قیمت‌گذاری لحظه‌ای– ساعتی تولید هیبرید برق با ورود حداکثر پتانسیل برق تجدیدپذیر به سیستم تولید با استفاده از رهیافت برنامه‌ریزی آنالیزی (مطالعه موردی: شرکت برق منطقه‌ای خراسان)[1]

مهدی قائمی‌اصل[2]، مصطفی سلیمی‌فر[3]، محمدحسین مهدوی‌عادلی[4]، مصطفی رجبی‌مشهدی[5]

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۸/۱۵ تاریخ پذیرش: ۹٤/۰۸/۱۷

چکیده

یکی از چالش‌های بزرگ منابع تجدیدپذیر، ماهیت غیرقابل‌پیش‌بینی این منابع است. در این میان استفاده از سیستم هیبرید فسیلی-تجدیدپذیر یک‌پارچه، که برای تأمین بار از چند منبع تجدیدپذیر به‌جای یک منبع استفاده می‌کند، مقرون به‌صرفه‌ترین و قابل‌اطمینان‌ترین روش است. در این پژوهش با بهره‌گیری از رهیافت برنامه‌ریزی آنالیزی و با استفاده آمار سال پایه ۱۳۹۱، سیستم تولید شرکت برق منطقه‌ای خراسان شبیه‌سازی شده

---

۱. این مقاله از پایان‌نامه دکتری نویسنده اول، به راهنمایی نویسنده دوم و مشاوره نویسندگان سوم و چهارم استخراج شده است.

۲. دکتری علوم اقتصادی دانشگاه فردوسی مشهد (نویسنده مسئول) Email: m.ghaemi84@gmail.com

۳. استاد گروه اقتصاد، دانشکده علوم اداری و اقتصادی، دانشگاه فردوسی مشهد Email : mostafa@ferdowsi.um.ac.ir

۴. استاد گروه اقتصاد، دانشکده علوم اداری و اقتصادی، دانشگاه فردوسی مشهد: Email : madeli_2001@yahoo.com

۵. استادیار دانشکده مهندسی برق و مهندسی پزشکی دانشگاه صنعتی سجاد و معاون راهبری مدیریت شبکه برق ایران

Email :m.rajabimashhadi@ieee.org

و حداکثر پتانسیل برق تجدیدپذیر نیز در این سیستم مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که از میان تکنولوژی‌های خورشیدی، بادی، زیست‌توده، زمین گرمایی و برق‌آبی، تنها برق تجدیدپذیر خورشیدی، از پتانسیل و ظرفیت کافی برای جانشین‌پذیری با برق فسیلی برخوردار است. در سیستم جامع نیز بکارگیری تمام توان تجدیدپذیر، به کاهش ۶/۸۳ تراوات ساعتی برق فسیلی، کاهش ۴/۲۸ میلیون تنی انتشار آلاینده، افزایش ۱۰ برابری متوسط قیمت لحظه‌ای-ساعتی و کاهش ۲۱ درصدی پایداری شبکه منجر می‌شود که نشان از لزوم بکارگیری تجهیزات پایدارساز و ذخیره‌ساز در سیستم تولید هیبرید یکپارچه و حمایت فنی-مالی دولت برای کاهش قیمت‌تمام شده تجهیزات خورشیدی دارد.

طبقه‌بندی JEL: C61: N7:O13: P28.

واژگان کلیدی: شبیه‌سازی سیستم برق، تولید هیبرید فسیلی-تجدیدپذیر، قیمت‌گذاری لحظه‌ای-ساعتی.

۱. مقدمه

افزایش روزافزون قیمت سوخت‌های فسیلی، تأثیرپذیری قیمت آن‌ها از حوادثی مانند شوک نفتی ۱۹۷۳ و ۱۹۸۱ (که باعث افزایش سرسام‌آوری قیمت نفت و محصولات نفتی شد)، پایان‌پذیری منابع فسیلی و گرم‌تر شدن جهان به دلیل گازهای گلخانه‌ای، که دلیل اصلی آن مصرف سوخت‌های فسیلی در دو بخش تولید انرژی الکتریکی و حمل‌ونقل است، لزوم کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی را گوشزد می‌کند (ماندیل[1]، ۲۰۰۴ : ۱۳۷). برای این منظور باید منبع یا منابعی برای تأمین مصرف رو به تزاید انرژی الکتریکی یافت و بهترین گزینه، منابع تجدیدپذیر باد، خورشید[2]، برق‌آبی، زمین‌گرمایی، زیست توده و غیره هستند. مهم‌ترین مزایای منابع تجدیدپذیر، پایان‌ناپذیری، فقدان هزینه سوخت، در دسترس بودن در همه جای زمین و عدم انتشار گازهای گلخانه‌ای برای تولید برق (منابع پاک) هستند (ژو[3] و همکاران، ۲۰۱۰: ۳۸۴). اما توسعه توانمندی کشورهای برخوردار از منابع فسیلی در حوزه منابع تجدیدپذیر، می‌تواند علاوه بر متنوع‌سازی فناوری‌های تولید انرژی، باعث بهبود وضعیت تولید انرژی در این کشورها نیز شود و موجب آزاد شدن منابع نفت و گاز برای صادرات و ایجاد ارزش افزودهٔ اقتصادی نیز گردد. به عبارت دیگر، داشتنِ ذخایر هیدروکربن در یک کشور برخوردار از منابع؛ نباید به این بیانجامد که این کشور تمام نیاز خود را با مصرف نفت و گاز تأمین کند (ملکی، ۱۳۹۰: ۱۰۷؛ با تلخیص).

در این میان یکی از چالش‌های بزرگ منابع تجدیدپذیر، ماهیت غیرقابل‌پیش‌بینی این منابع است که در برخی منابع به ویژه خورشید و باد، بسته به تغییرات آب‌وهوا، توان خروجی متغیری دارند (کاناسه‌پتیل و همکاران[4]، ۲۰۱۱: ۲۸۱۰). 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 یک‌لحظه خاص (مثلاً لحظه پیک‌بار)، باد با چه سرعتی می‌وزد و ژنراتور بادی چه مقدار برق

1. Mandil
2. Photo Voltaic (PV)
3. Zhou
4. Kanase Patil et al.

می‌تواند، تولید کند. درواقع سیستم‌هایی که به صورت منفرد و منحصر از یک منبع تجدیدپذیر استفاده می‌کنند (مثل سیستم‌های صرفا برخوردار از باد یا سیستم‌های صرفا برخوردار از خورشید یا هر منبع تجدیدپذیر انحصاری)، به هیچ‌وجه قادر به تامین بار پیوسته قابل‌اطمینان نیستند (تانیرون[1]، ۲۰۰۵: ۱۴۰). در این میان با استفاده از سیستم انرژی تجدیدپذیر یک‌پارچه، که برای تأمین بار از مجموع چند منبع تجدیدپذیر به‌جای یک منبع مانند باد، خورشید، و غیره استفاده می‌کند، مقرون به‌صرفه‌ترین و قابل‌اطمینان‌ترین 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 پیش‌روی استفاده از منبع دیگر پوشانده شود. این بدان معنی است که منبع باد درزمانی که منبع خورشیدی توانایی تولید توان را ندارد، مقداری از توان را تأمین کند و برعکس هنگامی‌که 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 تجدید پذیر در کنار هم، از کفایت[2] و صافی[3] 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 (ژو و همکاران، ۲۰۱۰: ۳۸۷).

بر این اساس هدف اصلی این پژوهش، شبیه‌سازی سیستم تولید هیبرید فسیلی-تجدیدپذیر در سیستم تولید است. این شبیه‌سازی با در نظر گرفتن برخورداری از یک سیستم تولید یک‌پارچه در شرکت برق منطقه‌ای خراسان انجام می‌شود و بدین منظور مهمترین شاخص‌های اقتصادی-فنی با بالاترین دقت ممکن در مدل شبیه‌سازی شبکه تولید مورد استفاده قرار گرفته‌اند. هدف دوم این پژوهش قیمت‌گذاری سناریوی بهینه تولید هیبرید در چارچوب یک سیستم یک‌پارچه تحت شبکه است که در این فرآیند

1. Tanrioven
2. Adequaty
3. Smooth

قیمت‌گذاری، قیمت برق تولیدی در سیستم تولید هیبرید و حجم بهینه تبادل انرژی، پس از برآورده شدن قیود ثبات شبکه و محدودیت‌های انتقال برای اهداف صادراتی و وارداتی، محاسبه شده‌اند و به ازای هر قیمت لحظه‌ای-ساعتی اعلام شده در بازار برق، میزان تولید هر یک از خطوط تولید فسیلی و تجدیدپذیر و میزان صادرات و واردات برق محاسبه شده‌اند.

بنابراین مسئله این پژوهش در مرحله اول، نحوه شبیه‌سازی سیستم تولید برق فسیلی و تجدیدپذیر است. در این شبیه‌سازی اجزای سیستم واقعی موجود تا جای ممکن به صورت کامل و جامع و بر اساس میزان دسترسی به اطلاعات، به صورت تفکیکی وارد مدل شبیه‌سازی‌شده خواهند شد و سپس ارزیابی تراز انرژی انجام خواهد شد. در صورتی که تراز انرژی برقرار نباشد و مازاد یا کمبودی در سیستم وجود داشته باشد از طریق تعدیل‌های شیوه تولید و ذخیره‌سازی یا از طریق صادرات یا واردات این تراز برقرار خواهد شد. پس از ایجاد تراز عرضه کل و تقاضای کل، هزینه تولید وارد سیستم شبیه‌سازی خواهد شد و قیمت‌گذاری محصول تولید آخرین گام فرآیند شبیه‌سازی سیستم در شرایط اولیه است. قیمت در الگوی شبیه‌سازی این پژوهش بر اساس حداقل هزینه نهایی تولید که شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری، هزینه‌های اضافی و هزینه‌های عملیات و نگهداشت حاصل از ترکیب بهینه تولید همزمان برق تجدیدپذیر و فسیلی محاسبه شده است که این هزینه نهایی با استفاده از فاکتورهای مربوط به شاخص قیمت سوخت‌های فسیلی مورد استفاده در سیستم تولید و هزینه آثار خارجی آلایندگی تعدیل شده است. اضافه شدن هر یک از تکنولوژی‌های تولید به منظور عرضه برق و پوشش بار تقاضای کل، بر اساس معیار حداقل هزینه کل تولید (شامل هزینه‌های اقتصادی، تجاری و آلایندگی) خواهد بود.

