواهد نمود (Vera and Langlois, 2007: 277).

به طور ساده دو مکتب ایدئولوژیکی را می توان در اقتصاد محیط زیست تفکیک نمود که عبارتند از فن محوری¹ و اقتصاد محوری². طرفداران دیدگاه فن محوری بر این عقیده اند که نبایستی فشار یا قید و بندی بر افراد مصرف کننده یا بر بازارها اعمال گردد. آن ها طرفدار فلسفه «بازار آزاد بدون محدودیت» بوده و فلسفه مزبور را با اعتقاد راسخ به قدرت تکنولوژی جهت غلبه بر معضلات مربوط به «محدودیت های زیستی» تلفیق می کنند و قائل به امکان جداسازی گسترده هستند. این دیدگاه «فن محوری حد و فور نعمت»³ و سیستم حاصل از آن را اقتصاد ضد سبز⁴ نامیده نامیده می شود. در این رابطه، دیدگاه دیگری که از افراط گیری کمتری برخوردار است و «فن محوری انعطاف پذیر»⁵ نام دارد، می پذیرد که بازارهای آزاد دارای آثار مفیدی بر محیط زیست هستند، اما تنها در شرایطی که افراد تفکر و عمل مطابق با هنجارهای زیست محیطی داشته باشند. بنابراین، مصرف کننده سبز، سرمایه گذار سبز، شهروند سبز و کارمند سبز، عوامل قدرتمند می باشند. از این دیدگاه، احتمال جداسازی وجود دارد، اما برای یک اقتصاد پایدار همچنین برخی محدودیت های زیست محیطی (یعنی حفظ سیستم تأمین زندگی و حفظ ظرفیت جذب ضایعات) الزام آور گشته و نیازمند برخی تغییرات خواهد بود. برخی منابع زیست محیطی (که به «سرمایه بحرانی طبیعی»⁶ معروفند) باید به دقت حفظ و نگهداری شوند تا بدون کم و کاست به نسل های آتی منتقل گردند. سایر منابع زیست محیطی (که به «سایر سرمایه های طبیعی» معروفند) را با توجه به احتمال جایگزینی آنها بین رده های مختلف سرمایه های طبیعی یا بین سرمایه طبیعی، سرمایه فیزیکی و سرمایه انسانی (یعنی مهارت ها، دانش و خلاقیت بشری) می توان مورد بهره برداری قرار

1- Technocentrism

2- Ecocentrism

3- Conrnuocopain Technocentrism

4- The Anti-green Economy

5- Accomodating Technocentrism

6- Critical Natural captial

داد. این قانون «سرمایه ثابت» ویژگی مهم آن چیزی است که ما به‌عنوان توسعه اقتصادی پایدار از آن یاد می‌شود (Turner et al., 1994: 8-9).

پیشینه تحقیق

در مورد ایجاد ارتباط یکپارچه و تحلیل سیستمی ترکیب منابع تجدیدپذیر و فسیلی، پژوهش‌های گوناگونی به‌ویژه در سال‌های اخیر در کشورهای مختلف انجام شده است که به جهت رعایت اختصار، ابتدا مهم‌ترین مطالعات داخلی مرتبط و سپس مواردی از جدیدترین و جامع‌ترین مطالعات خارجی ارائه شده‌اند:

شادی‌طلب و نایه در واکاوی عوامل مؤثر بر پذیرش آبگرمکن‌های خورشیدی خانگی در نواحی روستایی (مطالعه موردی شهرستان بردسکن) پرداخته‌اند. این پژوهش با روش پیمایش و در روستاهای شهرستان بردسکن در استان خراسان رضوی انجام شده است. بر اساس یافته‌های پژوهش در بین متغیرهای مورد بررسی (سن، تحصیلات، نگرش نسبت به تکنولوژی، نگرش نسبت به سکونت دائم در روستا، میزان درآمد، دسترسی به اعتبارات و مزیت نسبی) دو متغیر میزان درآمد خانوار روستایی و مزیت نسبی آبگرمکن‌های خورشیدی خانگی پذیرش آن را توسط روستاییان تبیین می‌کند. به‌عبارت‌دیگر با افزایش میزان درآمد بر میزان پذیرش آبگرمکن خورشیدی افزوده می‌شود (Shaditalab and Nayehtdor, 2009).

رحیمی و همکاران با هدف فرهنگ‌سازی و آموزش به بررسی فنی استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در یک واحد نمونه ساختمانی در شهر سمنان پرداخته‌اند. نویسندگان بر این نکته تأکید دارند که شهر سمنان به‌عنوان یکی از شهرهای مرکزی ایران، با برخورداری از دانشگاه‌ها و مراکز آموزش عالی متعدد، و همچنین با داشتن پتانسیل انرژی فراوان آفتاب، باد کافی در ساعات گرم تابستان و حجم مناسب زباله‌های آلی، نمونه خوبی برای انجام این کار تحقیقاتی می‌باشد. از این‌رو در این مقاله ضمن بررسی و مطالعه پتانسیل انواع انرژی‌های تجدیدپذیر در سمنان، اقدام به بررسی فنی استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و بهینه‌سازی مصرف انرژی در یک واحد نمونه ساختمانی جهت فرهنگ‌سازی و آموزش عموم مردم شده است (Rahimi et al., 2008).

محمودی و همکاران به بررسی نقش نانو تکنولوژی در کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی صنعت ساختمان پرداخته‌اند. در این پژوهش چگونگی بهره‌گیری از نانو تکنولوژی در زمینه‌های

ذیل مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. 1- بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان‌ها 2- پاک‌سازی هوای فضاها و مسکونی 3- دستیابی به مصالح تجدیدپذیر که ضمن مقاومت بالا حداقل آسیب را به محیط‌زیست وارد می‌کند. تحقیق انجام گرفته بر مبنای مطالعات کتابخانه‌ای و جستجوهای اینترنتی است. روش تحقیق نیز توصیفی - تحلیلی می‌باشد و بخشی از تحقیق براساس نمونه‌های آزمایشگاهی انجام گرفته است (Mahmoudi et al., 2008).

معینی و همکاران، تابش خورشیدی در ایران با استفاده از یک مدل بهینه برآورد کرده‌اند. در این مقاله ساعات آفتابی برای تخمین میانگین ماهانه میزان تابش خورشید بر سطح افقی استفاده شده است، که می‌توان میزان تابش خورشید را برای مناطق مختلف اقلیمی ایران پیش‌بینی نمود. در این پژوهش با استفاده از داده‌های تابشی ثبت شده توسط ایستگاه‌های پیرانومتری و میزان ساعات آفتابی که از سازمان هواشناسی دریافت شده است (Moeni et al., 2010).

عبدی و همکاران امکان سنجی احداث نیروگاه بادی 10 مگاواتی مراوه تپه را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این مقاله با توجه به پتانسیل بادی منطقه نمونه (مراوه تپه)، بر اساس اطلاعات هواشناسی و روش‌های آماری مناسب و با استفاده از نرم‌افزار comfar، امکان سنجی فنی و اقتصادی احداث یک نیروگاه بادی ده مگاواتی بررسی شده است (Abdi et al., 2011).

کتابداری و احمدی به کمک مدل‌سازی عددی به امکان سنجی جذب انرژی از امواج دریا در سواحل جنوبی ایران پرداخته‌اند. به اعتقاد نویسندگان این مقاله، امروز در دنیا طرح‌های مختلفی در رابطه با جذب انرژی امواج اقیانوسی ارائه گردیده است که اکثراً هنوز در مراحل تحقیقاتی بوده و به تولید انبوه نرسیده‌اند. در این مقاله ابتدا اندر کنش امواج با این دستگاه توسط نرم‌افزار مدل سازی شده است و سپس چهار موج محتمل خلیج فارس با ارتفاع‌های مختلف انتخاب شده و به‌عنوان ورودی به مدل داده شد. نتایج مدل سازی نشان داد که اگر ارتفاع امواج ورودی به سیستم 10% افزایش یابد توان دستگاه 40% افزایش می‌یابد (Ketabdari and Ahmedi, 2011).

امامی میبدی و حیدری به بررسی تبدیل نیروگاه‌های گازی ساده به چرخه ترکیبی و تأثیر آن بر میزان مصرف سوخت‌های فسیلی پرداخته‌اند. این مطالعه به مقایسه دو مولد فوق پرداخته و یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد، در سطح قیمت‌های یارانه‌ای سوخت (پیش از اصلاح قیمت حامل‌های انرژی)، تبدیل نیروگاه‌های گازی به چرخه ترکیبی و یا احداث مولدهای تجدیدپذیر برای تولید برق، فاقد توجیه اقتصادی است. آستانه توجیه‌پذیری این جایگزینی، در شرایط

بهره‌برداری بار میانی، سطح قیمت‌های 500 ریال برای هر متر مکعب و بالاتر بوده و هر چه قیمت از این سطح بالاتر می‌رود، تبدیل تعداد بیشتری از مولدهای گازی توجیه‌پذیر می‌شود. در سطح قیمت 1300 ریال برای هر متر مکعب، نسبت منافع به مخارج برای تبدیل اغلب مولدهای گازی به چرخه ترکیبی، بیش از 2 است. با این حال بر اساس نتایج این پژوهش و با توجه به این نکته که نسبت منافع به مخارج برای تبدیل برخی از مولدهای گازی ساده به چرخه ترکیبی کمتر از یک است، می‌توان نتیجه گرفت مولدهای چرخه ترکیبی نسبت به مولدهای گازی ساده برتری مطلق ندارند (Emami Meybodi and Haideri, 2012).

