

## بررسی آثار اجرای سیاست‌های افق چشم‌انداز ۱۴۱۰ انرژی‌های تجدیدپذیر در سیستم تولید هیبرید شرکت برق منطقه‌ای خراسان

مهدی قائمی اصل<sup>۱</sup>

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

مصطفی سلیمی‌فر<sup>۲</sup>

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

محمدحسین مهدوی عادل<sup>۳</sup>

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

مصطفی رجبی مشهدی<sup>۴</sup>

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

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۰/۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۵/۱۸

### 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 فنی-اقتصادی تولید برق هیبرید فسیلی-تجدیدپذیر، تأثیر اجرای سیاست‌های افق چشم‌انداز ۱۴۱۰ انرژی‌های تجدیدپذیر برق منطقه‌ای خراسان مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی سیستم تولید

۱ - نویسنده مسئول: Email: [m.ghaemi84@gmail.com](mailto:m.ghaemi84@gmail.com)

2- Email: [mostafa@ferdowsi.um.ac.ir](mailto:mostafa@ferdowsi.um.ac.ir)

3- Email: [madeli\\_2001@yahoo.com](mailto:madeli_2001@yahoo.com)

4- Email: [m.rajabimashhadi@ieee.org](mailto:m.rajabimashhadi@ieee.org)

نشان می‌دهد اجرای این سیاست‌ها، حجم بهینه صادراتی بین منطقه‌ای و فرامنطقه‌ای ۱۸/۶۲ تراوات ساعتی را به دنبال خواهد داشت که ۲/۳۲ تراوات ساعت از این بهینه صادراتی به دلیل اجرای سیاست‌های افق چشم‌انداز ایجاد خواهد شد. این افزایش ۱۴ درصدی بهینه صادراتی بین منطقه‌ای و فرامنطقه‌ای، ایجاد ۵۰۰۰ شغل در منطقه خراسان و افزایش قیمت تمام‌شده ۳۲ 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، راه کاری اساسی برای توسعه حقیقی تولید برق تجدیدپذیر به شمار می‌رود.

**کلیدواژه‌ها:** شبیه‌سازی سیستم برق منطقه‌ای، تولید هیبرید فسیلی-تجدیدپذیر، آینده‌پژوهی سیستم قدرت. طبقه‌بندی JEL: N7، O13، P28، Q42.

#### مقدمه

متداول‌ترین تعریف از پایداری، تعریفی است که کمیسیون جهانی محیط‌زیست و توسعه 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 حداکثر کارایی اقتصادی را ایجاب نمود (Paytakhti Oskuei and Nahidi, 2007: 7). پایداری از دیدگاه توسعه‌ای به توانمندی جامعه اکوسیستم و یا هر سیستم در حال فعالیت

کنونی اطلاق می شود که می تواند تا آینده نامعلوم ادامه فعالیت دهد، بدون اینکه بر اثر فرسایش یا تهی شدن منابع کلیدی به حکم اجبار به سمت سقوط هدایت شود، توسعه ای که کیفیت زیستی انسان را در چارچوب ظرفیت حامل سامانه های پشتیبانی کننده محیط زیست (اکوسیستم ها) بهبود می بخشد (Munasinghe, 2004: 793).

در شرایط کنونی تقاضای انرژی بسیار زیاد سوخت های فسیلی از عواقب عمده در سراسر جهان است. مشکل اصلی محیط زیستی از انتشار آلاینده های شیمیایی سمی، گازهای گلخانه ای مثل دی اکسید کربن و دیگر آلاینده های هوا است. که باعث تغییر آب و هوا و آلودگی محیط زیست شده است. مسائل جهانی زیست محیطی قابل توجهی می تواند الگوی تولید و مصرف انرژی های فسیلی در سراسر جهان تحت تأثیر قرار دهد. اگرچه برق در نقطه مصرف نهایی نسبتاً کمتر روی پیامدهای محیط زیست و بهداشتی اثر می گذارد، مسائل اجتماعی و محیطی از تولید برق رخ می دهند. در نیروگاه های برق فسیلی مشکلاتی به وجود خواهد آمد از قبیل آلودگی، اتلاف قابل توجه حرارت و غیره). باین حال آثار ذاتی و حوزه ای میزان منابع انرژی متفاوت است. واحدهای با سوخت نفت و گاز را نه تنها آثار محلی بلکه آثار محیط زیستی جهانی و منطقه ای و آثار سلامتی بهداشتی دارد. نیروگاه های با سوخت زغال سنگ و نفت مقادیر مهمی از دی اکسید سولفور و اکسید نیتروژن را در اتمسفر منتشر کرده اند (Munasinghe, 2004: 701). تغییر آب و هوا نشان دهنده ویژگی برجسته در برنامه های زیست محیطی و یا سیاست های اقتصادی کشورهای در حال توسعه جهان است. اشتراک مساعی بین سیاست های تغییر آب و هوا و برنامه های توسعه پایدار در کشورهای در حال توسعه و توسعه یافته وجود دارند مثل بازدهی انرژی، صرفه جویی در انرژی، توسعه انرژی های تجدیدپذیر، حمل و نقل و سیاست های پایداری زمین. تغییرات زیست محیطی همچنین ثبات محدوده ای از به هم پیوستگی های فیزیکی بحرانی، بوم شناختی و سیستم ها و زیر سیستم های اجتماعی را تهدید خواهد کرد (Bilgen et al., 2008).

در این میان یکی از چالش های بزرگ منابع تجدیدپذیر، ماهیت غیرقابل پیش بینی این منابع است که در برخی منابع به ویژه خورشید و باد، بسته به تغییرات آب و هوا، توان خروجی متغیری دارند (Kanase Patil et al., 2011: 2810). در سیستم خورشیدی، با ابری شدن هوا، خروجی منبع کاهش می یابد، یا در طول شب، منبع خورشیدی، هیچ برقی تولید نمی کند. 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 یک‌پارچه<sup>۱</sup> (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 کفایت<sup>۲</sup> و صافی<sup>۳</sup> قابل قبولی برخوردار است. همچنین در صورت قرار داشتن باتری در کنار این منابع، توان خروجی سیستم کاملاً صاف می‌شود، که بار سیستم را با قابلیت اطمینان خیلی بالا تأمین می‌کند (Zhou et al., 2010: 387).