با توجه به الگوی نظری و چارچوب مدل‌سازی پژوهش، در ادامه و پس از مقدمه، در بخش اول مبانی نظری پژوهش ارائه شده است که به مبانی نظری قیمت‌گذاری لحظه‌ای-ساعتی و ماهیت سیستم‌های تولید هیبرید فسیلی-تجدیدپذیر می‌پردازد. در ادامه در بخش-های سوم و چهارم، ادبیات پژوهش و مدل پژوهش ارائه شده است که نوع برنامه‌ریزی

آنالیزی در این پژوهش به طور کامل در بخش چهارم تبیین شده است. پس از آن در بخش پنجم داده‌های مورد استفاده از شبیه‌سازی لحظه‌ای-ساعتی تشریح شده‌اند و در نهایت در بخش ششم و هفتم، نتایج پژوهش و نتیجه‌گیری و دلالت‌های پژوهش ارائه شده‌اند. در بخش انتهایی مقاله نیز منابع و پیوست ورودی‌های و خروجی‌های مدل شبیه-سازی شده ارائه شده است.

۲. مبانی نظری

اقتصاد انرژی، حوزه مطالعه استفاده بشری از منابع و محصولات انرژی و پیامدهای این استفاده است. منابع انرژی بصورت کلی می توانند بصورت تجدیدناپذیر و تجدیدپذیر دسته بندی شوند. این تقسیم بندی بر اساس سرعت فرآیند طبیعی شکل گیری انرژی هاست. در گذشته های دور بیشتر انرژی مورد استفاده بشر از نوع تجدیدپذیر و اکثرا زیست توده بود، اما از نیمه دوم قرن ۱۹ استفاده از انرژی‌های پایان‌پذیر مانند ذغال سنگ مطرح شد. از ابتدای قرن بیستم چاه های نفت مورد استخراج و از دهه ۱۹۲۰ استفاده از نفت و سپس گاز در جوامع رایج گردید. در این میان تا قرن نوزدهم آنچه که بیشتر در اقتصاد منابع طبیعی مورد بحث قرار می‌گرفت، زمین و مستغلات بود. اما به تدریج و پس از انقلاب صنعتی در اروپا، منابع طبیعی پایان‌پذیر نفت و گاز نیز مورد توجه اقتصاددانان قرار گرفت. در قرن بیستم و بخصوص پس از جنگ جهانی دوم برنامه ریزان متوجه شدند که هرگونه رشد اقتصادی ناچار با دسترس بودن منابع طبیعی ملازمه دارد. در اکثر سالهای قرن بیستم کسی به فکر آنکه این منابع محدود و پایان پذیر است نبود. اما اکنون بدون آنکه به عامل کاهش و پایان پذیری منابع طبیعی فکر کنیم، نمی‌توانیم تجزیه و تحلیل صحیح از اقتصاد کلان داشته باشیم (ملکی، ۱۳۹۰: ۱۱۸-۱۱۹).

در این میان، ارزیابی سطح امنیت انرژی و تعیین وضعیت کشورها، سیاستگذاران و کارشناسان را بر آن داشته‌است که شاخص‌های منفرد متعددی را ارائه دهند. شاخص‌هایی که هریک به بررسی بُعد خاصی از امنیت انرژی می‌پردازد. اما گسترگی و چند بعدی بودن مبحث امنیت انرژی مانع از آن می‌شود که تمامی ابعاد این مفهوم توسط شاخص‌های منفرد

بررسی گردد (کریت[1] و همکاران، ۲۰۰۹: ۳). با بروز شوک‌های نفتی و ایجاد رکود عمیق در کشورهای توسعه‌یافته، ترس از تخلیه منابع در آینده‌ای نزدیک و نگرانی‌ها از آثار سیاسی- اجتماعی احتمالی ناشی از تغییرات آب و هوایی[2]، امنیت انرژی را به پدیده‌ای چند بعدی و پیچیده نمود. به طوری که امروزه دربرگیرندهٔ ابعاد مختلف فرهنگی، اجتماعی، سیاسی، اقتصادی و حتی زیست‌محیطی است (ویوودا[3]، ۲۰۱۰: ۵۲۵۸). در تعریف جدید آژانس بین‌المللی انرژی[4] (۲۰۱۰) چهار عنصر اصلی: قابلیت دستیابی داشتن، در دسترس بودن، قابل تحمل بودن و قابل قبول بودن را می‌توان در بیان مفهوم امنیت انرژی شناسایی نمود:

۱- قابلیت دستیابی داشتن[5]: این شاخص را می توان در قالب کالاهایی دانست که ماهیت تکرارپذیری ندارند و از اصلی ترین شاخص های امنیت انرژی است. تمام انرژی های عمده فسیلی پایان پذیر هستند و هر چه مصرف بیشتر باشد، سرعت کاهش آنها نیز افزایش می‌یابد.

۲- در دسترس بودن[6]: با توجه به فاصله بسیار مابین تولید و مصرف ذخائر هیدروکربوری، در دسترس بودن جریان مداوم انرژی حائز اهمیت است.

۳- قابل تحمل بودن[7]: تجدید ناپذیر بودن ذخایر نفت و گاز، لزوم بکارگیری روشها و مقررات خاص در عمل و نظریه، جهت تعیین میزان بهره گیری و استفاده از این منابع را ایجاب کرده است. منطقی ترین این مقررات، استخراج صحیحی از منابع پایان پذیر و تنظیم میزان تولید تا حدی است که به باقیمانده ذخائر آسیبی نرسد.

- قابل قبول بودن[8]: مهمترین موضوع در امنیت انرژی، پیدا کردن مدلی است که بتوان با آن پایداری و تداوم را در توسعه درازمدت انرژی جستجو کرد. این بدان معناست که تعامل انرژی با محیط زیست و محیط اجتماعی از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

---

1. Kruyt
2. Climate Changes
3. Vivoda
4. International Energy Agency
5. Availability
6. Accessibility
7. Affordability
8. Acceptability

واضح است که دو بعد «قابلیت دستیابی داشتن» و «قابل قبول بودن» بر لزوم استفاده گسترده و پایدار از منابع تجدیدپذیر در کنار منابع تجدیدناپذیر دلالت دارند. به علاوه وان هیپل[1] (۲۰۰۹) معتقد است که ۴ چالش اصلی دیگری نیز وجود دارد که باید در مفهوم جدید امنیت انرژی وارد شود که عبارت اند از «محیط زیست»، «تکنولوژی»، «مدیریت طرف تقاضا» و « فاکتورهای سیاسی و فرهنگی- اجتماعی داخلی». در این میان شاید جدی‌ترین چالش اندیش‌ورزی در حوزه امنیت انرژی قدیمی (که متمایل به امنیت عرضه است) چالش محیط زیست باشد، اهمیت این مطلب تا بدان جاست که اگر بر فرض محال، مشکلات محیط زیست مثل تغییرات آب و هوایی و گرم شدن سطح زمین به گونه‌ای معجزه‌آسا حل شوند، دیگر سیاست های امنیت انرژی گذشته به کار نخواهند آمد و لازم است تعدیل‌های جدی در مورد الگوهای مصرف، تولید و استخراج حامل‌های انرژی صورت گیرد. به اعتقاد وان هیپل (۲۰۰۹)، چالش اصلی دیگری که در عرصه امنیت انرژی وجود دارد، نحوه ایجاد زیرساخت‌های تکنولوژیکی در اقتصاد جهانی است، بطوری‌که بودن استفاده از سوخت‌های فسیلی و با اتکا به منابع انرژی تجدیدپذیر و جایگزین بتوان نیازهای فنی اقتصاد جهانی را برآورده ساخت. همانطور که جهان به سرعت به سمت ایجاد جامعه‌ای پیش می‌رود که در آن بهره‌برداری از انرژی در کنار انرژی‌های برتر انجام می‌پذیرد، باید مفاهیم جدیدی نیز در حوزه امنیت انرژی ایجاد گردد که تمهیداتی برای مسائل گوناگون مرتبط با توسعه فناوری‌های نوین، در آن اندیشیده شده‌باشد .واضح است که دو بُعد «محیط‌زیست» و «تکنولوژی» در کنار ابعاد «قابلیت دستیابی داشتن» و «قابل قبول بودن»، تاکید مضاعفی بر لزوم استفاده از منابع تجدیدپذیر در کنار منابع پایان‌پذیر است.

۳. ادبیات پژوهش

در مورد ایجاد ارتباط یکپارچه و تحلیل سیستمی ترکیب منابع تجدیدپذیر و فسیلی، پژوهش‌های گوناگونی به ویژه در سال‌های اخیر در کشورهای مختلف انجام شده است

1. Von Hippel

که به جهت رعایت اختصار، ابتدا مهمترین مطالعات داخلی مرتبط و سپس مواردی از جدیدترین و جامع‌ترین مطالعات خارجی ارائه شده‌اند:

در پژوهش امامی میبدی (۱۳۷۸) قیمت گذاری برق بر مبنای ساختار صنعت برق کشور انجام شده است. نتایج این پژوهش در خصوص ماهیت انحصار طبیعی صنعت برق نشان می‌دهد که در ایران، هنوز صرفه‌جویی‌های ناشی از مقیاس و بازده صعودی به مقیاس ملاحظه می‌گردد و مسئله رقابت نمی‌تواند کارساز باشد. از این رو در شرایط انحصاری می‌توان برق را با هزینه کمتری عرضه نمود و دولت می‌تواند خود تصدی این صنعت انحصاری را ادامه دهد یا اینکه به انحصارگر بخش خصوصی واگذار کند.