در پژوهش مستوفی و همکاران، هدف اصلی کمینه‌سازی هزینه نهایی نیروگاه ترکیبی مستقل از شبکه برق است. این نیروگاه از ترکیب واحدهای برق آبی کوچک، سیستم فتوولتائیک، توربین‌های بادی بر پایه ذخیره‌سازی هیدروژن و استفاده از هیدروژن در پیل سوختی به‌منظور تأمین برق مورد نیاز ایستگاه پمپاژ آب سد سلان به مزارع واقع در اطراف این سد پیشنهاد می‌شود. برای یافتن ظرفیت سیستم ترکیبی پیشنهادی از الگوریتم تجمعی زنبور عسل استفاده شده است. در ادامه، برای ارزیابی صحت و دقت الگوریتم پیشنهادی، نتایج حاصله با نتایج حاصل از مدل HOMER¹ مقایسه شده است.² ارزیابی نتایج حاکی از دقت و کارایی مناسب الگوریتم تجمعی زنبور عسل در تعیین ظرفیت بهینه سیستم ترکیبی برق آبی، بادی، خورشیدی و هیدروژنی است (Mostofi et al., 2012).

نامور بهرغانی و همکاران با هدف کاهش وابستگی ریزش شبکه به سوخت فسیلی، اندازه بهینه منابع در یک ریزش شبکه متعامل با بازار برق برای تأمین بار الکتریکی و حرارتی را تعیین نموده‌اند. در این مقاله، روشی جدید برای تعیین اندازه منابع در یک ریزش شبکه متعامل با بازار برق، برای تأمین بار الکتریکی و حرارتی ارائه شده است. منابع به کار رفته در ریزش شبکه پیشنهادی شامل منابع باد/ خورشیدی به‌عنوان منابع اصلی، پیل سوختی به‌عنوان ذخیره ساز و منبع تولید هم‌زمان، گرم

1- Hybrid Optimization Model for Electric Renewables

2- مدل HOMER عموماً برای مدل بهینه‌سازی ترکیبی برای برق تجدیدپذیر مورد استفاده قرار می‌گیرد و سیستمهای قدرت کوچک و تولید هم‌زمان برق و حرارت به راحتی در این مدل قابل مدلسازی است.

کن به‌عنوان تأمین‌کننده قسمتی از بار حرارتی در زمانی که توان تولیدی بیشتر از بار، و سیستم ذخیره برق نیز ظرفیت کافی نداشته باشد و همچنین بویلر به‌عنوان پشتیبان برای تأمین مطمئن بار حرارتی است (Namvar Bahraghani et al., 2012).

اسلاملوئیان و استادزاد الگویی برای تعیین سهم بهینه انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر در مسیر رشد پایدار طراحی نموده و این سهم‌ها را برای اقتصاد ایران محاسبه نموده‌اند. در این راستا، ابتدا انرژی‌های فسیلی و تجدیدپذیر به‌عنوان نهاده‌های تولید به یک الگوی رشد درونزا اضافه شده است. الگوی مورد نظر در قالب یک مسئله کنترل بهینه طراحی گردیده است. نتایج بیانگر فاصله قابل توجه اقتصاد ایران از مسیر بهینه رشد پایدار است. براساس حل عددی الگو، در سال 1389، سهم بهینه انرژی تجدیدپذیر بایستی 0/8 درصد از کل انرژی باشد. اما در عمل این سهم در این سال تنها 0/4 درصد بوده است. همچنین با توجه به پیش‌بینی الگو، برای اینکه اقتصاد ایران تا سال 1400 بر مسیر رشد پایدار قرار گیرد بایستی 2/1 درصد از کل انرژی به وسیله انرژی‌های تجدیدپذیر تولید شود. دستیابی به این مهم، مستلزم رشد متوسط سالانه 26 درصدی تولید انرژی‌های تجدیدپذیر در دوره 1389 تا 1400 است (Eslamloyian and Astadzad, 2012).

شریفی و همکاران (1392)، به‌منظور حداکثر کردن رفاه اجتماعی، یک مدل کنترل بهینه طراحی و با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک، مسیرهای بهینه جایگزینی انرژی خورشید و باد به جای سوخت‌های فسیلی در طی زمان را در اقتصاد کلان و سیستم انرژی ایران ترسیم نموده‌اند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد در صورت ثابت ماندن هزینه تبدیل انرژی خورشیدی و بادی و در نظر گرفتن نرخ تنزیل اجتماعی پنج درصد، انتقال از انرژی‌های فسیلی به سمت انرژی خورشیدی و بادی در سال 1466 (77 سال پس از سال مبنا) و با فرض کاهش 50 درصدی هزینه تبدیل انرژی خورشید و باد در هر ده سال، این انتقال در سال 1409 (20 سال پس از سال مبنا) می‌بایست صورت پذیرد (Sharifi et al., 2013).

سیر تکاملی پژوهش‌های اخیر نشان از توجه ویژه و روزافزون به انرژی‌های تجدیدپذیر و مدل‌سازی کاربردی تولیدات پاک در مطالعات دارد. در ادامه به چند مورد از مهم‌ترین و جامع‌ترین پژوهش‌های انجام شده در مطالعات خارجی مرتبط با موضوع پژوهش اشاره خواهد شد. لازم به ذکر است که موضوع مدل‌سازی سیستم تولید و شبیه‌سازی ترکیب انرژی‌های تجدیدپذیر و فسیلی، از جدیدترین موضوع پژوهش در حوزه اقتصاد انرژی به شمار می‌رود و

مطالعات جامع در این خصوص اغلب مربوط به سال‌های اخیر است.

مارتین و همکاران به بررسی تأثیر استفاده از سلول‌های سوختی در سیستم‌های هیبریدی مبتنی بر نیروگاه‌های خورشیدی و بادی کوچک مقیاس پرداخته‌اند. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که بدون حضور نیروگاه‌های تجدیدپذیر و در صورت عدم استفاده از سلول‌های سوختی ترکیبی، 33 درصد انرژی اولیه به الکتریسیته تبدیل می‌شود ولی در صورت استفاده از این فناوری و بهره‌برداری از نیمی از پتانسیل تجدیدپذیر موجود، 55 درصد انرژی اولیه به الکتریسیته تبدیل می‌شود. نتیجه جالب توجه این پژوهش آن است که در صورت استفاده از نیروگاه‌های گازی سیکل ترکیبی مدرن، درصد بهره‌برداری کارا از انرژی اولیه به 90 درصد می‌رسد (Martín et al., 2010).

اوسترگارد استراتژی‌های مختلف تولید همزمان نیروگاه‌های ترکیبی برق و گرمایش را با تأکید بر امکان‌سنجی انتقال الکتریسیته به دانمارک از طریق خطوط انتقال برق نیروگاه‌های برق‌آبی سوئد و نروژ و برق تولیدی در سیستم تولید برق از گرما در آلمان، شبیه‌سازی و ارزیابی نموده است و راه کارهایی را برای ایجاد تراز انرژی و قانون‌گذاری نحوه تعامل این چهار کشور مطرح نموده است که بتواند پاسخ‌گوی منافع متقابل و ایجاد همبستگی تجاری-اقتصادی میان کشورهای اروپایی باشد (Østergaard, 2010).

کونولی و همکاران با فرض تعبیه یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی بزرگ مقیاس به شبیه‌سازی و امکان‌سنجی استفاده از تکنولوژی ذخیره‌سازی پمپ هیدروالکترویک در سیستم انرژی ایرلند پرداخته‌اند. این پژوهش نشان می‌دهد که با استفاده از این سیستم، هزینه عملیاتی تولید برق کاهش می‌یابد و تکنولوژی ذخیره‌سازی پمپ هیدروالکترویک به منجر به افزایش بهره‌برداری از انرژی بادی در سیستم انرژی بادی ایرلند می‌شود (Connolly et al., 2012).

ژای و همکاران به بررسی پتانسیل کاهش انتشار آلاینده‌های هوا در اثر افزایش 10 درصد تولید برق خورشیدی در ده ایالت آمریکا پرداخته‌اند. میزان کاهش انتشار در این ده ایالت به ترتیب در مورد کربن دی‌اکسید به میزان 1500 گرم در وات و برای گوگرد دی‌اکسید سولفور 7/8 گرم در وات بوده است. به‌علاوه این میزان افزایش در استفاده از انرژی خورشیدی، به کاهش 2/4

گرم ناکس³ در هر وات نیز منجر شده است (Zhai et al., 2010).

کابالرو و همکاران با شبیه سازی فرآیند تولید برق در شهر هانگاروا⁴ در ایسترایسلند شیلی⁵، تأثیر ایجاد یک سیستم انرژی هیبریدی⁶ (HES) را با در نظر گرفتن ورود پانل های خورشیدی و توربین های بادی مورد بررسی قرار داده اند. هدف این پژوهش طراحی یک سیستم بهینه تجاری برای سیستم های انرژی هیبریدی کوچک مقیاس برای 15 واحد مسکونی شهری است که بتواند هزینه طول عمر⁷ (LLC) سیستم را به حداقل برساند. نتایج این پژوهش نشان می دهد که استفاده از سیستم های انرژی هیبریدی، نه تنها به افزایش طول عمر سیستم تولید منجر می شود، بلکه از آثار زیست محیطی قابل توجهی نیز برخوردار است. در این میان نرخ کارایی 85 درصدی ژنراتورهای بادی، کمک شایانی به بالا رفتن کارایی جمع شده سیستم کرده است و در مقابل کارایی صفحه های خورشیدی اثر کارآمدی بر سیستم نداشته است (Caballero et al., 2013).

پرکویچ و همکاران به امکان سنجی تولید برق در نیروگاه های بادی و بررسی اثر مانگوس⁸ در استفاده از منابع بادی می پردازند و به دنبال مدل سازی فنی-اقتصادی نحوه استفاده از حداکثر پتانسیل منابع بادی هستند. سناریوهای مختلف هزینه ای و نیروگاهی در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته اند و با توجه به میزان فاصله مبدأ تولید و مقصد مصرف انرژی الکتریکی ایجاد شده در منابع بادی، امکان و قابلیت عملیاتی شدن تأسیس نیروگاه ها، با ظرفیت های مختلف، ارزیابی شده اند (Perkovic et al., 2013).