به منظور اهداف افق چشم‌انداز ۱۴۱۰ انرژی‌های تجدیدپذیر در منطقه خراسان بزرگ، مطالعات جامعی در خصوص پتانسیل انرژی‌های تجدیدپذیر در این منطقه انجام شده است. بر

1- Integrated Renewable Energy System

2- Adequaty

3- Smooth

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 زیست‌توده در اختیار قرار می‌دهد. بنابراین نقشه راه چشم‌انداز ۱۴۱۰ با تمرکز بر سه انرژی باد، خورشید و زیست‌توده هدف‌گذاری شده است. از ۸ درصد تولید برق تجدیدپذیر، ۶ درصد آن را برق بادی، ۱/۵ درصد آن را مولدهای خورشیدی و ۰/۵ درصد آن را برق زیست‌توده تشکیل خواهد داد (Khorasan Regional Electricity Company, 2012: 10). برای تأمین این میزان برق و با در نظر گرفتن ضریب بهره‌برداری ۲۵ درصد برای توربین‌های بادی، ۲۰ درصد برای مولدهای خورشیدی و ۸۰ درصد برای نیروگاه‌های زیست‌توده، ظرفیت توربین‌های بادی در افق چشم‌انداز به ۸۲۲ مگاوات، ظرفیت مولدهای خورشیدی به ۲۵۷ مگاوات و ظرفیت نیروگاه‌های زیست‌توده به ۲۲ مگاوات خواهد رسید. اجرای این سیاست‌ها، ایجاد ۵۰۰۰ 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 پارچه<sup>۱</sup> (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 ۱۴۱۰ 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 ۱۴۱۰ 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.

## 1- Integrated Renewable Energy System

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 ۱۰۰۰ 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 ۱۲۰ روزه سیستان بستگی داشته است که در مناطق مختلف خراسان، به‌ویژه از خواف تا نهبندان می‌وزد. آغاز وزش باد ۱۲۰ 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 می‌شوند. 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 ۱۲۰ روزه سیستان، یکی از مناطق کشور است که از شدت وزش بالای باد برخوردار است. متوسط شدت وزش باد در این منطقه حدود ۹ متر بر ثانیه است. در این سرعت بیشتر توربین‌های بادی دارای بازدهی بیش از ۸۰ درصد خواهند بود. نیروگاه ۱۰۰ مگاواتی خواف که در بهار سال ۱۳۹۱ عملیات اجرایی آن آغاز

شده است، اولین واحد نیروگاهی در این منطقه است (همان: ۱۲). 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 (۱۳۹۱)، خراسان بزرگ 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 داراست (Ibid: 10).

از سوی دیگر خراسان بزرگ سالانه حداقل ۳۰۰ روز آفتابی را پشت سر می‌گذارد که 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).

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 ۶۱/۳۵ مگاوات وارد شبکه خواهد شد. این ظرفیت با ضریب بهره‌برداری متوسط ۸۰ درصد، تولیدی معادل ۴۲۹/۸۷ گیگاوات ساعت را وارد شبکه خواهد نمود که با توجه به مصرف ۴۸۸۸/۶۱ گیگاوات ساعتی برق شهری مشهد، قابلیت تأمین ۸ درصد تقاضای برق مشترکین شهری مشهد فراهم خواهد شد<sup>۱</sup>.

### فرآیند توسعه صنعت برق و ماهیت منطقه‌ای تولید برق در ایران

۱- آمار مربوط به مصرف شهری مشهد در سال ۱۳۹۱ از آمار تفصیلی صنعت برق ایران، بخش توزیع نیروی برق صفحات ۱۱۲-۱۲۰ استخراج شده است.

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: ۱- ورود مولدهای خصوصی تولید برق به کشور (۱۲۷۹ ه.ش)؛ ۲- واگذاری مولدهای خصوصی تولید برق به بخش دولتی (۱۳۰۵ ه.ش)؛ ۳- تأسیس وزارت آب و برق به منظور افزایش تولید و کاهش هزینه‌ها با اعمال سیاست ملی شدن صنعت برق (۱۳۴۲ ه.ش)؛ ۴- تشکیل شرکت‌های برق منطقه‌ای برای مدیریت هماهنگ تولید، انتقال و توزیع در مناطق مختلف کشور (۱۳۴۶ ه.ش)؛ ۵- تشکیل شرکت توانیر به منظور استفاده بهینه از انرژی تولیدی، گسترش، توزیع و بهره‌برداری بهینه از نیروگاه‌ها و ایجاد شبکه به هم پیوسته انتقال (۱۳۴۷ ه.ش). ۶- تأسیس وزارت نیرو. مصوب ۱۳۵۳ و اصلاحیه ۱۳۵۷؛ 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 ۱۳۴۳ تشکیل شد و مسئولیت تأمین برق شهرستان مشهد را با استفاده از چند دستگاه مولد دیزلی بر عهده گرفت. در سال ۱۳۴۷ برای تأمین برق شهرهای دیگر استان نیروگاه حرارتی مشهد به بهره‌برداری رسید. در سال ۱۳۴۹ 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 ۱۳۶۵ ضمن تأمین برق شهرهای جنوبی و چند شهر شمالی خراسان با نیروگاه‌های دیزلی تحت مدیریت خود مسئولیت انتقال و توزیع برق در استان خراسان را بر عهده داشت. در سال ۱۳۶۶ 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<sup>۱</sup> در گزینه‌های سیستم تأمین انرژی، برنامه‌ریزی، مدیریت و اقتصاد انرژی‌های تجدیدپذیر و فسیلی، به توسعه پایدار کمک شایانی خواهد داشت. با این حال این تعامل پیچیده تصمیم‌گیری را دشوارتر می‌سازد. اثر متقابل انرژی و اقتصاد در بخش‌هایی از انرژی، به ویژه انقلاب صنعتی و استفاده وسیع از سوخت‌های فسیلی، به عنوان 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 به منظور 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

#### 1- Rational Decision-Making (RDM)

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 پایدار<sup>۱</sup> (EISD)، ۳۰ 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 به‌منزله 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 تعریف یک رویکرد یکپارچه در جهت توسعه و پایداری انرژی کمک خواهد نمود (Vera and Langlois, 2007: 277).

به‌طور ساده دو مکتب ایدئولوژیکی را می‌توان در اقتصاد محیط‌زیست تفکیک نمود که عبارتند از فن‌محوری<sup>۲</sup> و اقتصاد محوری<sup>۳</sup>. طرفداران دیدگاه فن‌محوری بر این عقیده‌اند که نایستی فشار یا قید و بندی بر افراد مصرف‌کننده یا بر بازارها اعمال گردد. آن‌ها طرفدار فلسفه