پژویان و محمدی (۱۳۷۹) الگوی قیمت گذاری بهینه رمزی برای صنعت برق ایران را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این پژوهش قیمت‌های رمزی خدمات برق، برای کاربری های مختلف خانگی، صنعتی، کشاورزی، تجاری و عمومی محاسبه شده و به وسیله محاسبه تغییرات رفاه، میزان افزایش رفاه ناشی از حرکت از قیمت های فعلی به قیمت های رمزی، محاسبه گردیده است.

خوش‌اخلاق و همکاران (۱۳۸۴)، به ارزیابی اقتصادی استفاده از انرژی خورشیدی در مقایسه با نیروگاه دیزلی پرداخته‌اند. نتایج به دست آمده از ارزیابی اقتصادی سناریوهای مختلف نشان می‌دهد که هزینه واحد انرژی سیستم فتوولتاییک با ۹۶۰ ریال/کیلووات ساعت از هزینه واحد انرژی در گزینه های دیگر کمتر است.

شادی‌طلب و نایه‌در (۱۳۸۸)، واکاوی عوامل مؤثر بر پذیرش آبگرمکن های خورشیدی خانگی در نواحی روستایی (مطالعه موردی شهرستان بردسکن) پرداخته‌اند. بر اساس یافته های 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 آبگرمکن های خورشیدی خانگی پذیرش آن را توسط روستاییان تبیین می کند.

روحانی (۱۳۸۸) به بررسی و مقایسه دو روش قیمت رقابتی بازار یا قیمت تسویه‌کننده بازار[1] (MCP) و روش پرداخت براساس پیشنهاد[2](PAB) و کاربرد آنها در بازار برق ایران پرداخته است و با توجه به مزایا و معایب هر دو روش و در نظر گرفتن شرایط گذشته و حال بازار برق ایران، مناسبترین روش قیمت‌گذاری برای آینده‌ی بازار ایران پیشنهاد شده است.

رحیمی و همکاران (۱۳۸۷)، با هدف فرهنگ سازی و آموزش به بررسی فنی استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در یک واحد نمونه ساختمانی در شهر سمنان پرداخته‌اند. در این مقاله ضمن بررسی و مطالعه پتانسیل انواع انرژی‌های تجدیدپذیر در سمنان، اقدام به بررسی فنی استفاده از انرژیهای تجدیدپذیر و بهینه سازی مصرف انرژی در یک واحد نمونه ساختمانی جهت فرهنگ سازی و آموزش عموم مردم شده است.

معینی و همکاران (۱۳۸۹)، 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 و با محاسبه طول روز و تابش فراجو با کمک نرم افزار آماری SPSS رابطه رگرسیونی تابش کل بر حسب ساعات آفتابی برای مناطق اقلیمی ایران برازش شده است.

منظور و رضایی (۱۳۹۰) قیمت سایه ای انرژی الکتریکی را در بازار برق ایران محاسبه نموده‌اند و قیمت سایه ای در بازه زمانی یک ساله ۱۳۸۶برای هر کیلووات ساعت ۳۷۱/۲ ریال محاسبه شده است. به علاوه بر اساس یافته‌های این پژوهش، هزینه نهایی تامین برق در زمستان، به علت مصرف گازوئیل و سوخت های مایع به جای سوخت گاز طبیعی به همراه استفاده نکردن از نیروگاه های برق آبی افزایش می یابد.

عبدی و همکاران (۱۳۹۰)، 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 نرم افزار comfar، امکان سنجی فنی و اقتصادی احداث یک نیروگاه بادی ده مگاواتی بررسی شده است.

---

1. market clearing prices
2. pay-as-bid

کتابداری و احمدی (۱۳۹۰)، به کمک مدلسازی عددی به امکان سنجی جذب انرژی از امواج دریا در سواحل جنوبی ایران پرداخته‌اند. نتایج مدل سازی این پژوهش نشان داده است که اگرارتفاع امواج ورودی به سیستم ۱۰٪ افزایش یابد توان دستگاه ۴۰٪ افزایش می‌یابد.

امامی میبدی و حیدری (۱۳۹۱) به بررسی تبدیل نیروگاه های گازی ساده به چرخه ترکیبی و تاثیر آن بر میزان مصرف سوخت‌های فسیلی پرداخته‌اند. این مطالعه به مقایسه دو مولد فوق پرداخته و یافته های تحقیق نشان می‌دهد، در سطح قیمت های 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.

در پژوهش مستوفی و همکاران (۱۳۹۱)، هدف اصلی پژوهش کمینه سازی هزینه نهایی نیروگاه ترکیبی مستقل از شبکه برق است. این نیروگاه از ترکیب واحدهای برق آبی کوچک، سیستم فتوولتائیک، توربین های بادی بر پایه ذخیره سازی هیدروژن و استفاده از هیدروژن در پیل سوختی به منظور تامین برق مورد نیاز ایستگاه پمپاژ آب سد سبلان به مزارع واقع در اطراف این سد تشکیل شده است و برای یافتن ظرفیت سیستم ترکیبی پیشنهادی از الگوریتم یکپارچه زنبور عسل استفاده شده است.

نامور بهرغانی و همکاران (۱۳۹۱)، با هدف کاهش وابستگی ریزشبکه به سوخت فسیلی، اندازه بهینه منابع در یک ریزشبکه متعامل با بازار برق برای تامین بار الکتریکی و حرارتی را تعیین نموده‌اند و برای حل این مسئله، از الگوریتم بهبودیافته انبوه ذرات[1] (PSO) استفاده شده است.

اسلاملوئیان و استادزاد (۱۳۹۱)، الگویی برای تعیین سهم بهینه انرژی های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر در مسیر رشد پایدار طراحی نموده و این سهم ها را برای اقتصاد ایران محاسبه نموده‌اند. براساس محاسبات این پژوهش بر مبنای داده‌های سال ۱۳۸۹، سهم بهینه انرژی تجدیدپذیر بایستی ۰/۸ درصد از کل انرژی باشد.

1. Particle Swarm Optimizatoion

شریفی و همکاران (۱۳۹۲)، به منظور حداکثر کردن رفاه اجتماعی، یک مدل کنترل بهینه طراحی و با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک، مسیرهای بهینه جایگزینیِ انرژی خورشید و باد به جای سوختهای فسیلی در طی زمان را در اقتصاد کلان و سیستم انرژی ایران ترسیم نموده‌اند.

مارتین و همکاران[1] (۲۰۱۰) به بررسی تاثیر 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 اکتریسیته تبدیل می‌شود.

اوسترگارد[2] (۲۰۱۰) استراتژی‌های مختلف تولید همزمان نیروگاه‌های ترکیبی برق و گرمایش را با تاکید 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.

کونولی و همکاران[3] (۲۰۱۲) 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.

ژای و همکاران[4] (۲۰۱۲) به بررسی پتانسیل کاهش انتشار آلاینده‌های هوا در اثر افزایش ۱۰ درصد تولید برق خورشیدی در ده ایالت آمریکا پرداخته‌اند. این میزان افزایش در استفاده از انرژی خورشیدی، به کاهش ۲/۴ گرمی ناکس[1] در هر وات نیز منجر شده است.

---

1. Martín et al.
2. Østergaard
3. Connolly et al
4. Zhai et al

کابالرو و همکاران[۲] (۲۰۱۳) با شبیه‌سازی فرآیند تولید برق در شهر هانگاروا[۳] در ایسترایسلند شیلی[۴]، تاثیر ایجاد یک سیستم انرژی هیبردی[۵] (HES) را با در نظر گرفتن ورود پانل‌های خورشیدی و توربین‌های بادی مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از سیستم‌های انرژی هیبریدی، نه تنها به افزایش طول عمر سیستم تولید منجر می‌شود، بلکه از آثار زیست‌محیطی قابل‌توجهی نیز برخوردار است.

پرکویچ و همکاران[۶] (۲۰۱۳) به امکان‌سنجی تولید برق در نیروگاه‌های بادی و بررسی اثر مانگوس[۷] 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 مبدا تولید و مقصد مصرف انرژی اکتریکی ایجاد شده در منابع بادی، امکان و قابلیت عملیاتی شدن تاسیس نیروگاه‌ها، با ظرفیت‌های مختلف، ارزیابی شده‌اند.

پرزا و اوسترگارد[۸] (۲۰۱۳) به ارزیابی آثار قیمتی، هزینه‌ای و زیست‌محیطی استفاده از تهویه مطبوع طبیعی به جای سیستم تهویه مطبوع الکتریکی در سیستم انرژی بخش خانگی مکزیک پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهند که این جایگزینی منجر به کاهش ۲/۸۹ میلیون تنی انتشار کربن دی‌اکسید در طول دوره تولید یکساله خواهد شد که کاهشی معادل ۲/۱۷ درصدی انتشار کربن‌دی‌اکسید در سیستم انرژی مکزیک را به دنبال خواهد داشت.