پرزا و اوسترگارد به ارزیابی آثار قیمتی، هزینه ای و زیست محیطی استفاده از تهویه مطبوع طبیعی به جای سیستم تهویه مطبوع الکتریکی در سیستم انرژی بخش خانگی مکزیکی پرداخته اند. نتایج نشان می دهند که این جایگزینی منجر به کاهش 2/89 میلیون تنی انتشار کربن دی اکسید در

3- NOx

4- Hanga Roa

5- Easter Island, Chile

6- HybridEnergy System

7- Life Cycle Cost

8- Magnus effect

طول دوره تولید یکساله خواهد شد که کاهشی معادل 2/17 درصدی انتشار کربن دی‌اکسید در سیستم انرژی مکزیک را به دنبال خواهد داشت. به علاوه با استفاده از سیستم تهویه مطبوع طبیعی، 12/5 بیلیون مترمکعب آب در نیروگاه‌های برق‌آبی ذخیره خواهد شد (Perez a and Østergaard, 2013).

لئو و همکاران به بررسی تأثیر تولید یکپارچه نیروگاه‌های بادی تولید برق بزرگ‌مقیاس و وسایل حمل‌ونقل الکتریکی در سیستم برق بخش مغولستان چین در سال 2009 می‌پردازند. در سال مبنای شبیه‌سازی سیستم برق، 6/5 درصد برق تولیدی در این بخش از کشور از طریق نیروگاه‌های بادی بزرگ مقیاس تولید شده است. در بهترین سناریوی توسعه نیروگاه‌های بادی و استفاده وسایل حمل‌ونقل الکتریکی از این رقم باید به 8 درصد برسد و در چنین شرایطی میزان انتشار کربن دی‌اکسید به حداقل رسیده و کارایی سیستم نیز حداکثر خواهد شد (Liu et al., 2013).

سابرو و همکاران به ارزیابی تأثیر وارد شدن انرژی‌های تجدیدپذیر به سیستم انرژی کشورهای فروسحرای آفریقا پرداخته‌اند و بدین منظور پتانسیل انرژی‌های خورشیدی، زیست‌توده، بادی، برق‌آبی و زمین‌گرایی را مورد بررسی قرار داده‌اند. قیود مالی پروژه‌های تأسیس، 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 مؤثر بر ایجاد یک سیستم تولید انرژی‌های تجدیدپذیر برای تولید برق را تحت پنج عنوان فقدان اراده سیاسی، نبود سرمایه‌گذاری و کالای سرمایه‌ای کافی، نبود تحقیقات و پژوهش‌های میدانی مناسب و قابل‌اتکا، فقدان استراتژی‌های توسعه بخش انرژی و عدم آگاهی عمومی مورد قرار داده‌اند (Suberu et al., 2013).

هینینگ و پالزر به شبیه‌سازی جامع بخش گرمایش و الکتریسته آلمان در فرآیند آینده‌پژوهی بخش انرژی این کشور پرداخته‌اند. در این پژوهش به جایگاه ویژه انرژی‌های تجدیدپذیر در بخش انرژی آلمان توجه بسیاری شده است 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 شده است و در نهایت سناریوی با کمترین هزینه ممکن انتخاب شده است. از این رو در مسئله بهینه‌یابی سناریوهای این پژوهش، کمترین هزینه تولید

به‌عنوان بهینه‌نمایی معرفی خواهد شد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بخشی از تقاضای گرمایش و الکتریسته آلمان که حدود 62 درصد تقاضای انرژی آلمان را تشکیل می‌دهد را می‌توان از طریق منابع تجدیدپذیر تأمین نمود به نحوی علاوه بر برآورده شدن قیود سیستم تولید، 100 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 تغییری نخواهد کرد و منجر به گران‌تر شدن تولید نخواهد شد (Henning and Palzer, 2014).

مدل و داده‌های پژوهش

منطقه خراسان بزرگ، حدود یک ششم مساحت کشور را به خود اختصاص داده است. این مساحت حدود 10 درصد جمعیت کل کشور را تحت پوشش خود قرار داده است. این منطقه از شمال به ترکمنستان و از شرق به افغانستان محدود می‌شود. از جنوب با استان‌های سیستان و کرمان و از غرب با استان‌های یزد، سمنان و گلستان مجاور است. چهار پست انتقال بین منطقه‌ای و دو پست انتقال فرامنطقه‌ای در اختیار شرکت برق منطقه‌ای خراسان قرار دارد. 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 1962 کیلوولت است که ظرفیت ترانسی معادل 252555 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 30 درصد تعیین شده است. نیروگاه‌های فسیلی (گازی، بخاری و سیکل ترکیبی) در کنار نیروگاه‌های زمین-گرمایی و هسته‌ای از جمله تکنولوژی‌های تولیدی هستند که توانایی پایدارسازی شبکه را دارند (Lund, 2014: 86). از این رو در پژوهش حاضر نیز حداقل سهم واحدهای تولیدی پایدارساز در

شبکه تولید، 30 درصد تعیین شده است.

در این پژوهش برای شبیه‌سازی سیستم تولید از روش برنامه‌ریزی آنالیزی⁹ با رویکرد توأم توصیفی-تجویزی¹⁰ استفاده شده است. برنامه‌ریزی آنالیزی یکی از روش‌های نوین بهینه‌یابی عددی است که مبانی آن اولین بار توسط زلینکا¹¹ (2001) 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 این مسائل است. به دلیل ماهیت تغییرپذیر مجموعه مسائل، از اصطلاح مجموعه تابعی عمومی¹² (GFS) برای نام‌گذاری آن استفاده می‌شود. در برنامه‌ریزی آنالیزی پاسخ‌هایی مناسب شناخته خواهند شد که نگاهت¹³ اعضای مجموعه تابعی به مجموعه‌ای از برنامه‌های احتمالی و عملیاتی باشند. به علاوه در مجموعه تابعی عمومی، زیرمجموعه‌های حضور دارند که هر یک در بردارنده تعدادی تابع هستند. تعداد توابع موجود در هر زیر مجموعه نیز، کوچک تر یا مساوی تعداد اجزای زیرمجموعه است. به دست آوردن نگاهت اعضای مجموعه تابعی از یک فرآیندی دو بخشی تبعیت می‌کند: بخش اول ارزیابی مجموعه گسسته¹⁴ (DSH) و بخش دوم طراحی فرآیندهای تضمین‌کننده است. فرآیند ارزیابی مجموعه گسسته توسط زلینکا (2004) و زلینکا و همکاران (2005) در ایجاد یک شاخص گسسته مورد استفاده قرار گرفت که در یک فرآیند تکاملی همانند ارزیابی افراد جایگزین در ساختار لانه‌ای¹⁵ به خوبی می‌تواند راه‌حل مناسب را ارائه کند. از این رو می‌توان برنامه‌ریزی آنالیزی را در مورد مسائل دقیق ریاضی،

9- Analytical programming

10- Descriptive-Prescriptive

11- Zelinka

12- General Functional Set

13- Mapping

14- Discrete Set Handling

15- Nested structure

شبهه‌سازی‌های سیستمی و برنامه‌ریزی‌های انرژی بخشی مورد استفاده قرار داد. در رهیافت برنامه‌ریزی آنالیزی، با فرض اینکه تقاضای لحظه‌ای-ساعتی در هر بازه زمانی، معین یا قابل پیش‌بینی باشد، ماژول محاسبه قیمت سیستم تولید، از الگوی قیمت لحظه‌ای-ساعتی پیروی می‌کند و بر این اساس، قیمت در هر بازه زمانی بر اساس اجزای زیر تعیین می‌شود (Bohn et al., 1986: 363-364):

هزینه سوخت تولیدکننده زام برای تولید $g_j(t)$ در ساعت t $(G_{j,F}[g_j(t)])$.
 هزینه بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری تولیدکننده زام در سطح تولید $g_j(t)$ در ساعت t $(G_{j,M}[g_j(t)])$.
 هزینه‌های سرمایه‌گذاری و توسعه ظرفیت تولیدکننده زام در سطح تولید $g_j(t)$ در ساعت t $(G_{j,I}[g_j(t)])$.

در برخی از مدل‌ها هزینه‌های سرمایه‌گذاری و توسعه ظرفیت در مدل نادیده گرفته می‌شود که در الگوی برنامه‌ریزی آنالیزی لوند¹⁶ (2014) برای شبهه‌سازی سیستم تولید، این نوع هزینه‌ها نیز در محاسبه قیمت متوسط سیستم تولید مدنظر قرار می‌گیرد. با توجه به اجزای هزینه‌ای سیستم تولید، مجموع هزینه سوخت، بهره‌برداری، تعمیر، نگهداری و هزینه سرمایه‌گذاری و توسعه ظرفیت برای تولیدکننده زام در ساعت t به صورت رابطه (1) خواهد بود:

$$G_{j,FMI}[g_j(t)] = G_{j,F}[g_j(t)] + G_{j,M}[g_j(t)] + G_{j,I}[g_j(t)] \quad (1)$$

مجموع «کل هزینه سوخت»، «کل هزینه بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری» و «کل هزینه سرمایه‌گذاری و توسعه ظرفیت» در ساعت t برای تولید $g_j(t)$ ، به صورت رابطه (2) خواهد بود که نشان‌دهنده هزینه کل (TC) تولید است:

$$G_{FMI}[g(t)] = \sum_j G_{j,F}[g_j(t)] + \sum_j G_{j,M}[g_j(t)] + \sum_j G_{j,I}[g_j(t)] \quad (2)$$

$$G_{FMI}[g_j(t)] = \sum_j G_F[g(t)] + G_M[g(t)] + G_I[g(t)]$$

بنابراین قیمت لحظه‌ای-ساعتی برای مصرف‌کننده k ام در چنین سیستم تولیدی برابر خواهد

بود با:

$$P_k(t) = \frac{\partial(TC)}{\partial d_k(t)} \quad (3)$$

با توجه به اینکه در برنامه‌ریزی آنالیزی این پژوهش، تقاضا به صورت تجمعی و با توزیع لحظه‌ای-ساعتی تمامی مشترکین شبکه در هر ساعت در مدل وارد می‌شود، هزینه کل سیستم تولید به صورت رابطه (4) خواهد بود:

$$P(t) = \frac{\partial(TC)}{\partial d(t)} \quad (4)$$

اکنون با در نظر گرفتن بازه‌های زمانی یکسان و یک ساعت، می‌توان رابطه (4) را به صورت رابطه (5) بازنویسی کرد:

$$P(t) = \frac{\partial G_{FMI}[g(t)]}{\partial d(t)} \quad (5)$$

محدودیتی که مدل را تحت تأثیر قرار می‌دهد، تعادل عرضه و تقاضاست که بر اساس آن کل انرژی عرضه‌شده در ساعت t باید با کل مقدار تقاضا در ساعت t برابر باشد. در صورتی که میزان تقاضا به‌طور ناگهانی از میزان پیش‌بینی شده کمتر شود، زمینه لازم برای ذخیره‌سازی مازاد عرضه انرژی الکتریکی موجود در سیستم تولید فراهم خواهد شد¹⁷.