1- Energy indicators for sustainable development

2- Technocentrism

3- Ecocentrism

«بازار آزاد بدون محدودیت» بوده و فلسفه مزبور را با اعتقاد راسخ به قدرت تکنولوژی جهت غلبه بر معضلات مربوط به «محدودیت‌های زیستی» تلفیق می‌کنند و قائل به امکان جداسازی گسترده هستند. این دیدگاه «فن محوری حد و فور نعمت<sup>۱</sup>» و سیستم حاصل از آن را اقتصاد ضد سبز<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. در این رابطه، دیدگاه دیگری که از افراط‌گری کمتری برخوردار است و «فن محوری انعطاف‌پذیر<sup>۳</sup>» نام دارد، می‌پذیرد که بازارهای آزاد دارای آثار مفیدی بر محیط‌زیست هستند، اما تنها در شرایطی که افراد تفکر و عمل مطابق با هنجارهای زیست‌محیطی داشته باشند. بنابراین، مصرف‌کننده سبز، سرمایه‌گذار سبز، شهروند سبز و کارمند سبز، عوامل قدرتمند می‌باشند. از این دیدگاه، احتمال جداسازی وجود دارد، اما برای یک اقتصاد پایدار همچنین برخی محدودیت‌های زیست‌محیطی (یعنی حفظ سیستم تأمین زندگی و حفظ ظرفیت جذب ضایعات) الزام‌آور گشته و نیازمند برخی تغییرات خواهد بود. برخی منابع زیست‌محیطی (که به «سرمایه بحرانی طبیعی<sup>۴</sup>» معروفند) باید به‌دقت حفظ و نگهداری شوند تا بدون کم‌وکاست به نسل‌های آتی منتقل گردند. سایر منابع زیست‌محیطی (که به «سایر سرمایه‌های طبیعی» معروفند) را با توجه به‌احتمال جایگزینی آنها بین رده‌های مختلف سرمایه‌های طبیعی یا بین سرمایه طبیعی، سرمایه فیزیکی و سرمایه انسانی (یعنی مهارت‌ها، دانش و خلاقیت بشری) می‌توان مورد بهره‌برداری قرار 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:

- 1- Conrnuocpain Technocentrism
- 2- The Anti-green Economy
- 3- Accomodating Technocentrism
- 4- Critical Natural captial

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. به عبارت دیگر با افزایش میزان درآمد بر میزان پذیرش آبگرمکن خورشیدی افزوده می‌شود (Shaditalab and Nayehdor, 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 به عنوان 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 زیاده‌های آلی، نمونه خوبی برای انجام این کار تحقیقاتی می‌باشد. از این رو 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. ۱- بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان‌ها ۲- پاک‌سازی هوای فضاها و مسکونی ۳- 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 ۱۰ 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 ۱۰٪ افزایش یابد توان دستگاه ۴۰٪ 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 ۵۰۰ 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 ۱۳۰۰ ریال برای هر متر مکعب، نسبت منافع به مخارج برای تبدیل اغلب مولدهای گازی به چرخه ترکیبی، بیش از ۲ 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 به منظور تأمین برق مورد نیاز ایستگاه پمپاژ آب سد سبلان 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 HOMER<sup>۱</sup> مقایسه شده است<sup>۲</sup>. 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 به عنوان منابع اصلی، پیل سوختی به عنوان ذخیره ساز و منبع تولید هم‌زمان، گرم کن به عنوان تأمین کننده قسمتی از بار حرارتی در زمانی که توان تولیدی بیشتر از بار، و سیستم ذخیره برق نیز ظرفیت کافی نداشته باشد و همچنین بویلر به عنوان پشتیبان برای تأمین مطمئن بار حرارتی است (Namvar Bahraghani et al., 2012).

اسلاملوئیان و استادزاد الگویی برای تعیین سهم بهینه انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر در مسیر رشد پایدار طراحی نموده و این سهم‌ها را برای اقتصاد ایران محاسبه نموده‌اند. در این راستا، ابتدا انرژی‌های فسیلی و تجدیدپذیر به عنوان 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 ۱۳۸۹، سهم بهینه انرژی تجدیدپذیر بایستی ۰/۸ درصد از کل انرژی باشد. اما در عمل این سهم در این

## 1- Hybrid Optimization Model for Electric Renewables

۲- مدل HOMER عموماً برای مدل بهینه سازی ترکیبی برای برق تجدید پذیر مورد استفاده قرار می‌گیرد و سیستمهای قدرت کوچک و تولید همزمان برق و حرارت به راحتی در این مدل قابل مدلسازی است.

سال تنها ۰/۴ درصد بوده است. همچنین با توجه به پیش‌بینی الگو، برای اینکه اقتصاد ایران تا سال ۱۴۰۰ بر مسیر رشد پایدار قرار گیرد بایستی ۲/۱ درصد از کل انرژی به وسیله انرژی‌های تجدیدپذیر تولید شود. دستیابی به این مهم، مستلزم رشد متوسط سالانه ۲۶ درصدی تولید انرژی‌های تجدیدپذیر در دوره ۱۳۸۹ تا ۱۴۰۰ است (Eslamloyian and Astadzad, 2012).

شریفی و همکاران (۱۳۹۲)، به منظور 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 ۱۴۶۶ (۷۷ سال پس از سال مبنا) و با فرض کاهش ۵۰ درصدی هزینه تبدیل انرژی خورشید و باد در هر ده سال، این انتقال در سال ۱۴۰۹ (۲۰ 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 شیه‌سازی 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، ۳۳ درصد انرژی اولیه به الکتریسیته تبدیل می‌شود ولی در صورت استفاده از این فناوری و بهره‌برداری از نیمی از پتانسیل تجدیدپذیر موجود، ۵۵ 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 ۹۰ 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 برق آبی سوئد و نروژ و برق تولیدی در سیستم تولید برق از گرما در آلمان، شبیه‌سازی و ارزیابی نموده است و راه‌کارهایی 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 تعیبه 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 ایرلند می‌شود (Connolly et al., 2012).

ژای و همکاران به بررسی پتانسیل کاهش انتشار آلاینده‌های هوا در اثر افزایش ۱۰ درصد تولید برق خورشیدی در ده ایالت آمریکا پرداخته‌اند. میزان کاهش انتشار در این ده ایالت به ترتیب در مورد کربن دی‌اکسید به میزان ۱۵۰۰ گرم در وات و برای گوگرد دی‌اکسید سولفور ۷/۸ گرم در وات بوده است. به علاوه این میزان افزایش در استفاده از انرژی خورشیدی، به کاهش ۲/۴ گرم ناکس<sup>۱</sup> در هر وات نیز منجر شده است (Zhai et al., 2010).

کابالرو و همکاران با شبیه‌سازی فرآیند تولید برق در شهر هانگاروا<sup>۲</sup> در ایسترایسلند شیلی<sup>۳</sup>، تأثیر ایجاد یک سیستم انرژی هیبریدی<sup>۴</sup> (HES) را با در نظر گرفتن ورود پانل‌های خورشیدی و توربین‌های بادی مورد بررسی قرار داده‌اند. هدف این پژوهش طراحی یک سیستم بهینه تجاری برای سیستم‌های انرژی هیبریدی کوچک مقیاس برای ۱۵ واحد مسکونی شهری است که بتواند هزینه طول عمر<sup>۵</sup> (LLC) سیستم را به حداقل برساند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از

1- NOx

2- Hanga Roa

3- Easter Island, Chile

4- HybridEnergy System

5- Life Cycle Cost



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 تجمیع شده سیستم کرده است و در مقابل کارایی صفحه‌های خورشیدی اثر کارآمدی بر سیستم نداشته است (Caballero et al., 2013).