لیو و همکاران[۹] (۲۰۱۳) به بررسی تاثیر تولید یکپارچه نیروگاه‌های بادی تولید برق بزرگ‌مقیاس و وسایل حمل‌ونقل الکتریکی در سیستم برق بخش مغولستانِ چین در سال ۲۰۰۹ می‌پردازند. در سال مبنای شبیه‌سازی سیستم برق، ۶/۵ درصد برق تولیدی در این

---

1. NOx
2. Caballero et al
3. Hanga Roa
4. Easter Island, Chile
5. HybridEnergy System
6. Perkovic et al
7. Magnus effect
8. Perez a and Østergaard
9. Liu et al

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 ۸ درصد برسد.

هینینگ و پالزر[1] (۲۰۱۴) به شبیه‌سازی جامع بخش گرمایش و الکتریسته آلمان در فرآیند آینده‌پژوهی بخش انرژی این کشور پرداخته‌اند. 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 تامین نمود به نحوی علاوه بر برآورده شدن قیود سیستم تولید، ۱۰۰ درصد تقاضای بخش ساختمانی تامین خواهد شد.

٤. مدل پژوهش

در این پژوهش از روش شبیه‌سازی مبتنی بر برنامه‌ریزی آنالیزی با رویکرد توأم توصیفی-تجویزی[2] استفاده شده است که در چارچوب مدل‌های پایین - بالا قرار می‌گیرد. این مدل شبیه‌سازی‌شده با استفاده از عملکرد سیستم واقعی، به ایجاد ساختگی تاریخچه سیستم و بررسی آن به منظور دستیابی به نتایجی در مورد ویژگی‌های عملکرد واقعی آن می پردازد[3]. در ابتدا برنامه‌ریزی آنالیزی و جایگاه آن در مدل‌سازی انرژی تبیین شده است و سپس اجزای اصلی برنامه‌ریزی آنالیزی مورد استفاده در این پژوهش معرفی شده است.

٤-١. برنامه‌ریزی آنالیزی و جایگاه آن در مدل‌سازی انرژی

برنامه‌ریزی آنالیزی یکی از روش‌های نوین بهینه‌یابی عددی است که مبانی آن اولین بار توسط زلینکا[4] (۲۰۰۱ و ۲۰۰۲ a,b) ارائه شد. در برنامه‌ریزی آنالیزی، مجموعه‌ای از

1. Henning and Palzer
2. descriptive-prescriptive

۳. شبیه سازی اصولا به شکل مجموعه‌ای از فرض‌های مربوط به عملکرد سیستم در چارچوب رابطه‌های ریاضی و منطقی می‌باشد. در مدل‌های شبیه‌سازی، بر اساس وجود هوشمندی و عقلانیت در سیستم، یک چارچوب توصیفی-منطقی طراحی می‌شود که به دنبال ایجاد یک نمونه عملیاتی مشابه با سیستم واقعی است. استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی زمانی ضروری خواهد بود که اجرای سیاست‌های جدید در سیستم واقعی، پرخطر و پرهزینه باشد و معمولا از مدل‌های شبیه‌سازی برای ارزیابی آثار احتمال سناریوهای جدید استفاده می‌شود (ونبک۳، ۱۹۹۹).

4. Zelinka

توابع، عملگرها و بستارها تعریف می‌شوند و امکان تغییرپذیری یا ثابت بودن در طول زمان برای تمامی متغیرها وجود دارد. در مجموعه توابع برنامه‌ریزی آنالیزی می‌توان از گزاره‌های شرطی، گزاره‌های عطفی، گزاره‌های ریاضی و گزاره‌های توزیعی-احتمالی استفاده نمود که بیشترین دامنه تحلیل‌های توصیفی-تجویزی را در خود جای داده است. 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 تغیرپذیرِ مجموعه مسائل، از اصطلاح مجموعه تابعیِ عمومی[1] برای نام‌گذاری آن استفاده می‌شود. ساختار مجموعه تابعی عمومی به صورت لانه‌ای تعریف می‌شود؛ به عبارت دیگر مجموعه تابعی عمومی با استفاده از مجموعه‌ای که هر یک دربردارنده توابع و عناصر متفاوتی هستند، ساخته می‌شود. محتوای مجموعه تابعی عمومی تنها به مجموعه مورد مطالعه بستگی دارد و باید بر اساس ویژگی‌های هر یک از سیستم‌های مورد مطالعه، به طور مستقل و توسط پژوهشگر طراحی شود. بستارهای و توابع مختلفی در این مجموعه‌ها تعریف می‌شوند. در برنامه‌ریزی آنالیزی پاسخ‌هایی مناسب شناخته خواهند شد که نگاشت[2] 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 زیر مجموعه نیز، کوچکتر یا مساوی تعداد اجزای زیرمجموعه است. به دست آوردن نگاشت اعضای مجموعه تابعی از یک فرآیندی دو بخشی تبعیت می‌کند: بخش اول ارزیابی مجموعه گسسته[3] (DSH) و بخش دوم طراحی فرآیندهای تضمین‌کننده است. فرآیند ارزیابی مجموعه گسسته توسط زلینکا (۲۰۰۴) و زلینکا و همکاران (۲۰۰۵) در ایجاد یک شاخص گسسته مورد استفاده قرار گرفت که در یک فرآیند تکاملی همانند ارزیابی افراد جایگزین در ساختار لانه‌ای[4] به خوبی می‌تواند راه‌حل مناسب را ارائه کند. از این رو می‌توان

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

برنامه‌ریزی آنالیزی را در مورد مسائل دقیقِ ریاضی، شبیه‌سازی‌های سیستمی و برنامه‌ریزی‌های انرژی بخشی مورد استفاده قرار داد.

اما در مورد مدل‌های پایین - بالا باید گفت که این مدل‌های بر اساس شبیه‌سازی و مدل‌سازی تکنولوژی جدید و تغییرات الگوی تولید بنا نهاده شده-اند. این دسته از مدل‌ها، جزئیات تکنولوژیکی استفاده شده برای تولید و مصرف انرژی را به صورت توأمان مورد بررسی قرار می‌دهند. این گونه مدل‌ها به منظور شبیه‌سازی عرضه و تقاضای انرژی و تجزیه وتحلیل آثار زیست‌محیطی بر گرایشات تولید و مصرف انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند (هارکید[1]، ۱۹۹۶). مدل‌های پایین - بالا، در دو جهت توسعه یافته‌اند: اولین جهت اینکه، تکنولوژی-های کاراتر و یک ترکیب متمرکز از تولید، تبدیل و عرضه انرژی را مورد تجزیه وتحلیل قرار می‌دهد. مارکال[2] که عمدتا توسط آژانس بین‌المللی انرژی[3] توسعه یافته و ایفوم[4] که در اتحادیه اروپا گسترش یافته است، نمایندگانی از این مسیر خاص هستند. مسیر دوم در این جهت توسعه یافته تا به بررسی این مسئله بپردازد که چگونه تغییرات در سبک زندگی[5] هر بخش بر تقاضای انرژی در روش پایین - بالا اثرگذار خواهد بود. این بررسی به وسیله تمرکز بر تقاضا و مصرف انرژی انجام می‌شود. این مدلها اغلب تحت عنوان «مدل‌های مصرف نهایی[6]»یاد می‌شوند. در میان این نوع از مدلها، MEDEE در فرانسه و LEAP از موسسه زیست محیطی استکهلم[7]، بیش از سایرین مورد توجه قرار گرفته‌اند. در جدول ۱ مقایسه مختصری از مدل‌های پایین- بالا و بالا- پایین ارائه شده است (وی و همکاران[8]، ۲۰۰۶).

1. Hourcade et al
2. MARKAL
3. International Energy Agency
4. EFOM
5. lifestyles
6. End Use Models
7. Stockholm Environmental Institute
8. Wei et al.

جدول ۱. مقایسه مدل‌های پایین- بالا و بالا- پایین

نوع مدل	روش‌ها	کارکردها
پایین- بالا	تئوری برنامه ریزی خطی و غیر خطی، برنامه‌ریزی چندمنظوره[1]، روش پویای سیستمی[2]، روش داده ستانده، تحلیل ساختار جامع، شبیه‌سازی سیستم انرژی، بهینه‌یابی عددی[3]	استراتژی‌های تکنولوژی انرژی و تاثیرات آن برمحیط زیست، شبیه‌سازی عرضه و تقاضای انرژی و تجزیه و تحلیل سیاستگزاری های انرژی
بالا- پایین	اقتصادسنجی، تئوری تعادل عمومی و پیش‌بینی بر اساس داده‌های کلان-بخشی تجمیعی[4]	تجزیه و تحلیل انرژی در بعد کلان و برنامه‌ریزی سیاستگزاری اقتصادی

منبع: وی و همکاران، ۲۰۰۶

٤-۲. معرفی اجزای اصلی برنامه‌ریزی آنالیزی سیستم تولید قدرت

اولین بار ویکری[5] (۱۹۷۱) واژه «قیمت‌گذاری پاسخ‌دار[6]» را مطرح کرد که معادل تقریبی همان چیزی است که امروزه به قیمت‌گذاری لحظه‌ای-ساعتی معروف است. طبق تعریف شوپی و همکاران[7] (۱۹۸۸) «قیمت لحظه‌ای-ساعتیِ تولید» (بر حسب دلار بر کیلووات ساعت) عبارت است از هزینه‌های بهره‌برداری و سرمایه‌گذاری در بخش تولید؛ بر این اساس قیمت‌گذاری لحظه‌ای-ساعتی تولید، یک پدیده طبیعی نتیجه شده از کاربرد روش‌های موجود بهره‌برداری، طراحی و مدیریت بار سیستم قدرت و نظریه قیمت‌گذاری بر اساس هزینه نهایی در علم اقتصاد است. با این حال در این پژوهش هزینه‌های زیست‌محیطی و هزینه‌های تاسیسات، عملیات و نگهداشت نیز در قیمت‌گذاری لحظه‌ای-ساعتیِ تولید برق در سیستم تولید هیبرید فسیلی-تجدیدپذیر وارد شده‌اند. برای محاسبه

1. Multi-Objective
2. system dynamic method
3. numerical optimization
4. Aggregated Data
5. Vickrey
6. Responsive Pricing
7. Schweppe et al

قیمت لحظه‌ای-ساعتی، لازم است که در برنامه‌ریزی آنالیزی سیستم‌های تولید قدرت، نیازمند اجرای شبیه‌سازی شوند که در ادامه به ۵ ماژول[1] از مهمترین ماژول‌هایی که برای شبیه‌سازی سیستم تولید پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفته‌اند، اشاره شده است (لوند[2]، ۲۰۱۴: ۷۰-۹۲ با تلخیص[3]):

۱- **طراحی سیستم تولید یک‌پارچه تجدیدپذیر-فسیلی:** سیستم انرژی یک مجموعه هوشمند به هم پیوسته است و چالش ورود برق تجدیدپذیر نوسانی[4] به شبکه سراسری و منطقه‌ای انرژی الکتریکی را باید در چارچوب یک شبکه هوشمند[5] انرژی برطرف نمود و برنامه‌ریزی تولید برق نوسانی از منابع تجدیدپذیر به صورت یه مسئله مستقل از شبکه، نمی‌تواند کمکی به طراحی یک سیستم انرژی[6] پایدار کند.