قیمت لحظه‌ای-ساعتی سیستم تولید در ساعت t با مجموع جزء سوخت قیمت $(\gamma_F(t))$ ، جزء بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری $(\gamma_M(t))$ و جزء سرمایه‌گذاری و توسعه ظرفیت $(\gamma_I(t))$ قابل محاسبه خواهد بود:

$$P(t) = \gamma_F(t) + \gamma_M(t) + \gamma_I(t) \quad (6)$$

با توجه به تعریف اجزای قیمت لحظه‌ای-ساعتی سیستم تولید، می‌توان رابطه (6) را به صورت رابطه (7) بازنویسی کرد:

$$P(t) = \frac{\partial G_F[g(t)]}{\partial g(t)} + \frac{\partial G_M[g(t)]}{\partial g(t)} + \frac{\partial G_I[g(t)]}{\partial g(t)} \quad (7)$$

مجموع این سه عبارت در اصطلاح، لامبدای سیستم¹⁸ نامیده می‌شود (Ibid؛ 365):

17- توضیحات ماژول ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی در پوست (1) گزارش شده است.

$$\lambda(t) = \frac{\partial G_{FKI}[g(t)]}{\partial g(t)} = \gamma_F(t) + \gamma_M(t) + \gamma_I(t) \quad (8)$$

اتکای اصلی برنامه‌ریزی آنالیزی این پژوهش بر رویکرد داده-ستاده در مدل‌سازی پایین-بالای سیستم تولید هیبرید قرار دارد که ماژول‌های شبیه‌سازی سیستم‌های هیبرید انرژی بر اساس مدل‌های پیشرفته EnergyPLAN 11.4¹⁹ و energyPRO 6.3، در کنار مدل WASP-IV²⁰ طراحی شده‌اند.²¹ به علاوه از آنجایی که امکان ایجاد یک تبادل منبع‌باز در مدل‌های رایج وجود دارد، ارتباط و تبادل نرم‌افزاری و خروجی‌های مدل‌های فوق با استفاده از بستر نرم‌افزاری اوسیموسیس²² (OSEMOSYS) انجام شده است. داده‌های توان، تولید، تقاضا و هزینه نیروگاه-های فسیلی و تجدیدپذیر محدوده شرکت برق منطقه‌ای خراسان بر اساس اطلاعات و آمار سال پایه 1391 در سیستم شبیه‌سازی وارد شده‌اند. داده‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی سیستم در سناریوی اولیه سال پایه، در پیوست پژوهش (جدول 1 تا جدول 4) گزارش شده‌اند. محاسبه قیمت تمام‌شده 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 هستند²³.

همان‌گونه که در مبانی نظری پژوهش اشاره شد، بر اساس سناریوی تولید هیبرید سند چشم -

19- این نسخه جدید از مدل EnergyPLAN در تاریخ 24 می سال 2014 منتشر و در دسترس کاربران قرار گرفته است.

20- Wien Automatic System Planning Package

21- مدل‌های پیشرفته EnergyPLAN و energyPRO با همکاری گروه تحقیقاتی برنامه‌ریزی انرژی پایدار دانشگاه آلبورگ و گروه

PlanEnergi دانشگاه بیرمنگام و مدل WASP نیز توسط آژانس بین‌المللی انرژی اتمی طراحی شده‌اند.

22- OSEMOSYS: the Open Source Energy Modeling System

23- بدین وسیله نویسندگان پژوهش کمال تشکر و قدردانی خود را از همکاری و مساعدت تمامی کارشناسان و مدیران صنعت برق و

شرکت برق منطقه‌ای خراسان به عمل می‌آورند.

انداز 1410 انرژی‌های تجدیدپذیر شرکت برق منطقه‌ای خراسان، ظرفیت توربین‌های بادی در افق چشم‌انداز به 822 مگاوات، ظرفیت مولدهای خورشیدی به 257 مگاوات و ظرفیت نیروگاه‌های زیست‌توده به 22 مگاوات خواهد رسید که شبیه‌سازی سیستم قدرت منطقه‌ای نیز همین اساس انجام شده است. نرخ تنزیل سالانه سرمایه نیز بر اساس مطالعه طاهری فرد و شهاب (2010) و مطالعه رستمی و همکاران (2013) در مورد پروژه‌های نیروگاهی وزارت نیرو و همچنین بر اساس مطالعات امکان‌سنجی دفتر بودجه معاونت برنامه‌ریزی و تحقیقات شرکت برق منطقه‌ای خراسان، به‌طور میانگین، 10 درصد در نظر گرفته شده است. همچنین در مورد هزینه تولید برق تجدیدپذیر بادی و خورشیدی نیز از اطلاعات دفتر بودجه معاونت برنامه‌ریزی و تحقیقات شرکت برق منطقه‌ای خراسان و برای هزینه تولید برق زیست‌توده از دفتر مدیریت آمار و تحلیل اطلاعات معاونت برنامه‌ریزی و آمار شهرداری مشهد استفاده شده است که بر اساس جداول آماری این دفاتر، هزینه سرمایه‌گذاری برق خورشیدی، بادی و زیست‌توده در هر کیلووات توان به ترتیب 104/5، 39/75 و 15/09 میلیون ریال و هزینه ثابت و متغیر عملیات و نگهداشت برق خورشیدی، بادی و زیست‌توده در هر مگاوات ساعت به ترتیب 636 ریال، 156897 ریال و 51003 ریال محاسبه شده است. لازم به ذکر است که این آمار بر اساس تجهیزات قابل دسترسی برای شرکت برق منطقه‌ای خراسان و شهرداری مشهد و متناسب با شرایط اقلیمی-تجاری برق منطقه‌ای خراسان محاسبه شده است و آمار بین‌المللی یا ملی (در سایر مناطق کشور) می‌تواند تفاوت‌هایی با این آمار داشته باشد. بر اساس گزارش آژانس انرژی دانمارک²⁴ (2011)، مالیات انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی نیز 493027/2 ریال در هر تن محاسبه شده است. نرخ تسعیر دلار و یورو بر اساس آمار بازار مبادلات رسمی منتشر شده در خلاصه تحولات اقتصادی کشور (2012)، به ترتیب 24752 و 32436 ریال است.

نتایج مدل

بر اساس شبیه‌سازی سیستم تولید مبتنی بر برنامه‌ریزی آنالیزی، نتایج شبیه‌سازی سیستم تولید

24- Danish Energy Agency (2011)

پایه و سیستم تولید هیبرید فسیلی-تجدیدپذیر در جدول 5 گزارش شده است. همچنین نتایج لحظه-ای-ساعتی تقاضای شبکه و تولید برق تجدیدپذیر نیز به پیوست، نمودار 1 تا نمودار 4 گزارش شده‌اند.

نتایج ارائه شده در جدول 1 نشان می‌دهد که با ورود اهداف توان تجدیدپذیر چشم‌انداز 1410، قیمت متوسط برق تولیدی حدود 32 درصد افزایش خواهد داشت و به 777406 ریال در هر مگاوات ساعت خواهد رسید. این در حالی است که با ورود این توان تجدیدپذیر، میزان انتشار آلاینده زیست‌محیطی، تغییر چندانی نخواهد داشت. در عین حال میزان تولید برق تجدیدپذیر در سیستم تولید از رقم 0/4 تراوات ساعت به 2/36 تراوات ساعت خواهد رسید که افزایش قابل-توجهی است. همچنین حجم بهینه صادراتی نیز 18/62 تراوات ساعت افزایش خواهد یافت که افزایش 14 درصدی را نسبت به مدل پایه نشان می‌دهد.

جدول 1- نتایج شبیه‌سازی شرایط اولیه سیستم تولید و سیستم تولید هیبرید فسیلی-تجدیدپذیر

| سیستم تولید شاخص | شرایط اولیه سیستم تولید ¹ | تولید هیبرید فسیلی-خورشیدی ² | تولید هیبرید فسیلی-بادی ³ | تولید هیبرید فسیلی-زیست-توده ⁴ | تولید هیبرید فسیلی-خورشیدی-بادی-زیست‌توده ⁵ |
|---------------------------------------|--------------------------------------|---|--------------------------------------|---|--|
| متوسط قیمت (ریال بر مگاوات ساعت) | ۵۸۴۰۸۵/۲۷ | ۶۹۹۰۳۷۷/۵۶ | ۷۰۳۰۸۶۴/۱۱ | ۶۱۹۰۰۵۲/۹۹ | ۷۷۷۰۴۰۶/۵۱ |
| انتشار آلاینده زیست‌محیطی (میلیون تن) | 23/13 | 23/13 | 23/13 | 23/13 | 23/13 |