پرکویچ و همکاران به امکان‌سنجی تولید برق در نیروگاه‌های بادی و بررسی اثر مانگوس<sup>۱</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 مورد بررسی قرار گرفته‌اند و با توجه به میزان فاصله مبدأ تولید و مقصد مصرف انرژی الکتریکی ایجاد شده در منابع بادی، امکان و قابلیت عملیاتی شدن تأسیس نیروگاه‌ها، با ظرفیت‌های مختلف، ارزیابی شده‌اند (Perkovic et al., 2013).

پرزا و اوسترگارد به ارزیابی آثار قیمتی، هزینه‌ای و زیست‌محیطی استفاده از تهویه مطبوع طبیعی به جای سیستم تهویه مطبوع الکتریکی در سیستم انرژی بخش خانگی مکزیکی پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهند که این جایگزینی منجر به کاهش ۲/۸۹ میلیون تنی انتشار کربن دی‌اکسید در طول دوره تولید یکساله خواهد شد که کاهش معادل ۲/۱۷ درصدی انتشار کربن دی‌اکسید در سیستم انرژی مکزیکی را به دنبال خواهد داشت. به علاوه با استفاده از سیستم تهویه مطبوع طبیعی، ۱۲/۵ 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 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 است. در بهترین سناریوی توسعه نیروگاه‌های بادی و استفاده وسایل حمل‌ونقل الکتریکی از این رقم باید به ۸ درصد برسد و در چنین شرایطی میزان انتشار کربن دی‌اکسید به حداقل رسیده و کارایی سیستم نیز حداکثر خواهد شد (Liu et al.,

---

1- Magnus effect

(2013).

سابرو و همکاران به ارزیابی تأثیر وارد شدن انرژی‌های تجدیدپذیر به سیستم انرژی کشورهای فروسحرائی آفریقا پرداخته‌اند و بدین منظور پتانسیل انرژی‌های خورشیدی، زیست‌توده، بادی، برق آبی و زمین‌گرمایی 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 بهینه‌نهایی معرفی خواهد شد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بخشی از تقاضای گرمایش و الکتریسته آلمان که حدود ۶۲ درصد تقاضای انرژی آلمان را تشکیل می‌دهد را می‌توان از طریق منابع تجدیدپذیر تأمین نمود به نحوی 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 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 ۱۰ 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 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 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، ۳۰ درصد تعیین شده است.

در این پژوهش برای شبیه‌سازی سیستم تولید از روش برنامه‌ریزی آنالیزی<sup>۱</sup> با رویکرد توأم 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> (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

1- Analytical programming

2- Descriptive-Prescriptive

3- Zelinka

مجموعه تابعی عمومی<sup>۱</sup> (GFS) برای نام‌گذاری آن استفاده می‌شود. در برنامه‌ریزی آنالیزی پاسخ‌هایی مناسب شناخته خواهند شد که نگاهت<sup>۲</sup> اعضای مجموعه تابعی به مجموعه‌ای از برنامه‌های احتمالی و عملیاتی باشند. به علاوه در مجموعه تابعی عمومی، زیرمجموعه‌های حضور دارند که هر یک دربردارنده تعدادی تابع هستند. تعداد توابع موجود در هر زیرمجموعه نیز، کوچک‌تر یا مساوی تعداد اجزای زیرمجموعه است. به دست آوردن نگاهت اعضای مجموعه تابعی از یک فرآیندی دو بخشی تبعیت می‌کند: بخش اول ارزیابی مجموعه گسسته<sup>۳</sup> (DSH) و بخش دوم طراحی فرآیندهای تضمین‌کننده است. فرآیند ارزیابی مجموعه گسسته توسط زلینکا (2004) و همکاران (2005) در ایجاد یک شاخص گسسته مورد استفاده قرار گرفت که در یک فرآیند تکاملی همانند ارزیابی افراد جایگزین در ساختار لانه‌ای<sup>۴</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.

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

- 
- 1- General Functional Set
  - 2- Mapping
  - 3- Discrete Set Handling
  - 4- Nested structure

در الگوی برنامه‌ریزی آنالیزی لوند<sup>۱</sup> (2014) برای شبیه‌سازی 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 (۱) 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  $g(t)$ ، به صورت رابطه (۲) خواهد بود که نشان‌دهنده هزینه کل (TC) تولید است:

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

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

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 (۴) خواهد بود:

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

اکنون با در نظر گرفتن بازه‌های زمانی یکسان و یک ساعته، می‌توان رابطه (۴) را به صورت

رابطه (۵) 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

1- Lund

تقاضا به‌طور ناگهانی از میزان پیش‌بینی شده کمتر شود، زمینه لازم برای ذخیره‌سازی مازاد عرضه انرژی الکتریکی موجود در سیستم تولید فراهم خواهد شد<sup>۱</sup>.

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:

$$P(t) = \gamma_F(t) + \gamma_M(t) + \gamma_I(t) \quad (۶)$$

با توجه به تعریف اجزای قیمت لحظه‌ای-ساعتی سیستم تولید، می‌توان رابطه (۶) را به صورت رابطه (۷) بازنویسی کرد:

$$P(t) = \frac{\partial G_F[g(t)]}{\partial g(t)} + \frac{\partial G_M[g(t)]}{\partial g(t)} + \frac{\partial G_I[g(t)]}{\partial g(t)} \quad (۷)$$

مجموع این سه عبارت در اصطلاح، لامبدا<sup>۲</sup> سیستم<sup>۲</sup> نامیده می‌شود (Ibid: ۳۶۵):

$$\lambda(t) = \frac{\partial G_{FMI}[g(t)]}{\partial g(t)} = \gamma_F(t) + \gamma_M(t) + \gamma_I(t) \quad (۸)$$

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<sup>۳</sup> EnergyPLAN 11.4 و energyPRO 6.3، در کنار مدل WASP-IV<sup>۴</sup> طراحی شده‌اند<sup>۵</sup>. 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 اوسیموسیس<sup>۶</sup> (OSEMOSYS) انجام شده است. داده‌های توان، تولید، تقاضا و هزینه نیروگاه‌های فسیلی و تجدیدپذیر محدوده شرکت برق منطقه‌ای خراسان بر اساس اطلاعات و آمار سال پایه ۱۳۹۱ در

۱- توضیحات ماژول ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی در پیوست (۱) گزارش شده است.

2- System lambda

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

4- Wien Automatic System Planning Package

۵- 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.