۲- **آنالیز تکنولوژیکی:** در این بخش سیستم‌های انرژی بزرگ و پیچیده، با در نظر گرفتن استراتژی‌های گوناگون تنظیم تکنولوژیکی سیستم طراحی و آنالیز می‌شوند. تقاضا، تولید، ظرفیت و توان در کنار کارایی و منابع انرژی به عنوان داده‌های اولیه وارد سیستم می‌شوند و در نهایت آنالیز تراز انرژی، مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌ها خروجی سیستم خواهند بود.

۳- **قید حداکثر و حداقل توان تولید نیروگاه‌ها:** هر چند میزان تولید هر یک نیروگاه‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر را می‌توان بر اساس داده‌های موجود سیستم تولید برنامه‌ریزی نمود، ولی کاهش تولید در نیروگاه‌های فسیلی گازی، بخاری و سیکل ترکیبی، تنها تا محدوده مشخصی از حداکثر توان قابل اجراست. به همین دلیل به طور معمول کاهش بیش از ۲۰ درصد ظرفیت توان در نیروگاه‌های فسیلی، مشکلاتی از قبیل تحمل هزینه خاموشی احتمالی، زمان‌بر بودن فرآیند سرد شدن نیروگاه، هزینه‌بر بودن راه-

---

1. Module
2. Lund

۳. با توجه به محدودیت‌های تدوین یک مقاله علمی-پژوهشی، امکان توضیح مفصل و دقیق تمامی جزئیات مدل پژوهش و الگوی شبیه‌سازی وجود ندارد. از این رو در این بخش صرفا نکات اصلی و چارچوب‌های مهم معرفی شده است. برای اطلاعات بیشتر ر.ک.:

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

4. fluctuating renewable power
5. smart grids
6. sustainable energy system

اندازی و شروع به کار مجدد نیروگاه‌ها را به دنبال دارد. بنابراین تعیین حداقل توان مورد استفاده در نیروگاه‌های غیرتجدیدپذیر، امری ضروری است و حداقل توان باید به عنوان یک اساسی قید سیستم بخش تولید غیرتجدیدپذیر، در برنامه‌ریزی آنالیزی وارد شود.

٤-قید پایداری شبکه: برای محاسبه میزان پایداری شبکه[۱]، ابتدا فرض می‌شود که شبکه با تقاضایی مواجه است که سیستم تولید باید پایداری شبکه را برای این میزان از تقاضا (که در حقیقت تقاضای کل سیستم تولید (شامل تلفات تولید) است) تامین کند[۲]. متناظر با این میزان تقاضای از پیش‌تعیین‌شده[۳]، میزان تقاضای مشخصی با عنوان تقاضای پایدارساز شبکه[۴] خواهیم داشت که D_{Stab} نامیده می‌شود. در مقابل کل انرژی الکتریکی فراهم‌شده در سیستم تولید نیز E_{Total} نامیده می‌شود که در حقیقت عرضه کل سیستم تولید داخلی را نشان می‌دهد. در کنار این تقاضای پایدارساز و عرضه کل انرژی اکتریکی، باید درصد معینی از تولید کل انرژی الکتریکی شبکه ($Stab_{total}$) از واحدهای تولیدی پایدارساز شبکه تامین شود که در اکثر مطالعات ۳۰ درصد تعیین شده است. در این صورت رابطه (۱) کل انرژی الکتریکی موردنیاز برای تضمین پایداری شبکه را نشان می‌دهد(لوند، ۲۰۱۴: ۸۷):

$$D_{Stab} = E_{Total} * Stab_{total} \qquad (۱)$$

---

۱. برای اطلاعات بیشتر ر.ک:

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

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 تامین چنین قابلیتی در سیستم لازم است که سیستم به نحوی طراحی شود که بتواند فورا به اختلالات احتمالی واکنش نشان دهد و پس از برطرف شدن این اختلالات، مجددا به فرآیند نرمال بازگردد (AITF، ۲۰۱۱: ۲۸). در حقیقت سیستم هوای فشرده را می‌توان برای افزایش کیفیت توان، پایداری شبکه و ارتقاء قابلیت اطمینان مورد استفاده قرار داد. کیفیت توان به وجود نوسانات ولتاژ، قطع موقتی برق و بهسازی شبکه مربوط می‌شود که سیستم ذخیره هوای فشرده را می‌توان به عنوان یک واحد توان برای کاهش میزان نوسانات و اختلالات شبکه در محدوده یک استاندارد مورد استفاده قرار داد.

3. Pre-determined demand
4. Grid stabilization demand

میزان عرضه انرژی الکتریکی پایدارساز شبکه، در هر یک از واحدهای نیروگاهی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر قابل تعریف است که مجموع این انرژی الکتریکی پایدارساز در کل شبکه را می‌توان با رابطه (۲) نمایش داد (همان):

$$E_{Stab} = \left(E_{gas} * Stab_{gas}\right) + \left(E_{ste} * Stab_{ste}\right) + \left(E_{chp} * Stab_{chp}\right) + \left(E_{RES} * Stab_{RES}\right) \quad (۲)$$

در این رابطه E_{gas} و $Stab_{gas}$ به ترتیب کل انرژی الکتریکی تولیدی در نیروگاه‌های گازی و درصدی از تولید واحدهای نیروگاهی گازی است که برای پایداری شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرند، را نشان می‌دهند. سه پرانتز بعدی در رابطه (۲) نیز کل انرژی و درصد پایدارساز واحدهای بخاری، سیکل‌ترکیبی و تجدپذیر در شبکه تولید را نشان می‌دهند. بر اساس روابط (۱) و (۲) می‌توان رابطه شاخص پایداری شبکه را با رابطه اندازه‌گیری نمود(همان: ۸۸):

$$GridStab = \left[\left(E_{gas} * Stab_{gas}\right) + \left(E_{ste} * Stab_{ste}\right) + \left(E_{chp} * Stab_{chp}\right) + \left(E_{RES} * Stab_{RES}\right)\right] / \left[E_{Total} * Stab_{total}\right] \quad (۳)$$

بدیهی است که بر اساس رابطه (۳) می‌توان درصد شاخص پایداری شبکه را با رابطه (۴) نمایش داد و با توجه به فراوانی داده‌ها به صورت لحظه‌ای-ساعتی محاسبه نمود (همان):

$$GridStab_t = \frac{E_{Stab}}{D_{Stab}} * 100 \quad (۴)$$

تعیین قیمت بازار: قیمت بازار در نقطه تراز عرضه و تقاضای برق تعیین می‌شود. به عبارت‌دیگر پس از اینکه تولید دقیق هر یک از واحدهای تولیدی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر در هر ساعت تعیین شد، قیمت بازاری بر اساس هزینه نهایی تولید هر یک از واحدهایی که در هر لحظه-ساعت برای پاسخ‌گویی به تقاضای بازار مورد استفاده قرار می‌گیرند، تعیین می‌شود که این قیمت در شرایطی معتبر خواهد بود که میزان تولید و تقاضای انرژی الکتریکی با هم برابر باشند و با در نظر گرفتن حجم بهینه صادراتی، هیچ مازادی در شبکه تولید باقی نماند.

در این پژوهش برای برنامه‌ریزی آنالیزی سیستم تولید برق - که بر اساس الگوی لوند (۲۰۱۴) طراحی شده است- ابتدا تقاضای لحظه‌ای-ساعتی برق منطقه‌ای خراسان که به طور دقیق توسط دفتر بازار برق و دفتر اطلاعات و آمار شرکت برق منطقه‌ای خراسان محاسبه شده

است به صورت داده‌شده[1] و مفروض به سیستم تولید معرفی می‌شود. این تقاضا شامل تلفات انتقال و فوق توزیع[2]، خالص صادرات برق منطقه‌ای خراسان به شرکت‌های مجاور و کشورهای همسایه در سال پایه ۱۳۹۱ نیز می‌شود[3]. بر اساس اطلاعات سال پایه ۱۳۹۱، چهار پست انتقال بین‌منطقه‌ای و دو پست انتقال بین‌المللی 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 مگاولت آمپر را در اختیار پست‌های انتقال قرار می‌دهد. قیود انتقال برای محاسبه مازاد بحرانی تولید برق ضروری هستند و اساسا در برنامه-ریزی آنالیزی ماژول مبادلات، مهم‌ترین قید سیستم حداکثر ظرفیت تعریف‌شده برای خطوط انتقال است. در حقیقت لازم است برای مازاد بحرانی تولید انرژی الکتریکی[4] - که عبارت است از میزان انرژی الکتریکی مازاد تولیدشده فراتر از ظرفیت خطوط انتقال - نیز برنامه‌ریزی لازم صورت گیرد. در برنامه‌ریزی آنالیزی یک شبکه هوشمند، نباید به شبکه یک‌پارچه تولید این مجوز داده شود که تولیدی فراتر از مجموع تقاضای داخلی و حداکثر ظرفیت خطوط انتقال برق را در سیستم تولید، عرضه نماید. به همین دلیل به هنگام بروز مازاد بحرانی تولید انرژی الکتریکی، لازم است که سیستم تولید تصحیح شود. راه‌کار عمومی مقابله با این مازاد بحرانی، کاهش تولید در خطوط تولید تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر است، به نحوی که در نهایت کاهش انفرادی یا ترکیبی تولید خطوط تولید، منجر به تراز میان عرضه و تقاضای کل (داخلی و صادراتی) گردد.