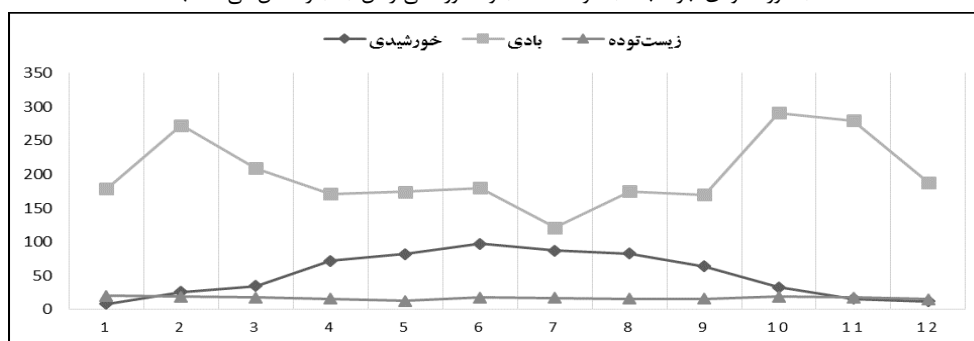
- 1- در مدل پایه صرفاً ظرفیت فسیلی و ظرفیت عملی 8 مگاواتی نیروگاه بادی بینالود وارد شده است.
- 2- در این سناریو، توان خورشیدی هدف گذاری شده در افق 1410 (با تکنولوژی فتوولتائیک) به مدل پایه اضافه شده است.
- 3- در این سناریو، توان بادی هدف گذاری شده در افق 1410 به مدل پایه اضافه شده است.
- 4- در این سناریو، توان زیست‌توده هدف گذاری شده در افق 1410 به مدل پایه اضافه شده است.
- 5- در این سناریو، توان بادی-خورشیدی و زیست‌توده هدف گذاری شده در افق 1410 به مدل پایه اضافه شده است.

| | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|---|
| 2/36 | 0/15 | 1/76 | 0/45 | 0/04 | تولید بهینه برق تجدیدپذیر ¹ (میلیون مگاوات ساعت) |
| 36/92 | 36/92 | 36/92 | 36/92 | 36/92 | تولید بهینه برق فسیلی (میلیون مگاوات ساعت) |
| 18/62 | 16/41 | 18/02 | 16/71 | 16/3 | حجم بهینه صادراتی ² (میلیون مگاوات ساعت) |
| 104 | 105 | 101 | 103 | 106 | شاخص پایداری شبکه ³ (درصد) |

منبع: محاسبات تحقیق.

نمودار 1: تولید ماهانه سناریوی هیبرید فسیلی-خورشیدی-بادی-زیست‌توده

(محور عمودی، بار شبکه (مگاوات ساعت) و محور افقی زمان (ماه) را نشان می‌دهد)⁴



- 1- تمام تولید برق تجدیدپذیر، به دلیل لزوم برقراری قیود قابلیت اطمینان تولید و پایداری شبکه، وارد شبکه مصرف برق منطقه-ای نمی‌شوند و در حقیقت این تولید با اهداف مشترک صادراتی و ورود به شبکه منطقه‌ای و بین منطقه‌ای 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.
- 2- این حجم بهینه با توجه به برآورده شدن قیود انتقال بین منطقه‌ای و بین‌المللی تعیین شده است.
- 3- در محاسبه این شاخص از روش لوند (2014) صفحات 86-88 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.

4- از آنجایی که شیبه‌سازی بر اساس تقویم میلادی انجام شده است، ماه آغازین ژانویه، (دی) و ماه پایانی دسامبر (آذر) است.

منبع: محاسبات تحقیق.

نکته حائز توجه این است که با وجود افزایش 557 درصدی تولید برق تجدیدپذیر در سیستم تولید، شاخص پایداری شبکه تغییر چندانی نخواهد داشت و همچنان شبکه پایدار و قابلیت اطمینان هدف، توسط سیستم تولید تضمین می‌شود¹. نتایج مربوط به تولید ماهانه و صادرات خالص لحظه-ای-ساعتی سناریوی هیبرید فسیلی-خورشیدی-بادی-زیست‌توده نیز در نمودار 1 و نمودار 2 نمایش داده شده است.

نتایج تولید ماهانه به خوبی ماهیت مکمل بودن انرژی بادی و خورشیدی را نشان می‌دهد، به نحوی که با کاهش تولید انرژی خورشیدی در ماه‌های سوم تا نهم، تولید انرژی بادی افزایش می‌یابد و با در مقابل کاهش تولید بادی در ماه‌های اول تا سوم و نهم تا دوازدهم با افزایش تولید خورشیدی در این ماه‌ها جبران می‌شود.

نتیجه‌گیری و دلالت‌های پژوهش

عدم تغییر در حجم انتشار گازهای آلاینده محیط‌زیست پس از ورود برق تجدیدپذیر بادی-خورشیدی-زیست‌توده بدین معناست که ظرفیت‌های ایجاد شده توان تجدیدپذیر، نمی‌تواند به اندازه‌ای تقاضای شبکه منطقه‌ای و فرامنطقه‌ای را پوشش دهد که نیاز به تولید برق فسیلی را کاهش دهد و در حقیقت تولید توان تجدیدپذیری به اندازه‌ای نیست که بتواند جانشین برق فسیلی شود و در عین حال پس از این جانشینی، پایداری شبکه و قابلیت اطمینان سیستم تولید نیز تضمین شود.

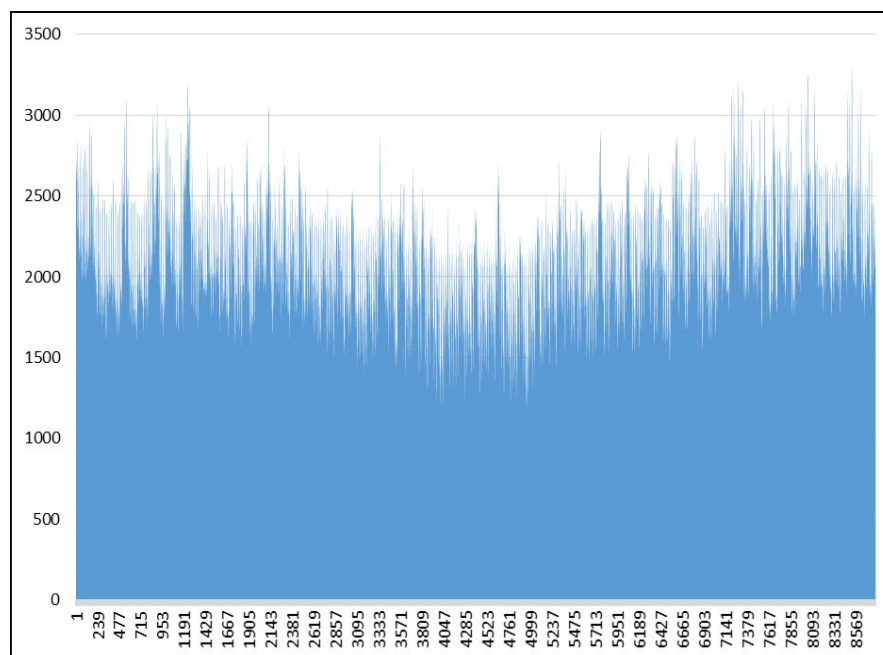
1- در سیستم‌های هیبرید، قابلیت اطمینان به معنای ایجاد و حفظ تراز میان عرضه و تقاضای برق شبکه به هنگام مواجهه با اختلالات ناگهانی ناشی از تغییرات عرضه و تقاضا است. برای تامین چنین قابلیت در سیستم لازم است که سیستم به نحوی طراحی شود که بتواند فوراً به اختلالات احتمالی واکنش نشان دهد و پس از برطرف شدن این اختلالات، مجدداً به فرآیند نرمال بازگردد (AITF, 2011: 28). 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 به عنوان یک واحد توان برای کاهش میزان نوسانات و اختلالات شبکه در محدوده یک استاندارد مورد استفاده قرار داد.

بنابراین ایجاد این میزان توان تجدیدپذیر، اثر زیست‌محیطی چندانی بر منطقه نخواهد داشت و نمی‌توان شواهد برنامه‌ریزی برق منطقه‌ای را موجد ایجاد قابلیت جانشین‌پذیری برق تجدیدپذیر و فسیلی - حتی در صورت ایجاد ظرفیت‌های تولید برق تجدیدپذیر افق چشم‌انداز 1410 - دانست. از این رو به نظر می‌رسد که برای ایجاد تأثیرات زیست‌محیطی قابل توجه، لازم است به پیشنهاد دوم کاناسه‌پتیل و همکاران (2011) مبنی بر ایجاد ظرفیت‌های بزرگ تجدیدپذیر عمل شود و از پتانسیل‌های 61/34 مگاواتی برق زیست‌توده، 7000 مگاواتی برق بادی و 40000 مگاواتی برق خورشیدی، سهم بیشتری در برنامه‌ریزی تولید برق تجدیدپذیر در نظر گرفته شود، تا بتوان اثرات زیست‌محیطی را در کنار اثرات صرفه‌های حاصل از مقیاس‌های بزرگ¹ تجدیدپذیر را در تولید برق تجدیدپذیر منطقه خراسان مشاهده نمود. همچنین افزایش 32 درصدی متوسط قیمت در شبکه برق منطقه‌ای خراسان، ریشه در هزینه سرمایه‌گذاری بالای برق خورشیدی و بادی است که در هر کیلووات توان به ترتیب 104/5 و 39/75 میلیون ریال هزینه به دنبال دارند. به‌منظور کاهش این قیمت تمام‌شده، حمایت از پروژه‌های طراحی، ساخت و مهندسی سلول‌های خورشید و مولدهای بادی می‌تواند بسیار راه‌گشا باشد که شرکت برق منطقه‌ای خراسان با تعامل بیشتر با پژوهشکده هوا-خورشید (در جهت مشاوره فنی-مهندسی و ایجاد پروژه‌های مشترک) می‌تواند به این مهم نائل شود.

نمودار 2: صادرات خالص لحظه‌ای-ساعتی سناریوی تولید هیبرید فسیلی-خورشیدی-بادی-زیست‌توده (محور عمودی، بار شبکه (مگاوات ساعت) و محور افقی لحظه-ساعت را نشان می‌دهد)²

1- Economies of scale

2- از آنجایی که شبیه‌سازی بر اساس تقویم میلادی انجام شده است، در نمودارهای لحظه‌ای-ساعتی، روز آغازین یک ژانویه، (11 دی) و روز پایانی 30 دسامبر (10 دی) است.



منبع: محاسبات تحقیق.