6- OSEMOSYS: the Open Source Energy Modeling System

سیستم شبیه‌سازی وارد شده‌اند. داده‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی سیستم در سناریوی اولیه سال پایه، در پیوست پژوهش (جدول ۱ تا جدول ۴) گزارش شده‌اند. محاسبه قیمت تمام‌شده تولید - که بر اساس مجموع هزینه نهایی تولید در لحظه t محاسبه می‌شود - از روش هزینه‌های هم-ترازسازی 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 هستند<sup>۱</sup>.

همان‌گونه که در مبانی نظری پژوهش اشاره شد، بر اساس سناریوی تولید هیبرید سند چشم‌انداز ۱۴۱۰ انرژی‌های تجدیدپذیر شرکت برق منطقه‌ای خراسان، ظرفیت توربین‌های بادی در افق چشم‌انداز به ۸۲۲ مگاوات، ظرفیت مولدهای خورشیدی به ۲۵۷ مگاوات و ظرفیت نیروگاه‌های زیست‌توده به ۲۲ 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، ۱۰ 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 ۱۰۴/۵، ۳۹/۷۵ و ۱۵/۰۹ میلیون ریال و هزینه ثابت و متغیر عملیات و نگهداشت برق خورشیدی، بادی و زیست-

۱-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.

توده در هر مگاوات ساعت به ترتیب ۶۳۶ ریال، ۱۵۶۸۹۷ ریال و ۵۱۰۰۳ 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 دانمارک<sup>۱</sup> (2011)، مالیات انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی نیز ۴۹۳۰۲۷/۲ 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 ۲۴۷۵۲ و ۳۲۴۳۶ ریال است.

### نتایج مدل

بر اساس شبیه‌سازی سیستم تولید مبتنی بر برنامه‌ریزی آنالیزی، نتایج شبیه‌سازی سیستم تولید پایه و سیستم تولید هیبرید فسیلی-تجدیدپذیر در جدول ۵ گزارش شده است. همچنین نتایج لحظه-ای-ساعتی تقاضای شبکه و تولید برق تجدیدپذیر نیز به پیوست، نمودار ۱ تا نمودار ۴ گزارش شده‌اند.

نتایج ارائه شده در جدول ۱ نشان می‌دهد که با ورود اهداف توان تجدیدپذیر چشم‌انداز ۱۴۱۰، قیمت متوسط برق تولیدی حدود ۳۲ درصد افزایش خواهد داشت و به ۷۷۷۴۰۶ 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 ۰/۴ تراوات ساعت به ۲/۳۶ تراوات ساعت خواهد رسید که افزایش قابل-توجهی است. همچنین حجم بهینه صادراتی نیز ۱۸/۶۲ تراوات ساعت افزایش خواهد یافت که افزایش ۱۴ درصدی را نسبت به مدل پایه نشان می‌دهد.

1- Danish Energy Agency (2011)



جدول ۱- نتایج شبیه‌سازی شرایط اولیه سیستم تولید و سیستم تولید هیبرید فسیلی-تجدیدپذیر

سیستم تولید شاخص	شرایط اولیه سیستم تولید <sup>۱</sup>	تولید هیبرید فسیلی- خورشیدی <sup>۲</sup>	تولید هیبرید فسیلی-بادی <sup>۳</sup>	تولید هیبرید فسیلی-زیست-توده <sup>۴</sup>	تولید هیبرید فسیلی- خورشیدی-بادی- زیست‌توده <sup>۵</sup>
متوسط قیمت (ریال بر مگاوات ساعت)	۵۸۴,۸۸۵/۲۷	۶۹۹,۳۷۷/۵۶	۷۰۳,۸۶۴/۱۱	۶۱۹,۰۵۲/۹۹	۷۷۷,۴۰۶/۵۱
انتشار آلایندگی زیست‌محیطی (میلیون تن)	۲۳/۱۳	۲۳/۱۳	۲۳/۱۳	۲۳/۱۳	۲۳/۱۳
تولید بهینه برق تجدیدپذیر <sup>۶</sup> (میلیون مگاوات ساعت)	۰/۰۴	۰/۴۵	۱/۷۶	۰/۱۵	۲/۳۶
تولید بهینه برق فسیلی (میلیون مگاوات ساعت)	۳۶/۹۲	۳۶/۹۲	۳۶/۹۲	۳۶/۹۲	۳۶/۹۲
حجم بهینه صادراتی <sup>۷</sup> (میلیون مگاوات ساعت)	۱۶/۳	۱۶/۷۱	۱۸/۰۲	۱۶/۴۱	۱۸/۶۲
شاخص پایداری شبکه <sup>۸</sup> (درصد)	۱۰۶	۱۰۳	۱۰۱	۱۰۵	۱۰۴

- ۱- در مدل پایه صرفاً ظرفیت فسیلی و ظرفیت عملی ۸ مگاواتی نیروگاه بادی بینالود وارد شده است.
- ۲- در این سناریو، توان خورشیدی هدف گذاری شده در افق ۱۴۱۰ (با تکنولوژی فتوولتائیک) به مدل پایه اضافه شده است.
- ۳- در این سناریو، توان بادی هدف گذاری شده در افق ۱۴۱۰ به مدل پایه اضافه شده است.
- ۴- در این سناریو، توان زیست‌توده هدف گذاری شده در افق ۱۴۱۰ به مدل پایه اضافه شده است.
- ۵- در این سناریو، توان بادی-خورشیدی و زیست‌توده هدف گذاری شده در افق ۱۴۱۰ به مدل پایه اضافه شده است.
- ۶- 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 تامین کننده پایداری سیستم باشد و به اطمینان سیستم تولید خدش‌های وارد نکند، را نخواهد داد.
- ۷- این حجم بهینه با توجه به برآورده شدن قیود انتقال بین منطقه‌ای و بین‌المللی تعیین شده است.
- ۸- در محاسبه این شاخص از روش لوند (2014) صفحات ۸۶-۸۸ استفاده شده است. برای اطلاعات بیشتر ر.ک:

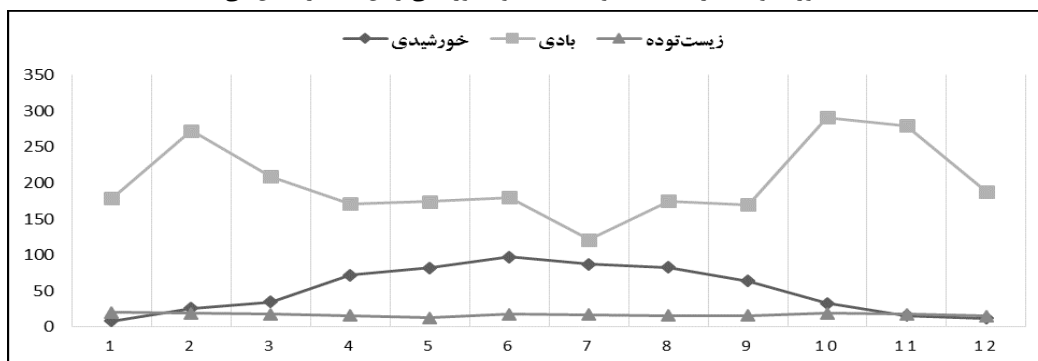
Lund, H. (2014) Advanced Energy Systems Analysis Computer Model, Documentation Version 11.4, Aalborg University, Denmark

Holtinen H, Hirvonen R, Power System Requirements for Wind Power, Wind Power in Power Systems, John Wiley & Sons Ltd., 2005, pp. 144-167.