پس از اینکه شرایط داده‌شده تقاضا و محدودیت‌های انتقال برای صادرات و واردات برق معین شد، بر اساس الگوی برنامه‌ریزی آنالیز لوند (۲۰۱۴)، نیروگاه‌های در دسترس،

---

1. given

۲ . در سال پایه ۱۳۹۱، میزان تلفات انتقال و فوق توزیع، ۳۱۲ گیگاوات ساعت بوده است.

۳. 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 می-شود. از جنوب با استان‌های سیستان و کرمان و از غرب با استان‌های یزد، سمنان و گلستان مجاور است.

4. Critical Excess Electricity Production (CEEP)

بر اساس اولویت کمترین هزینه نهایی کوتاه‌مدت برای پوشش تقاضای لحظه‌ای-ساعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند ولی قیمت در هر لحظه-ساعت بر اساس هزینه نهایی بلندمدت نیروگاهی که برای پوشش تقاضای هر لحظه-ساعت مورد استفاده قرار می‌گیرد، تعیین خواهد شد. با توجه به محاسبه دقیق هزینه تولید نیروگاه‌های مورد استفاده در شبکه و سایر نیروگاه‌های آماده برای ورود به شبکه، در هر لحظه-ساعت از سال پایه ۱۳۹۱، توسط دفتر بازار برق و دفتر فنی نظارت بر تولیدِ معاونت بهره‌برداری شرکت برق منطقه‌ای خراسان، می‌توان ترتیب اولویت ورود نیروگاه‌ها به بازار برای پوشش تقاضای لحظه‌ای-ساعتی را مشخص نمود. برای محاسبه هزینه نهایی کوتاه‌مدت از اقلام هزینه عملیات و نگهداشت، هزینه سوخت و سایر هزینه‌های عملیاتی (مثل حقوق و دستمزد و مواد و مصالح) استفاده می‌شود که رئوس این اقلام به تفکیک انواع نیروگاه‌ها در جدول ۷ و

جدول ۸ گزارش شده است. برای محاسبه هزینه نهایی بلندمدت نیز از اقلام هزینه سرمایه‌گذاری شامل اقلامی همچون هزینه تاسیس و راه‌اندازی، هزینه تعمیرات اساسی و هزینه بهینه‌سازی یا استهلاک استفاده می‌شود که این اقلام به تفکیک انواع نیروگاه‌ها در جدول ۷ و

جدول ۸ گزارش شده است. البته هزینه نهایی کوتاه‌مدت، با ورود هزینه مالیات آلاینده زیست‌محیطی به محاسبات هزینه تولید، تعدیل می‌شود و به طور مستقیم در هزینه نهایی کوتاه‌مدت نیروگاه‌های فسیلی تاثیر خواهد داشت. محاسبه هزینه‌های عملیاتی (ثابت و متغیر) و هزینه سرمایه‌گذاری جهت تعیین دقیق هزینه نهایی کوتاه‌مدت و بلندمدت، با استفاده از ماژول‌های نرم‌افزاری مدل‌های پیشرفته EnergyPLAN 11.4 و energyPRO 6.3 انجام می‌شود. در این ماژول‌های نرم‌افزاری، هزینه عملیاتی ثابت و متغیر به طور دقیق و لحظه‌ای-ساعتی برای تمامی نیروگاه‌ها و الگوهای تولیدی، با استفاده از داده‌های دفتر بازار برق و دفتر فنی نظارت بر تولیدِ معاونت بهره‌برداری شرکت برق منطقه‌ای خراسان به ماژول مربوطه معرفی می‌شود و در حقیقت بدون اینکه برآورد یا تقریبی از هزینه نهایی در نظر گرفته شود، در چارچوب یک الگوی داه-ستانده، هزینه نهایی کالیبره‌شده در اختیار ماژول نرم‌افزاری قرار می‌گیرد. در مقابل بر اساس طول عمر مفید هر نیروگاه و هزینه سرمایه‌گذاری و تاسیس و راه‌اندازی هر نیروگاه در طول دوره تولید و بهره‌برداری، میزان هزینه نهایی بلندمدت توزیع‌شده در طول دوره عمر مفید توسط نرم‌افزار مشخص خواهد شد که این هزینه متناظر با هزینه سرمایه‌گذاری مربوط به هر لحظه-ساعت تولید برق در سیستم تولید خواهد بود. از سوی دیگر تامین پایداری شبکه که قید اساسی سیستم تولید و ترکیب نیروگاه‌های تجدیدپذیر و فسیلی در مدار قرار گرفته محسوب می‌شود، معیار اصلی برنامه‌ریز آنالیزی، در تعیین ترکیب بهینه هیبرید خواهد بود. سرانجام با تعیین نیروگاه‌هایی که باید در مدار وارد شوند، بر اساس هزینه نهایی بلندمدت تولید برق در سیستم تولید، قیمت لحظه‌ای-ساعتی سیستم تولید محاسبه خواهد شد.

۵. داده‌های پژوهش

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 11.4[۱] و energyPRO 6.3، در کنار مدل WASP-IV[۲] طراحی شده‌اند[۳]. 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[۴] (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 سیستم شبیه‌سازی وارد شده‌اند. داده‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی سیستم در سناریوی اولیه سال پایه، در پیوست پژوهش(جدول ۵ تا

۱. این نسخه جدید از مدل EnergyPLAN در تاریخ ۲٤ می سال ۲۰۱٤ منتشر و در دسترس کاربران قرار گرفته است.

2 .Wien Automatic System Planning Package

۳. 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.

4 .OSEMOSYS: the Open Source Energy Modeling System

جدول ۸) گزارش شده‌اند. میزان تقاضای کل برق منطقه‌ای خراسان در سال ۱۳۹۱، رقمی معادل ۲۱۷۴۷ گیگاوات ساعت بوده است که این رقم شامل ۲۶۸۰ گیگاوات ساعت صادرات خالص به سایر مناطق و کشورهای همسایه (تقاضای وارداتی خارج از منطقه) نیز می‌شود. همچنین تقاضای کل برق منطقه‌ای خراسان در سال ۱۳۹۱، تلفات انتقال و فوق توزیعی معادل ۳۱۲ گیگاوات ساعت به همراه داشته است. 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 تولیدِ 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 برنامه ریزی تولید شرکت توانیر هستند[۱].

نرخ تنزیل سالانه سرمایه نیز بر اساس مطالعه طاهری فرد و شهاب (۱۳۸۹) و مطالعه رستمی و همکاران (۱۳۹۲) در مورد پروژه‌های نیروگاهی وزارت نیرو و همچنین بر اساس مطالعات امکان‌سنجی دفتر بودجه معاونت برنامه‌ریزی و تحقیقات شرکت برق منطقه‌ای خراسان، به طور میانگین، ۱۰ درصد 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 برنامه ریزی و آمار شهرداری مشهد استفاده شده است که بر اساس جداول آماری این دفاتر، هزینه سرمایه‌گذاری برق خورشیدی، بادی، زیست‌توده، برق‌آبی و زمین‌گرمایی در هر کیلووات توان به ترتیب ۱۰۴/۵ ، ۳۹/۷۵ ، ۱۵/۰۹ ، ۷۲/۷۰ و ۵۴/۴۵ میلیون

---

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

ریال و هزینه ثابت و متغیر عملیات و نگهداشت برق خورشیدی، بادی، زیست‌توده، برق‌آبی و زمین‌گرمایی در هر مگاوات ساعت به ترتیب ۶۳۶، ۱۵۶۸۹۷، ۵۱۰۰۳، ۲۰۰ و ۵۶۹۲۹۶ 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[1] (۲۰۱۱)، سطح بهینه 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 (۱۳۹۱)، به ترتیب ۲۴۷۵۲ و ۳۲۴۳۶ ریال است.

بر اساس مطالعه و پتانسیل سنجی شرکت برق منطقه‌ای خراسان (۱۳۹۱) پتانسیل برق خورشیدی و بادی به ترتیب ۴۰ هزار مگاوات و ۷ هزار مگاوات است. همچنین بر اساس مطالعات مکان‌یابی و پتانسیل‌سنجی تاسیس نیروگاه‌های زیست‌توده که توسط سازمان انرژی-های نو ایران (سانا) (۱۳۸۶) و اطلاعات معاونت برنامه ریزی و آمار شهرداری مشهد تهیه شده است، چنانچه حداکثر پتانسیل زیست‌توده شهر مشهد (به عنوان بهترین مکان برای تاسیس نیروگاه زیست‌توده و بهره‌برداری از پسماند جامد شهری ورودی به دفنگاه زباله در منطقه خراسان بزرگ)، برای تاسیس نیروگاه زیست‌توده مورد استفاده قرار گیرد، ظرفیتی معادل ۶۱/۳۵ مگاوات وارد سیستم تولید خواهد شد[2]. در مورد انرژی زمین‌گرمایی در خراسان بزرگ نیز، منطقه بیرجند – فردوس از استان خراسان جنوبی (ناحیه‌ای به مساحت ۴۶۶۲۸ کیلومتر مربع) دارای پتانسیل انرژی زمین‌گرمایی است که این انرژی، حداکثر توان ۱۲/۷۹ مگاوات را برای منطقه فراهم می‌کند (یوسفی و نوراللهی، ۱۳۸۵: ۹؛ سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا)، ۱۳۷۷). همچنین بر اساس طرح‌های در دست مطالعه و طرح های مطالعاتی پتانسیل‌سنجی

1. Danish Energy Agency (2011)

۲. چهار نوع نیروگاه زباله سوز 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 برای این پتانسیل در نظر گرفته شده است.