از سوی دیگر توسعه مشوق‌های مالی موردنیاز و توسعه استانداردهای لازم برای اتصال منابع تجدیدپذیر به شبکه در کنار وضع قوانین در رابطه با به اشتراک گذاری هزینه‌های فنی با شبکه مشترکان نیز می‌تواند زیرساخت‌های فنی و قانونی لازم را در اختیار سیستم تولید هیبرید قرار دهد. اکثر کشورهای پیشتاز دنیا در عرصه انرژی‌های تجدیدپذیر، برای ایجاد زمینه قیمتی مناسب برای تولید برق تجدیدپذیر از سیستم Feed-in Tariff استفاده کرده‌اند که به معنی تعیین قیمت ثابت خرید اجباری برق تولید شده از انرژی خورشید، باد و سایر انرژی‌های تجدیدپذیر توسط دولت است. این قیمت تضمینی با مکانیزم‌ها و شرایط مختلف در کشورهای دنیا اجرا می‌شود. در حالی که در ایران این مکانیزم حمایت قیمتی، بدون هر گونه انعطاف و شرایط خاص، برای تمامی انواع انرژی‌های تجدیدپذیر در سال 2014 با نرخ 400 تومان در هر کیلووات ساعت انجام شده است. تنوع قیمتی در الگوی Feed-in Tariff می‌تواند راهکار مناسبی برای اصلاح الگوی هزینه تولید انواع انرژی‌های تجدیدپذیر باشد.

در کنار این افزایش قیمت تمام شده، افزایش بیش از 500 درصدی تولید برق تجدیدپذیر و

خارج شدن سهم آن از یک حالت نمادین از رقم 0/4 تراوات ساعتی به یک الگوی واقعی 2/36 تراوات ساعتی نیز بسیار حائز اهمیت است. به علاوه افزایش 2/32 تراوات ساعتی صادرات بین-منطقه‌ای و بین‌المللی برق می‌تواند درآمد قابل توجهی را برای شرکت برق منطقه‌ای خراسان فراهم آورد که در صورت تأمین مالی پروژه‌های تجدیدپذیر با استفاده از این درآمد صادراتی، هزینه تمام‌شده تولید تجدیدپذیر نیز کاهش خواهد داشت. در حقیقت می‌توان از درآمد حاصل از این حجم بهینه صادراتی نیز برای کمک به توسعه برق تجدیدپذیر استفاده نمود. با این حال می‌توان سهم بخش تولید فسیلی در درآمد صادرات برق را با عدم‌النفذ صدور گاز طبیعی مصرفی در نیروگاه‌های فسیلی (با قیمت FOB خلیج فارس) مقایسه نمود. چنین مقایسه‌ای در صورت مشخص بودن میزان حاشیه سود فراتر از هزینه تولید نهایی مشخص خواهد شد. بنابراین لازم است که «چشم‌انداز صادراتی منطقه خراسان» با تأکید بر قیمت هدف صادراتی و حاشیه سود هدف نیز مشخص گردد تا بتوان در مورد مقایسه میان درآمد فروش گاز و درآمد صادرات برق، بدرستی اظهار نظر کرد.

References

- [1] Abdi, Hamdi, Hosseinzadeh Khonakdari, T., Zakeri, oven, Razmara, ancient Abbasi, Seyed Hassan Hashemi cotton skew, SE. (2011). Feasibility of 10-megawatt wind farm MoravehTappeh, *Journal of Energy*, Vol. XIV, No. 37. (in persian)
- [2] Alberta Innovates – Technology Futures (AITF). (2011). Energy Storage: Making Intermittent Power Dispatchable, *Final Report, Oct 27th, 2011*.
- [3] Annual Review 2012. (2012). *Central Bank of the Islamic Republic of Iran*, Tehran. (in persian)
- [4] Eslamloyian, K. and Astadzad, A. H. (2012). determine the optimal share of renewable energies in a model of sustainable development: the case of Iran, *Journal of Environmental Economics and Energy*, Vol. II, No. 5. (in persian)
- [5] Bilgen, S., Keles, S., Kaygusuz, A., Sari, A. and Kaygusuz, K. (2008). Global warming and renewable energy sources for sustainable development: a case study in Turkey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 12, Issue 2, February 2008, PP 372–396.
- [6] Bohn, R. E., Caramanis, M. C., & Schweppe, F. C. (1984). Optimal pricing in electrical networks over space and time. *The Rand Journal of Economics*, 360-376.
- [7] 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.
- [8] Connolly, D., Lund, H., Mathiesen, B.V., Pican, E., Leahy, M. (2012). the technical and economic implications of integrating fluctuating renewable energy using energy storage, *Renewable Energy*, 43 (2012) 47-60.
- [9] Detailed statistics for the power production industry 2012 (For managers). (2013). Department of Energy, the holding company tavanir, Vice President of Human Resources and Research, Office of Information and Statistics, *Department of Statistics and information science*. (in persian)
- [10] Emami Meybodi, A. and Haideri, K. (2012). The conversion of a simple gas turbine plants (SCGT) on the combined cycle (CCGT) and its impact on the consumption of fossil fuels, *Journal of Economic Research (Research, Development and Sustainable Development)*, Vol. XII, No. 3. (in persian)
- [11] Hamed, Mohammad sadegh, Habibi, Manuchehr. (2005). on the power industry in Iran, company research, *education and electricity productivity of Tehran (tab niroo)*, Tehran. (in persian)
- [12] 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.
- [13] Lund, H. (2014). Advanced Energy Systems Analysis Computer Model, Documentation Version 11.4, *Aalborg University*, Denmark.
- [14] 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.
- [15] Ketabdari, MJ and Ahmedi, M. E. (2011). Feasibility study of energy absorption by numerical modeling of ocean waves on the southern coast of Iran, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. XVIII, No. 60. (in persian)
- [16] Khorasan Regional Electricity Company. (2012). report on the development of renewable energy power company, *Khorasan, Mashhad*, release date: November 19, 2012. (in persian)
- [17] Kowalski, K.; Stagl, S.; Madlener, R. and Omann, I. (2009). Sustainable energy futures: Methodological challenges in combining scenarios and participatory multi-criteria analysis, *European Journal of Operational Research journal*, Volume 197, Issue 3, 16 September 2009, PP 1063–1074 .
- [18] 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
- [19] Mahmoudi, M., behboodi, MH, Sadigh Zibari, S. Haditha. (2008). the role of nanotechnology in the construction industry to reduce environmental pollution, *Journal of Environmental Science and Technology*, Vol. I, No. 3 (s 38). (in persian)

- [20] Martín, J. I. S., Zamora, I., Martín, J. J. S., Aperribay, V., Eguia, P. (2010). Hybrid fuel cells technologies for electrical microgrids, *Electric Power Systems Research*, 80 (2010), 993–1005.
- [21] Namvar Bahraghani, B., Mr Shafiei, Mohammad; Moradi Dalvand, M., Ahmadian, M. (2012). determine the optimal size of the market in an interactive Ryzshbk-h to supply electricity and heat charge Ryzshbk-h to reduce dependence on fossil fuels, *Journal of Engineering and energy management*, Vol. II, No. 3 (row 5). (in persian)
- [22] Mandil, C. "Oil crises and climate challenges-30 years of energy use in iea countries," *International Energy Agency*, 2004.
- [23] Mostofi, F., Shayeghi, H. and Kazemi Kargar, H. (2012). Potential assessment and design of renewable energy hybrid system to provide electricity for water pumping station site MeshkinShahr, *Journal of Energy*, Vol. XV, No. 43. (in persian)
- [24] Moeni, Sam; Javadi, S., Kokabi, M. And Dehghan Manshadi, M. (2010). Estimation of solar radiation using an optimization model, *Journal of Energy*, Vol. XIII, No. 34. (in persian)
- [25] Munasinghe, Mohan. (2009). Sustainable Development: Basic Concepts And Application To Energy, *Munasinghe Institute For Development* (Colombo, Sri Lanka)
- [26] Paytakhti Oskuei, Ali and Nahidi, Mohammad. (2007). Environmental taxes (green taxes): theoretical, experience, Sixth Conference of Agricultural Economics, Mashhad, *Agricultural Economics Association of Iran*, Ferdowsi University of Mashhad, pp. 1-17. (in persian)
- [27] Østergaard, P. A. (2010). Regulation strategies of cogeneration of heat and power (CHP) plants and electricity transit in Denmark, *Energy* 35, (2010) 2194-2202.
- [28] Paytakhti Oskuei, Ali and Nahidi, Mohammad. (2007). Environmental taxes (green taxes): theoretical, experience, Sixth Conference of Agricultural Economics, Mashhad, *Agricultural Economics Association of Iran*, Ferdowsi University of Mashhad, pp. 1-17. (in persian)
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Rahimi, Abdorahim, Saghafi, Majid, and Sarvghady, Zahra. (2008). investigated the use of renewable energy technology in the construction of a unit for Culture and Education, *Mechanical Engineering Magazine*, Issue 61, pp. 38-52. (in persian)
- [32] Rahimi, N. (2005). Indicators for sustainable energy development in Iran, the

- Fourth National Energy Congress, Tehran, *Islamic Republic of Iran's National Committee for Energy*, Power and Energy Deputy Minister of Energy, pp. 1-24. (in persian)
- [33] Renewable Energy Organization of Iran (SUNA). (2007). Report of potential biomass sources in Iran, *Ministry of Energy, and Department of Energy*. (in persian)
- [34] Rostami, Soraya, Haghparast Kashani, A., Larry, HR. (2013). study estimated the cost of electricity from wind power plants, solar and biogas, *National Energy Association Conference*, Tehran, Iran Energy Research. (in persian)
- [35] Shaditalab, Jaleh and Nayehdor, Mahdi. (2009). Analysis of factors affecting the adoption of domestic solar water heaters in rural areas - a case study Bardaskan city, *autumn and winter*, No. 36, pp. 67-88. (in persian)
- [36] Sharifi, Alimorad; Kiani, G. and khoshakhlagh, rahman and Tudeshki Bagheri, Mohammad Mehdi. (2013). Evaluation of alternative renewable energy instead of fossil fuels in Iran: an optimal control approach, *Journal of Economic Modeling Research*, Vol. III, No. 11. (in persian)
- [37] 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.
- [38] Taheri fard, Ali and Shahab, Samia. (2010). investigated the technical and economic aspects of geothermal electricity generation, *Energy Economics*, No. 125. (in persian)
- [39] 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.
- [40] Turner, R. K., Pearce, D., & Bateman, I. (1994). Environmental economics: an elementary introduction. *Harvester Wheatsheaf*.
- [41] Vera, I. and Langlois, L. (2007). Energy indicators for sustainable development, *Energy*, Volume 32, Issue 6, June 2007, Pages 875–882.
- [42] World Commission on Environment and Development. (1987). From One Earth to One World: An Overview. Oxford: *Oxford University Press*.
- [43] 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.
- [44] Zhai, P., Larsen, P., Millstein, D., Menon, S., Masanet, E. (2012). the potential for avoided emissions from photovoltaic electricity in the United, *Energy*, 47 (2012), 443-450.
- [45] 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.
- [46] 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.