منبع: محاسبات تحقیق.

### نمودار ۱: تولید ماهانه سناریوی هیبرید فسیلی-خورشیدی-بادی-زیست‌توده

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



منبع: محاسبات تحقیق.

نکته حائز توجه این است که با وجود افزایش ۵۵۷ 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 می‌شود<sup>۲</sup>. نتایج مربوط به تولید ماهانه و صادرات خالص لحظه-ای-ساعتی سناریوی هیبرید فسیلی-خورشیدی-بادی-زیست‌توده نیز در نمودار ۱ و نمودار ۲ 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

۱- از آنجایی که شبیه‌سازی بر اساس تقویم میلادی انجام شده است، ماه آغازین ژانویه، (دی) و ماه پایانی دسامبر (آذر) است.  
 ۲- 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 قابلیتی 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.

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

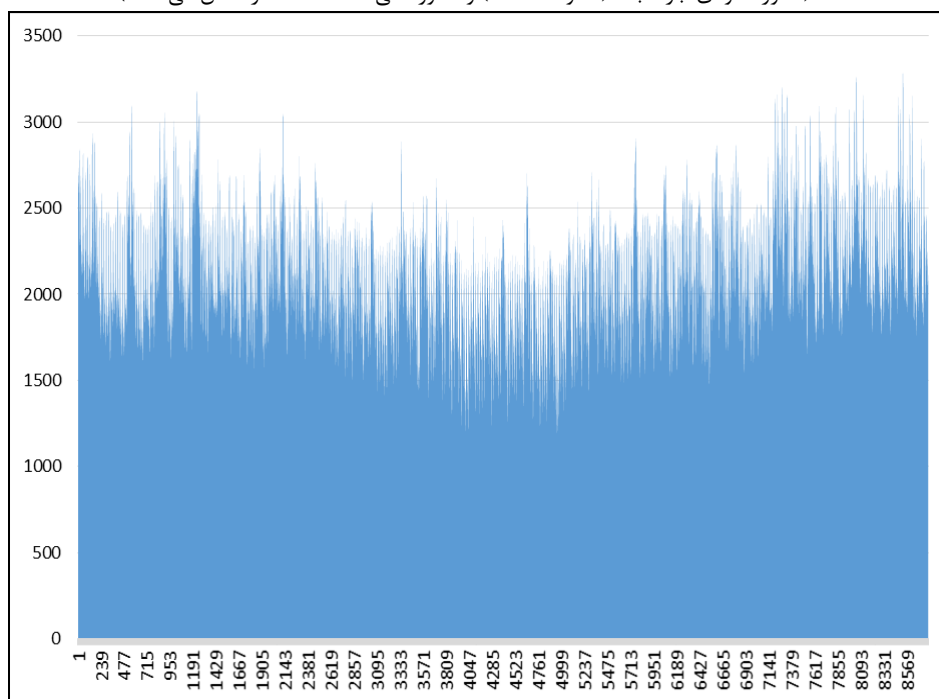
عدم تغییر در حجم انتشار گازهای آلاینده محیط‌زیست پس از ورود برق تجدیدپذیر بادی- خورشیدی-زیست‌توده بدین معناست که ظرفیت‌های ایجاد شده توان تجدیدپذیر، نمی‌تواند به اندازه‌ای تقاضای شبکه منطقه‌ای و فرمانطقه‌ای را پوشش دهد که نیاز به تولید برق فسیلی را کاهش دهد و در حقیقت تولید توان تجدیدپذیری به اندازه‌ای 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.

بنابراین ایجاد این میزان توان تجدیدپذیر، اثر زیست‌محیطی چندانی بر منطقه نخواهد داشت و نمی‌توان شواهد برنامه‌ریزی برق منطقه‌ای را موید ایجاد قابلیت جانشین‌پذیری برق تجدیدپذیر و فسیلی - حتی در صورت ایجاد ظرفیت‌های تولید برق تجدیدپذیر افق چشم‌انداز ۱۴۱۰- 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 ۶۱/۳۴ مگاواتی برق زیست‌توده، ۷۰۰۰ مگاواتی برق بادی و ۴۰۰۰۰ 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 بزرگ<sup>۱</sup> تجدیدپذیر را در تولید برق تجدیدپذیر منطقه خراسان مشاهده نمود. همچنین افزایش ۳۲ 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 ۱۰۴/۵ و ۳۹/۷۵ 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

1- Economies of scale

هوا-خورشید (در جهت مشاوره فنی-مهندسی و ایجاد پروژه‌های مشترک) می‌تواند به این مهم نائل شود.

نمودار ۲: 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)



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 اشتراک‌گذاری 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

۱- از آنجایی که شبیه‌سازی بر اساس تقویم میلادی انجام شده است، در نمودارهای لحظه‌ای-ساعتی، روز آغازین یک ژانویه، (۱۱ دی) و روز پایانی ۳۰ دسامبر (۱۰ دی) است.

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 ۲۰۱۴ با نرخ ۴۰۰ 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 ۵۰۰ درصدی تولید برق تجدیدپذیر و خارج شدن سهم آن از یک حالت نمادین از رقم ۰/۴ تراوات ساعتی به یک الگوی واقعی ۲/۳۶ تراوات ساعتی نیز بسیار حائز اهمیت است. به علاوه افزایش ۲/۳۲ 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 تمام شده 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 عدم‌النفع 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 (۱) مازول ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی در شرایط مازاد عرضه

برای ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی لازم است که استراتژی اقتصادی-تجاری<sup>۱</sup> 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.<sup>۲</sup> 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.<sup>۳</sup> تفاوت میان قیمت پیشنهادی فروش به بازار و قیمت خرید از بازار را می‌توان بر مبنای فاکتور افزایش<sup>۴</sup> (AF) و فاکتور تکاثر<sup>۵</sup> (MF) محاسبه نمود. روابط روابط (۱ و ۲) 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 (۱ و 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 هر واحد انرژی ذخیره‌شده را نشان می‌دهد،  $\varphi_{CAES}$  نسبت سوخت

## 1- business-economic strategy

۲- 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.