هیدور در منطقه خراسان، پتانسیل ورود ۳۵۴۹ مگاوات توان برق با تکنولوژی برق‌آبی به سیستم تولید برق منطقه‌ای خراسان وجود دارد (ترازنامه انرژی، ۱۳۹۱: ۲۱۹).

٦. نتایج پژوهش

نتایج شبیه‌سازی شرایط اولیه سیستم تولید و سیستم تولید هیبرید فسیلی-تجدیدپذیر در جدول ۲ و جدول .Error! No text of specified style in document۳ گزارش شده است.

جدول ۲. نتایج شبیه‌سازی شرایط اولیه سیستم تولید و سیستم تولید هیبرید فسیلی-تجدیدپذیر

سیستم هیبرید / شاخص	سیستم تولید پایه[۱]	فسیلی- خورشیدی[۲]	فسیلی-بادی[۳]
متوسط قیمت (ریال بر مگاوات ساعت)	۵۸۴،۸۸۵/۲۷	۶،۲۲۵،۱۸۸/۸۸	۹۵۹،۷۳۱/۳۰
انتشار آلاینده زیست‌محیطی (میلیون تن)	۲۳/۱۳	۱۸/۹۱	۲۳/۱۳
تولید بهینه برق تجدیدپذیر (میلیون مگاوات ساعت)	۰/۰۴	۴۶/۵۶	۱۵/۰۱
تولید بهینه برق فسیلی (میلیون مگاوات ساعت)	۳۶/۹۲	۳۰/۱۸	۳۶/۹۲
سهم برق تجدیدپذیر در پوشش تقاضا (درصد)[۴]	۰/۲	۳۶/۳	۱۳/۱
حجم بهینه صادراتی[۵] (میلیون مگاوات ساعت)	۱۶/۳	۵۶/۰۸	۳۱/۲۶
شاخص پایداری شبکه (درصد)[۱]	۱۰۶	۸۶	۹۱

۱. در مدل پایه صرفا ظرفیت فسیلی و ظرفیت عملی ۸ مگاواتی نیروگاه بادی بینالود وارد شده است

۲. در این سناریو، حداکثر پتانسیل تولید برق خورشیدی (با تکنولوژی فتوولتائیک) به مدل پایه اضافه شده است.

۳. در این سناریو، حداکثر پتانسیل تولید برق بادی به مدل پایه اضافه شده است

۴. مابقی تولید برق تجدیدپذیر، به دلیل لزوم برقرار قیود قابلیت اطمینان تولید و پایداری شبکه، وارد شبکه مصرف برق منطقه‌ای نمی‌شوند و با اهداف صادراتی تولید می‌شوند؛ زیرا در صورت بالا رفتن ضریب نفوذ برق نوسان‌پذیر تجدیدپذیر در شبکه قدرت، قابلیت اطمینان تولید و احتمال بروز خاموشی افزایش پیدا می‌کند و قیود قابلیت اطمینان سیستم تولید، اجازه تولیدِ فراتر از محدوده مشخصی که تامین‌کننده پایداری سیستم باشد و به اطمینان سیستم تولید خدشه‌ای وارد نکند، را نخواهد داد.

۵. این حجم بهینه با توجه به برآورده شدن قیود انتقال بین‌منطقه‌ای و بین‌المللی تعیین شده است. به عبارت دیگر با توجه به ضریب بهره‌برداری ۲۰ و ۲۵ درصدی نیروگاه‌های خورشیدی و بادی در محدوده خراسان بزرگ که توسط شرکت برق منطقه‌ای خراسان برآورد شده است، پتانسیل ۷۰۰۰ مگاواتی برق بادی در خراسان بزرگ، تولیدی معادل ۱۵ میلیون مگاوات ساعت و پتانسیل ٤۰۰۰۰ مگاواتی برق خورشیدی در خراسان بزرگ، تولیدی معادل ۷۰ میلیون مگاوات ساعت را در سال فراهم خواهند نمود که صادرات برق مازاد بر نیاز شبکه، کاملا بستگی میزان محدودیت‌های پست‌های انتقال دارد.

منبع: محاسبات تحقیق.

جدول .Error! No text of specified style in document**۳. نتایج شبیه‌سازی شرایط اولیه سیستم تولید و سیستم تولید هیبرید فسیلی-تجدیدپذیر**

سیستم هیبرید / شاخص	فسیلی-زیست‌توده [۲]	فسیلی-زمین‌گرمایی [۳]	فسیلی-برق‌آبی [۴]
متوسط قیمت (ریال بر مگاوات ساعت)	۶۱۷،۵۴۳/۳۰	/۱۹ ۶۲۱،۲۷۱	/۹۰ ۱،۲۹۷،۷۱۳
انتشار آلاینده زیست‌محیطی (میلیون تن)	۲۳/۱۳	۲۳/۱۳	۲۳/۱۳
تولید بهینه برق تجدیدپذیر (میلیون مگاوات ساعت)	۰/۴۲	۰/۰۶	۳/۰۲
تولید بهینه برق فسیلی (میلیون مگاوات ساعت)	۳۶/۹۲	۳۶/۹۲	۳۶/۹۲
سهم برق تجدیدپذیر در پوشش تقاضا (درصد)	۰/۴	۰/۱	۲/۹
حجم بهینه صادراتی (میلیون مگاوات ساعت)	۱۶/۶۸	۱۶/۳۲	۱۹/۲۹
شاخص پایداری شبکه (درصد)	۱۰۳	۱۰۵	۱۰۱

منبع: محاسبات تحقیق.

نتایج جدول ۲ و جدول .Error! No text of specified style in document۳ نشان می‌دهد که ماهیت نوسان‌پذیر تولید برق تجدیدپذیر بادی، زیست‌توده و زمین‌گرمایی و برق-آبی در کنار توان محدود خطوط تولید این نیروگاه‌های تجدیدپذیر، مانع از جانشین‌پذیری

---

۱ برای اطلاعات بیشتر در زمینه محاسبه شاخص پایداری شبکه، ر.ک:

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

۱. در این سناریو، حداکثر پتانسیل تولید برق زیست‌توده به مدل پایه اضافه شده است

۳. در این سناریو، حداکثر پتانسیل تولید برق زمین‌گرمایی به مدل پایه اضافه شده است

۴. در این سناریو، حداکثر پتانسیل تولید برق هیدرو به مدل پایه اضافه شده است.

این نیروگاه‌ها با نیروگاه‌های فسیلی در سیستم تولید می‌شود و همچنان برای حفظ پایداری شبکه مدنظر سیستم تولید، لازم است که ۳۶/۹۲ تراوات ساعت برق فسیلی نیز در کنار این تولیدات تجدیدپذیر نوسانی حضور داشته باشد تا قابلیت اطمینان سیستم تولید و پایداری شبکه تامین شود. اما حجم بالای برق تجدیدپذیر خورشیدی باعث شده است که در برنامه‌ریزی آنالیزی این تولید تجدیدپذیر، ماهیت نوسانی این توان، تحت تاثیر حجم بالای آن قرار گیرد و امکان جانشین‌پذیری آن با برق فسیلی فراهم شود و تولید برق فسیلی ۶/۷۴ تراوات ساعت کاهش یابد و در نتیجه میزان انتشار آلاینده نیز ۴/۲۲ میلیون تن کاهش پیدا کند. بنابراین تنها ورود این حجم از برق تجدیدپذیر خورشیدی می‌تواند ماهیت نوسانی و نمادینِ حضور برق تجدیدپذیر را به ماهیتی قابل‌اطمینان و واقعی تبدیل کند. از سوی دیگر، ورود این میزان توان تجدیدپذیر خورشیدی، قیمت تمام شده را به طور متوسط تا ۱۰ برابر افزایش می‌دهد که مقداری بسیار قابل‌توجه و مهمترین چالش اقتصادی سیستم تولید است و در کنار آن پایداری شبکه را تا ۲۰ درصد کاهش خواهد داد که مهمترین چالش فنی این سیستم هیبرید به شمار می‌رود. لازم به ذکر است که منظور از تولید بهینه صادراتی، مازاد غیربحرانی سیستم تولید است که با توجه به ظرفیت خطوط انتقال (با شرکت‌های همجوار و کشورهای همسایه) قابلیت صادرات آن وجود دارد. البته تعیین میزان صادرات نهایی برق و قیمت صادرات، نیازمند اطلاعات تکمیلی در خصوص شرکای تجاری بین‌المللی و چارچوب‌های اداری–سازمانی مبادلات بین‌منطقه‌ای است که در محدوده تحلیل این پژوهش قرار ندارد.