- [47] 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.

پیوست

پیوست (1) ماژول ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی در شرایط مازاد عرضه

برای ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی لازم است که استراتژی اقتصادی-تجاری¹ به‌منظور بهینه-سازی سود خالص خرید و فروش برق مدنظر قرار گیرد. بدین منظور بر مبنای نوسانات قیمتی بازار و هزینه‌های عملیاتی ذخیره‌سازی که شامل هزینه سوخت نیز می‌شود، ظرفیت بهینه ذخیره‌سازی تعیین می‌شود.² در حقیقت فرض اساسی و بدیهی در استراتژی اقتصادی-تجاری ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی این است که ذخیره‌سازی تنها در صورتی توجیه اقتصادی خواهد داشت و سودآور خواهد بود که قیمت پیشنهادی فروش به بازار، فراتر از قیمت خرید از بازار باشد.³ تفاوت میان قیمت پیشنهادی فروش به بازار و قیمت خرید از بازار را می‌توان بر مبنای فاکتور افزایش⁴ (AF) و فاکتور تکاثر⁵ (MF) محاسبه نمود. روابط روابط (1 و 2) نشان‌دهنده ویژگی‌های تکنولوژیکی-اقتصادی مرتبط با این دو فاکتور افزایش و تکاثر هستند (Lund, 2014: 147):

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

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

در روابط (1 و 2)، $VOC_{turbine}$ 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

1- business-economic strategy

2- 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.

3- این اختلاف قیمتی را می‌توان بر اساس حاشیه سود مودانتظار ناخالص برای ذخیره‌سازی برق در نظر گرفت.

4- Addition factor

5- Multiplication factor

به ازای هر واحد ورودی هر واحد انرژی ذخیره‌شده را نشان می‌دهد، φ_{CAES} نسبت سوخت ورودی به میزان انرژی الکتریکی خروجی از واحد ذخیره‌ساز هوای فشرده است. همچنین P_{Ngas} قیمت سوخت گاز طبیعی، $P_{Handling-Ngas}$ هزینه حمل و نقل گاز طبیعی و $TAX_{Ngas-CAES}$ 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 (3) میان قیمت پیشنهادی فروش به بازار (P_{sell}) و قیمت خرید از بازار (P_{buy}) برقرار باشد (Ibid, 148):

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

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 (4 و 5) مشخص شده است (Ibid):

$$P_{sell} = P_{Ave} + P_{diff} \quad (4)$$

$$P_{buy} = P_{Ave} - P_{diff} \quad (5)$$

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 (6) بیان نمود (Ibid):

$$P_{diff} = [P_{average} * (1 - \alpha_{compressor} * \mu_{turbine}) + cons] / (\alpha_{compressor} * \mu_{turbine} + 1) \quad (6)$$

در رابطه (6)، 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 (7) نشان داد (Ibid):

$$cons = VOC_{compressor} + TAX_{compressor} + (VOC_{turbine} * \alpha_{compressor} * \mu_{turbine}) + [\varphi_{CAES} * (P_{Ngas} + P_{Handling-Ngas} + TAX_{Ngas-CAES}) * 3.6 * (\alpha_{compressor} * \mu_{turbine})] \quad (7)$$

اکنون بر اساس روابط (4 و 5) و معادل تکنولوژیکی-اقتصادی P_{diff} در رابطه (7)، می‌توان

رابطه میانگین قیمت در دوره آتی (P_{Avg}) و حداقل قیمت خرید ($P_{buy-min}$) و حداکثر قیمت فروش ($P_{sell-min}$) را با روابط (8) و (9) مشخص نمود:

$$P_{sell-min} = P_{Avg} + P_{diff} \quad (8)$$

$$P_{buy-max} = P_{Avg} - P_{diff} \quad (9)$$

چنانچه قیمت بازار ($P_{mkt-sys}$) بالاتر از حداقل قیمت فروش ($P_{sell-min}$) باشد و تولید متوازن توربین ($BP_{turbine}$) نیز نشان دهنده میزان بهره برداری بهینه از توربین بر اساس هزینه نهایی تولید باشد، آن گاه می توان توربین را در سیستم ذخیره ساز هوای فشرده بکار گرفت و میزان تولید بهینه برق ($ELC_{turbine}$) به شرط برآورده شدن شرط راه اندازی را می توان با رابطه (10) نمایش داد (Ibid):

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

در حقیقت بر اساس رابطه (10) چنانچه تولید بهینه توربین ($BP_{turbine}$) با برآورده شدن قیود قیمتی بازار و هزینه نهایی تولید، بیش از حداکثر ظرفیت تولید توربین ($C_{turbine}$) باشد، میزان تولید انرژی در سیستم ذخیره ساز هوای فشرده ($ELC_{turbine}$) به میزان حداکثر ظرفیت تولید توربین محدود خواهد بود.

همچنین چنانچه قیمت بازار پایین تر از حداکثر قیمت خرید ($P_{buy-max}$) باشد و مصرف متوازن کمپرسور ($RP_{compressor}$) نیز نشان دهنده میزان مصرف بهینه کمپرسور بر اساس هزینه نهایی راه اندازی کمپرسور در شبکه باشد، آن گاه شرط راه اندازی کمپرسور در سیستم ذخیره ساز هوای فشرده تأمین خواهد شد و میزان مصرف برق کمپرسور ($CON_{compressor}$) به شرط برآورده شدن شرط راه اندازی را می توان با رابطه (11) نمایش داد (Ibid, 149):

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

در حقیقت بر اساس رابطه (11)، چنانچه مصرف بهینه کمپرسور ($RP_{compressor}$) با برآورده شدن قیود قیمتی بازار و هزینه نهایی تولید، بیش از حداکثر ظرفیت مصرف کمپرسور ($C_{compressor}$) باشد، میزان مصرف انرژی در سیستم ذخیره ساز هوای فشرده ($CON_{compressor}$) به میزان حداکثر ظرفیت مصرف کمپرسور محدود خواهد شد.

جدول 2: ویژگی‌های فنی-اقتصادی نیروگاه‌های محدوده شرکت برق منطقه‌ای خراسان (بخش اول)

| سیکل کاوه | سیکل شیروان | شریعتی | مشهد | توس | نام نیروگاه |
|-----------|-------------|---------|---------|---------|----------------------------|
| | | | | | شرح |
| 636 | 954 | 496 | 325 | 600 | قدرت اسمی - مگاوات |
| 503 | 802 | 420 | 300 | 600 | متوسط قدرت عملی - مگاوات |
| 2495613 | 2747557 | 2184747 | 1344579 | 3992906 | تولید ناخالص - مگاوات ساعت |
| 11,7 | 12,9 | 10,3 | 6,3 | 18,8 | درصد از کل تولید - درصد |
| 24860 | 25444 | 37727 | 79138 | 290107 | مصرف داخلی - مگاوات ساعت |
| 2470753 | 2722113 | 2147020 | 1265441 | 3702799 | تولید خالص - مگاوات ساعت |
| 551 | 864 | 413 | 196 | 574 | حداکثر بار تولیدی - مگاوات |
| 51,7 | 36,3 | 60,4 | 78,3 | 79,4 | ضریب بار - درصد |
| 56,6 | 39,1 | 59,4 | 52,2 | 76 | ضریب بهره‌برداری - درصد |
| 733293 | 831796 | 446623 | 482522 | 356166 | سوخت گاز - هزار متر مکعب |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 722197 | سوخت مازوت - هزار لیتر |
| 78566 | 79497 | 66078 | 1381 | 322 | سوخت گاز وئیل - هزار لیتر |
| 32,5 | 31,9 | 44,9 | 29,5 | 36,4 | راندمان - درصد |

جدول 3: ویژگی‌های فنی-اقتصادی نیروگاه‌های محدوده شرکت برق منطقه‌ای خراسان (بخش دوم)

| جمع منطقه | بادی | فردوسی | نیشابور | قاین | نام نیروگاه |
|-----------|-------|---------|---------|-------|----------------------------|
| | | | | | شرح |
| 5106 | 28 | 954 | 1038 | 75 | قدرت اسمی - مگاوات |
| 4356 | 8 | 792 | 875 | 56 | متوسط قدرت عملی - مگاوات |
| 21295297 | 46794 | 2511800 | 5945773 | 25528 | تولید ناخالص - مگاوات ساعت |
| 100 | 0,2 | 11,8 | 27,9 | 0,1 | درصد از کل تولید - درصد |
| 593632 | 60 | 12069 | 123201 | 1026 | مصرف داخلی - مگاوات ساعت |
| 20701665 | 46734 | 2499731 | 5822572 | 24502 | تولید خالص - مگاوات ساعت |
| 4391 | 28 | 819 | 887 | 59 | حداکثر بار تولیدی - مگاوات |
| 62,7 | 18,8 | 35 | 76,5 | 4,9 | ضریب بار - درصد |
| - | 66,8 | 36,2 | 77,6 | 5,2 | ضریب بهره‌برداری - درصد |
| 4764505 | 0 | 761253 | 1145717 | 7135 | سوخت گاز - هزار متر مکعب |
| 722197 | 0 | 0 | 0 | 0 | سوخت مازوت - هزار لیتر |
| 500082 | 0 | 86574 | 184011 | 3653 | سوخت گاز وئیل - هزار لیتر |
| 37,1 | - | 31,3 | 47,1 | 24,6 | راندمان - درصد |