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

## 4- Addition factor

## 5- Multiplication factor

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 (۳) میان قیمت پیشنهادی فروش به بازار ( $P_{sell}$ ) و قیمت خرید از بازار ( $P_{buy}$ ) برقرار باشد (Ibid,):

$$P_{sell} > P_{buy} * AF_{CAES} * MF_{CAES} \quad (۳)$$

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 و ۵) مشخص شده است (Ibid):

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

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

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) بیان نمود (Ibid):

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

در رابطه (۶)، 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) نشان داد (Ibid):

$$cons = VOC_{compressor} + TAX_{compressor} + (VOC_{turbine} * \alpha_{compressor} * \mu_{turbine}) + [\varphi_{CAES} * (P_{Ngas} + P_{Handling-Ngas} + TAX_{Ngas-CAES}) * 3.6 * (\alpha_{compressor} * \mu_{turbine})] \quad (۷)$$

اکنون بر اساس روابط (۴ و ۵) و معادل تکنولوژیکی-اقتصادی  $P_{diff}$  در رابطه (۷)، 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 و ۹) مشخص نمود:

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

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

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

$$\text{If } P_{mkt-sys} > P_{sell-min} \text{ then } ELC_{turbin} = \text{Min}(C_{turbin}, BP_{turbin}) \quad (۱۰)$$

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

همچنین چنانچه قیمت بازار پایین‌تر از حداکثر قیمت خرید ( $P_{buy-max}$ ) باشد و مصرف متوازن کمپرسور ( $BP_{compressor}$ ) 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 ( $CON_{compressor}$ ) به شرط برآورده شدن شرط راه‌اندازی را می‌توان با رابطه (۱۱) نمایش داد (Ibid, 149):

$$\text{If } P_{mkt-sys} < P_{buy-max} \text{ then } CON_{compressor} = \text{Min}(C_{compressor}, BP_{compressor}) \quad (۱۱)$$

در حقیقت بر اساس رابطه (۱۱-Error! No text of specified style in document.)، چنانچه مصرف بهینه کمپرسور ( $BP_{compressor}$ ) با برآورده شدن قیود قیمتی بازار و هزینه نهایی تولید، بیش از حداکثر ظرفیت مصرف کمپرسور ( $C_{compressor}$ ) باشد، میزان مصرف انرژی در سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده ( $CON_{compressor}$ ) به میزان حداکثر ظرفیت مصرف کمپرسور محدود خواهد شد.

جدول ۲: ویژگی‌های فنی-اقتصادی نیروگاه‌های محدوده شرکت برق منطقه‌ای خراسان (بخش اول)

سیکل کاوه	سیکل شیروان	شریعتی	مشهد	توس	نام نیروگاه
					شرح
۶۳۶	۹۵۴	۴۹۶	۳۲۵	۶۰۰	قدرت اسمی - مگاوات
۵۰۳	۸۰۲	۴۲۰	۳۰۰	۶۰۰	متوسط قدرت عملی - مگاوات
۲۴۹۵۶۱۳	۲۷۴۷۵۵۷	۲۱۸۴۷۴۷	۱۳۴۴۵۷۹	۳۹۹۲۹۰۶	تولید ناخالص - مگاوات ساعت
۱۱,۷	۱۲,۹	۱۰,۳	۶,۳	۱۸,۸	درصد از کل تولید - درصد
۲۴۸۶۰	۲۵۴۴۴	۳۷۷۲۷	۷۹۱۳۸	۲۹۰۱۰۷	مصرف داخلی - مگاوات ساعت
۲۴۷۰۷۵۳	۲۷۲۲۱۱۳	۲۱۴۷۰۲۰	۱۲۶۵۴۴۱	۳۷۰۲۷۹۹	تولید خالص - مگاوات ساعت
۵۵۱	۸۶۴	۴۱۳	۱۹۶	۵۷۴	حداکثر بار تولیدی - مگاوات
۵۱,۷	۳۶,۳	۶۰,۴	۷۸,۳	۷۹,۴	ضریب بار - درصد
۵۶,۶	۳۹,۱	۵۹,۴	۵۲,۲	۷۶	ضریب بهره‌برداری - درصد
۷۳۳۲۹۳	۸۳۱۷۹۶	۴۴۶۶۲۳	۴۸۲۵۲۲	۳۵۶۱۶۶	سوخت گاز - هزار متر مکعب
.	.	.	.	۷۲۲۱۹۷	سوخت مازوت - هزار لیتر
۷۸۵۶۶	۷۹۴۹۷	۶۶۰۷۸	۱۳۸۱	۳۲۲	سوخت گاز وئیل - هزار لیتر
۳۲,۵	۳۱,۹	۴۴,۹	۲۹,۵	۳۶,۴	راندمان - درصد

جدول ۳: ویژگی‌های فنی-اقتصادی نیروگاه‌های محدوده شرکت برق منطقه‌ای خراسان (بخش دوم)

جمع منطقه	بادی	فردوسی	نیشابور	قاین	نام نیروگاه
					شرح
۵۱۰۶	۲۸	۹۵۴	۱۰۳۸	۷۵	قدرت اسمی - مگاوات
۴۳۵۶	۸	۷۹۲	۸۷۵	۵۶	متوسط قدرت عملی - مگاوات
۲۱۲۹۵۲۹۷	۴۶۷۹۴	۲۵۱۱۸۰۰	۵۹۴۵۷۷۳	۲۵۵۲۸	تولید ناخالص - مگاوات ساعت
۱۰۰	۰,۲	۱۱,۸	۲۷,۹	۰,۱	درصد از کل تولید - درصد
۵۹۳۶۳۲	۶۰	۱۲۰۶۹	۱۲۳۲۰۱	۱۰۲۶	مصرف داخلی - مگاوات ساعت
۲۰۷۰۱۶۶۵	۴۶۷۳۴	۲۴۹۹۷۳۱	۵۸۲۲۵۷۲	۲۴۵۰۲	تولید خالص - مگاوات ساعت
۴۳۹۱	۲۸	۸۱۹	۸۸۷	۵۹	حداکثر بار تولیدی - مگاوات
۶۲,۷	۱۸,۸	۳۵	۷۶,۵	۴,۹	ضریب بار - درصد
-	۶۶,۸	۳۶,۲	۷۷,۶	۵,۲	ضریب بهره‌برداری - درصد
۴۷۶۴۵۰۵	۰	۷۶۱۲۵۳	۱۱۴۵۷۱۷	۷۱۳۵	سوخت گاز - هزار متر مکعب
۷۲۲۱۹۷	۰	۰	۰	۰	سوخت مازوت - هزار لیتر
۵۰۰۰۸۲	۰	۸۶۵۷۴	۱۸۴۰۱۱	۳۶۵۳	سوخت گاز وئیل - هزار لیتر
۳۷,۱	-	۳۱,۳	۴۷,۱	۲۴,۶	راندمان - درصد

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

$S_{CAES(t-1)}$ ) و ویژگی‌های تکنولوژیکی-اقتصادی توربین و کمپرسور بستگی دارد. بر این اساس در یک واحد ذخیره‌ساز هوای فشرده به صورت رابطه (۱۲) خواهد بود (Ibid):

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

جدول ۴: 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

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

اگر گنجایش بهینه ذخیره‌سازی از ظرفیت واحد ذخیره‌ساز هوای فشرده فراتر رود، میزان بهره-برداری 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 گازی طبیعی مورد استفاده در واحد ذخیره‌ساز هوای فشرده تأمین گردد.