بنابراین گنجایش بهینه ذخیره‌سازی انرژی در زمان t به میزان ذخیره انرژی در زمان t-1

($S_{C.AES}(t-1)$) و ویژگی‌های تکنولوژیکی-اقتصادی توربین و کمپرسور بستگی دارد. بر این اساس در یک واحد ذخیره‌ساز هوای فشرده به صورت رابطه (12) خواهد بود (Ibid):

$$S_{C.AES}(t) = S_{C.AES}(t-1) + [CON_{compressor} * \alpha_{compressor}] - [ELC_{turbine} * \mu_{turbine}] \quad (12)$$

جدول 4: 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 (1)* | ۲۰۴,۱۰۴ | ۶,۸۱۸ | ۸۰,۱۹ | ۳,۶۶۵ |
| نیروگاه (2) | ۱۳۲,۹۸۳ | ۳,۰۳۶ | ۳,۱۵۶ | ۲,۲۵۵ |
| نیروگاه (3) | ۱۰۳,۲۴۵ | ۱,۸۷۷ | ۴,۷۳۷ | ۸۲۸ |
| نیروگاه (4) | ۲۷,۴۱۳ | ۰ | ۸,۶۶۵ | ۸۶۰ |
| نیروگاه (5) | ۲۴,۸۹۹ | ۰ | ۷,۸۷۱ | ۶۹۰ |
| نیروگاه (6) | ۱۸,۵۷۵ | ۰ | ۶۳۱ | ۴,۲۲۶ |
| نیروگاه (7) | ۸۶,۳۲۷ | ۴,۰۹۵ | ۱۰,۴۲۵ | ۳,۰۵۸ |
| نیروگاه (8) | ۲۵,۰۶۰ | ۰ | ۸,۴۲۲ | ۷۱۲ |
| نیروگاه (9) | ۱۴,۰۴۸ | ۰ | ۱,۱۵۶ | ۳,۲۴۶ |

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

اگر گنجایش بهینه ذخیره‌سازی از ظرفیت واحد ذخیره‌ساز هوای فشرده فراتر رود، میزان بهره‌برداری از کمپرسور در واحد ذخیره‌سازی کاهش می‌یابد و در مقابل اگر میزان ذخیره‌سازی ذخیره‌ساز هوای فشرده به زیر صفر 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 به‌طور همزمان وجود دارد. راه‌اندازی همزمان کمپرسور و توربین در صورتی به لحاظ تکنولوژیکی امکان‌پذیر و به لحاظ اقتصادی موجه خواهد بود که واحد ذخیره‌ساز هوای فشرده، همچون یک توربین گازی تلقی شود که دو شرط بالا بودن قیمت انرژی الکتریکی در بازار و پایین بودن قیمت سوخت گاز طبیعی مورد استفاده در واحد ذخیره‌ساز هوای فشرده تأمین گردد.

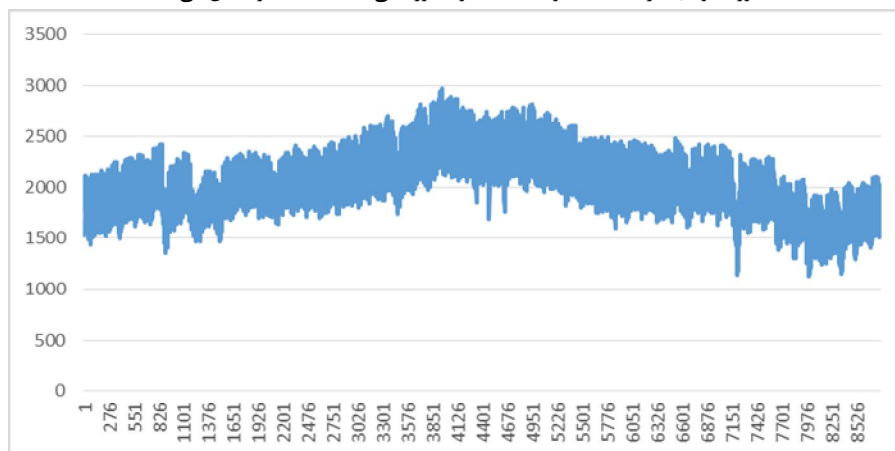
جدول 5: داده‌های هزینه تولید نیروگاه‌های محدوده شرکت برق منطقه‌ای خراسان (بخش دوم)

| نیروگاه | کنترل فرکانس (میلیون ریال) | کنترل مگاوار (میلیون ریال) | تعمیرات اساسی (میلیون ریال) | بهینه‌سازی / استهلاک (میلیون ریال) |
|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|
| نیروگاه (1)* | ۲,۶۶۳ | ۱,۸۶۴ | ۳۸,۵۰۰ | ۳۰,۰۰۰ |
| نیروگاه (2) | 778 | 544 | ۹۰,۶۹۶ | ۳۴,۹۲۸ |
| نیروگاه (3) | ۱,۵۷۰ | ۱,۰۹۹ | ۴۲,۵۰۰ | ۱۲,۲۰۰ |
| نیروگاه (4) | ۱,۵33 | ۱,۰۷۳ | ۱۵,۱۲۵ | ۱,۸۴۷ |
| نیروگاه (5) | ۱,۳۹۳ | 975 | ۲۴,۰۰۰ | ۱,۰۰۰ |
| نیروگاه (6) | 109 | 76 | ۵,۵۰۰ | ۲,۱۰۰ |
| نیروگاه (7) | ۴,۰۵۸ | ۲,۸۴۰ | ۱۰۰,۷۰۰ | ۱۶,۵۰۰ |
| نیروگاه (8) | ۱,۴۰۲ | ۱,۰۲۱ | ۲۱,۵۰۰ | ۹,۰۰۰ |
| نیروگاه (9) | 199 | 139 | ۴۱,۰۰۰ | ۵,۰۰۰ |

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

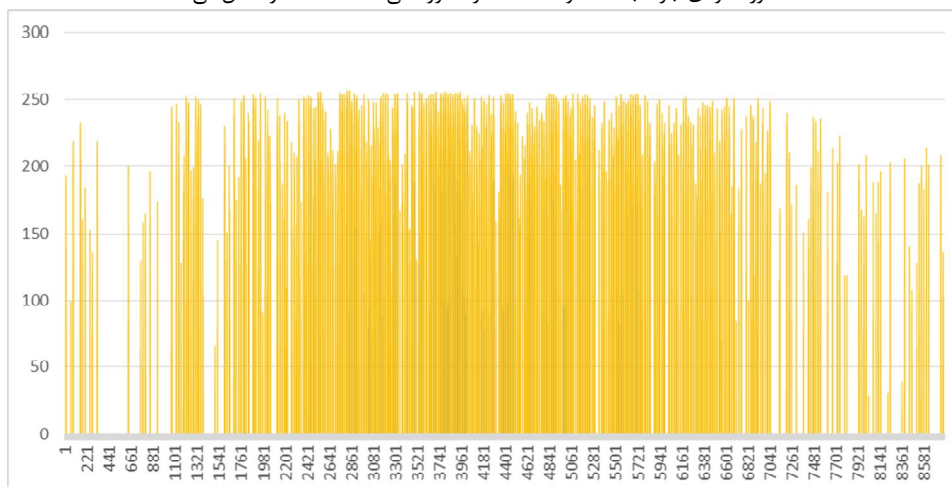
نمودار 3: توزیع لحظه‌ای-ساعتی تقاضای شبکه برق منطقه‌ای خراسان در سال 1391

(محور عمودی، بار شبکه (مگاوات ساعت) و محور افقی لحظه-ساعت را نشان می‌دهد)⁶



نمودار 4: توزیع لحظه‌ای-ساعتی تولید برق خورشیدی

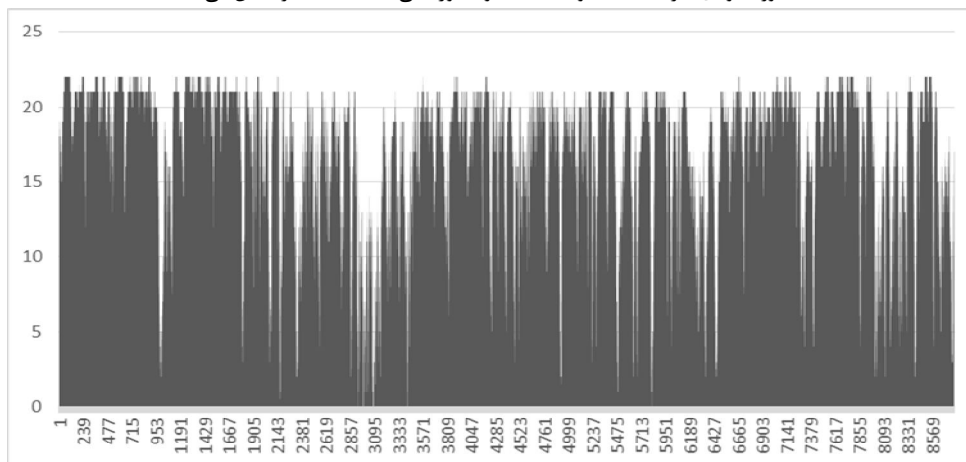
(محور عمودی، بار شبکه (مگاوات ساعت) و محور افقی لحظه-ساعت را نشان می‌دهد)



6- از آنجایی که شبیه‌سازی بر اساس تقویم میلادی انجام شده است، در نمودارهای لحظه‌ای-ساعتی، روز آغازین یک ژانویه، (11 دی) و روز پایانی 30 دسامبر (10 دی) است.

نمودار 5: توزیع لحظه‌ای-ساعتی تولید برق زیست‌توده

(محور عمودی، بار شبکه (مگاوات ساعت) و محور افقی لحظه-ساعت را نشان می‌دهد)



نمودار 6: توزیع لحظه‌ای-ساعتی تولید برق بادی

(محور عمودی، بار شبکه (مگاوات ساعت) و محور افقی لحظه-ساعت را نشان می‌دهد)