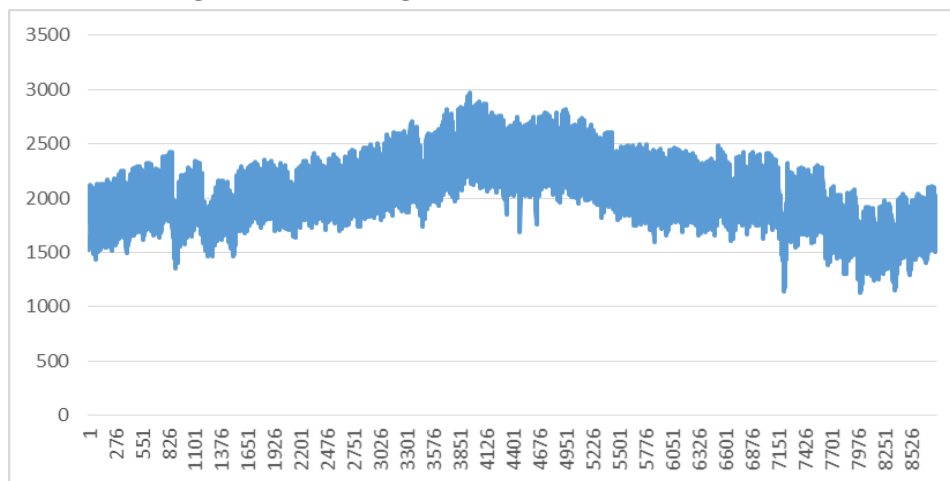
جدول ۵: داده‌های هزینه تولید نیروگاه‌های محدوده شرکت برق منطقه‌ای خراسان (بخش دوم)

نیروگاه	کنترل فرکانس (میلیون ریال)	کنترل مگاوار (میلیون ریال)	تعمیرات اساسی (میلیون ریال)	بهینه سازی / 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	۱۰,۰۰۰
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

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

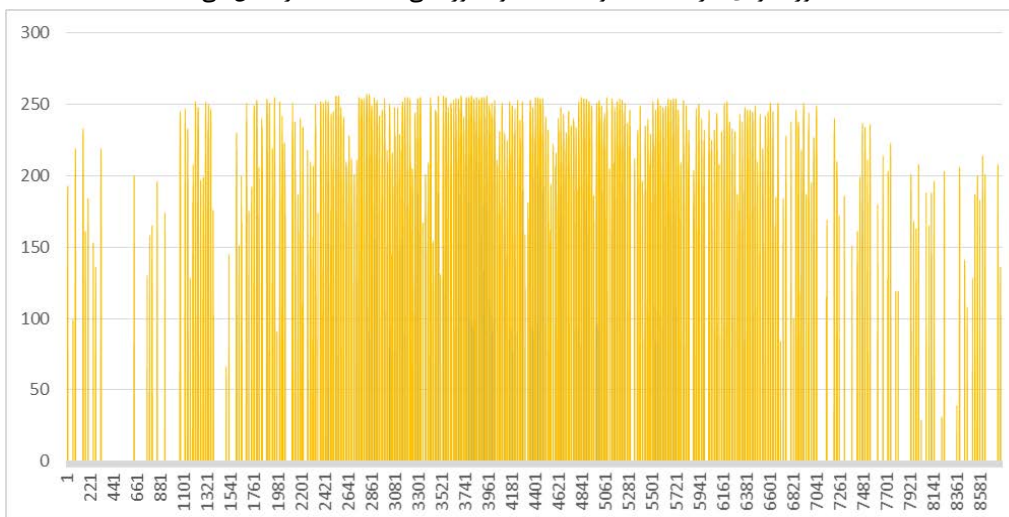
**نمودار ۳: توزیع لحظه‌ای-ساعتی تقاضای شبکه برق منطقه‌ای خراسان در سال ۱۳۹۱**

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



**نمودار ۴: توزیع لحظه‌ای-ساعتی تولید برق خورشیدی**

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

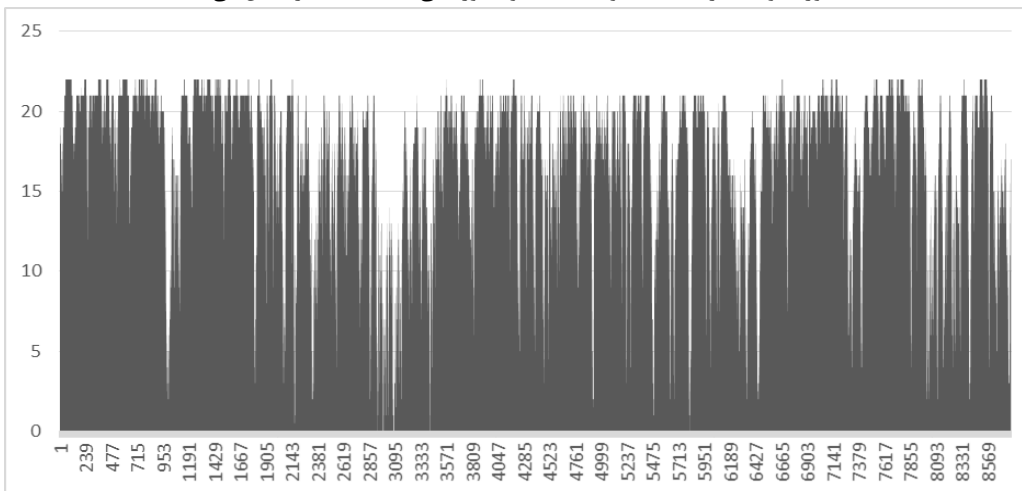


۱- از آنجایی که شبیه‌سازی بر اساس تقویم میلادی انجام شده است، در نمودارهای لحظه‌ای-ساعتی، روز آغازین یک ژانویه، (۱۱ دی) و روز پایانی ۳۰ دسامبر (۱۰ دی) است.



**نمودار ۵: توزیع لحظه‌ای-ساعتی تولید برق زیست‌توده**

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



**نمودار ۶: توزیع لحظه‌ای-ساعتی تولید برق بادی**

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