با توجه به اینکه هزینه سرمایه‌گذاری، نقش قابل‌توجهی در قیمت تمام‌شده تولید دارد، ترتیب اولویت ورود هر یک از انواع تولیدات تجدیدپذیر به سیستم تولید، از اهمیت فراوانی در تعیین قیمت تمام شده شبکه برخوردار است. بنابراین لازم است که سیستم در حالت برخورداری از تمامی توان تجدیدپذیر (به طور همزمان) نیز شبیه‌سازی شود. نتایج این شبیه‌سازی در

جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ٤. نتایج شبیه‌سازی سیستم تولید هیبرید فسیلی-تجدیدپذیر جامع

تولید هیبرید / شاخص	فسیلی- بادی- خورشیدی- زیست‌توده- زمین-گرمایی-برق‌آبی[1]
متوسط قیمت (ریال بر مگاوات ساعت)	۶،۴۹۶،۰۶۰/۴۵
انتشار آلاینده زیست‌محیطی (میلیون تن)	۱۸/۸۵
تولید بهینه برق تجدیدپذیر (میلیون مگاوات ساعت)	۶۰/۷۲
تولید بهینه برق فسیلی (میلیون مگاوات ساعت)	۳۰/۰۹
سهم برق تجدیدپذیر در پوشش تقاضا (درصد)[2]	۴۲/۷
حجم بهینه صادراتی (میلیون مگاوات ساعت) [3]	۷۰/۱۵
شاخص پایداری شبکه (درصد)	۸۵

منبع: محاسبات تحقیق.

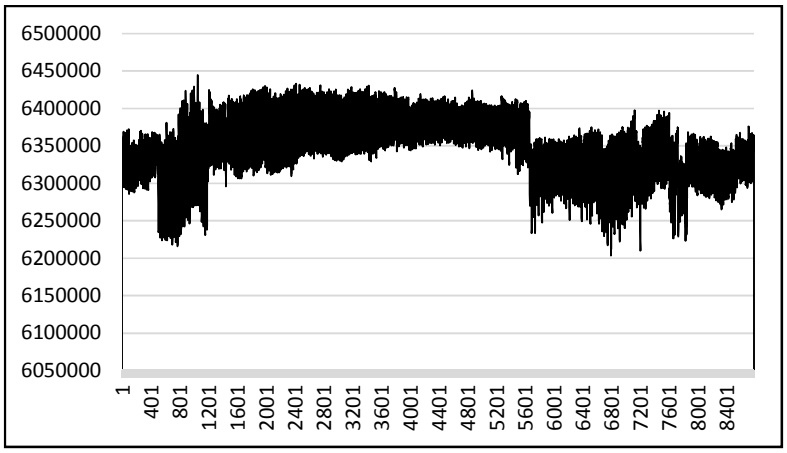
نتایج شبیه‌سازی سیستم تولید هیبرید فسیلی-تجدیدپذیر جامع (با در نظر گرفتن حداکثر پتانسیل تولید تمامی انواع تکنولوژی‌های تجدیدپذیر) در

۱. در این سناریو، حداکثر پتانسیل تولید برق خورشیدی (با تکنولوژی فتوولتائیک) و بادی به مدل پایه اضافه شده است

۲. مابقی تولید برق تجدیدپذیر، به دلیل لزوم برقرار قیود قابلیت اطمینان تولید و پایداری شبکه، وارد شبکه مصرف برق منطقه‌ای نمی‌شوند و با اهداف صادراتی تولید می‌شوند؛ زیرا در صورت بالا رفتن ضریب نفوذ برق نوسان‌پذیر تجدیدپذیر در شبکه قدرت، قابلیت اطمینان تولید و احتمال بروز خاموشی افزایش پیدا می‌کند و قیود قابلیت اطمینان سیستم تولید، اجازه تولیدِ فراتر از محدوده مشخصی که تامین‌کننده پایداری سیستم باشد و به اطمینان سیستم تولید خدشه‌ای وارد نکند، را نخواهد داد.

۳. این حجم بهینه با توجه به برآورده شدن قیود انتقال بین‌منطقه‌ای و بین‌المللی تعیین شده است. به عبارت دیگر با توجه به ضریب بهره‌برداری ۲۰ و ۲۵ درصدی نیروگاه‌های خورشیدی و بادی در محدوده خراسان بزرگ که توسط شرکت برق منطقه‌ای خراسان برآورد شده است، پتانسیل ۷۰۰۰ مگاواتی برق بادی در خراسان بزرگ، تولیدی معادل ۱۵ میلیون مگاوات ساعت و پتانسیل ٤۰۰۰۰ مگاواتی برق خورشیدی در خراسان بزرگ، تولیدی معادل ۷۰ میلیون مگاوات ساعت را در سال فراهم خواهند نمود که صادرات برق مازاد بر نیاز شبکه، کاملا بستگی میزان محدودیت‌های پست‌های انتقال دارد.

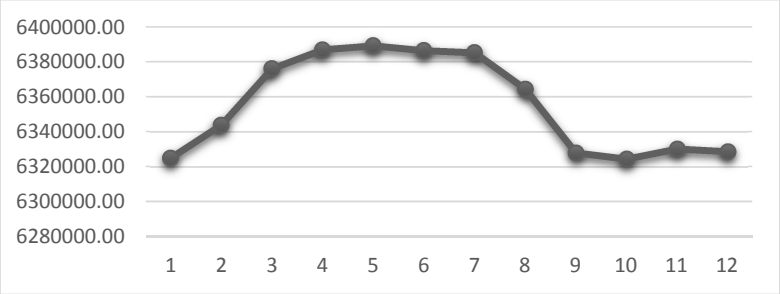
جدول ۴ نشان می‌دهد که ورود این میزان توان تجدیدپذیر، قیمت تمام شده را به طور متوسط تا بیش از ۱۰ برابر افزایش داده و پایداری شبکه را ۲۱ درصد کاهش خواهد داد. نتایج مربوط به قیمت‌گذاری لحظه‌ای-ساعتی و قیمت متوسط ماهانه سیستم هیبرید جامع در نمودار ۱۱ و نمودار ۲ گزارش شده است و در نمودار۳ و ۴ نیز به ترتیب تولید ماهانه برق به تفکیک فسیلی و انواع تجدیدپذیر و تولید لحظه‌ای-ساعتی برق فسیلیِ تولید شده با سوخت گاز طبیعی گزارش شده است.



نمودار ۱. قیمت لحظه‌ای-ساعتی برق تولیدی سیستم هیبرید جامع

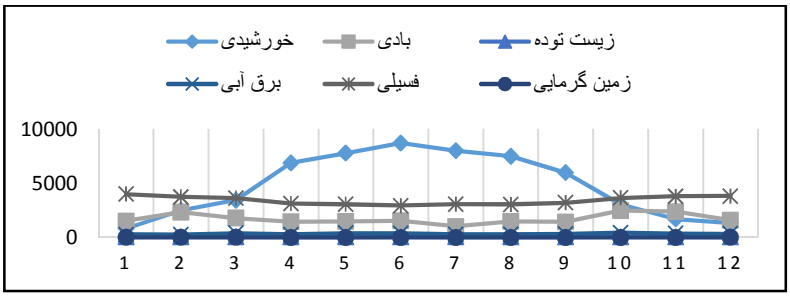
(محور عمودی، قیمت (ریال بر مگاوات ساعت) و محور افقی لحظه-ساعت را نشان می‌دهد[۱])

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



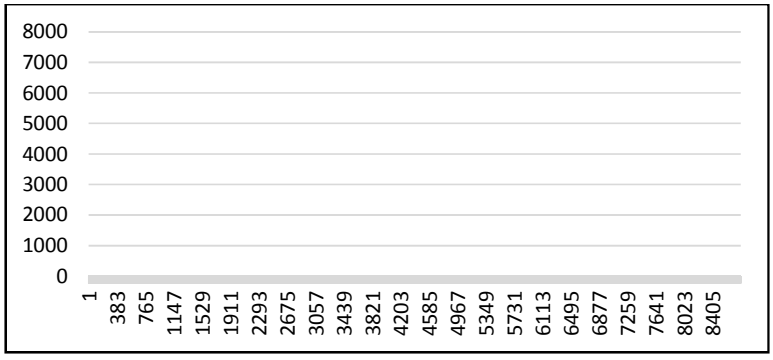
نمودار ۲. قیمت متوسط ماهانه برق تولیدی سیستم هیبرید جامع

(محور عمودی، قیمت (ریال بر مگاوات ساعت) و محور افقی ماه را نشان می‌دهد[1])



نمودار۳. تولید ماهانه برق به تفکیک فسیلی و انواع تجدیدپذیر

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



نمودار ٤. تولید لحظه‌ای-ساعتی برق فسیلیِ با سوخت گاز طبیعی در سیستم هیبرید جامع

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

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

با تحلیل و مقایسه نتایج حاصل از ورود تعدیل‌های مختلف تجدیدپذیر به سیستم تولید، می‌توان گفت که افزایش هزینه تمام‌شده تولید، ریشه در تولیدات خورشیدی و بادی دارد و به طور ویژه دلیل این قیمت بالا را باید در هزینه‌های سرمایه‌گذاری بالای تولید برق خورشیدی - که نیازمند تجهیزات مختلف برای تولید برق است — و تولید برق بادی جستجو کرد؛ زیرا بر اساس اطلاعات بودجه‌ای شرکت برق منطقه‌ای خراسان برای سال ۱۳۹۱، هزینه سرمایه‌گذاری ایجاد ظرفیت یک مگاواتی بخاری، گازی و سیکل ترکیبی به ترتیب ۲۰۱۰۲ ، ۱۸۲۰۰ و ۲۲۶۳۰ میلیون ریال است و این در حالی است که هزینه سرمایه-گذاری ایجاد ظرفیت یک مگاواتی خورشیدی و بادی در منطقه خراسان به ترتیب ۱۰۴۵۰۰ و ۳۹۷۵۰ میلیون ریال است. قیمت ماهانه سیستم تولید نیز موید این ادعاست، چرا که قیمت تمام‌شده تولید برق در ماه‌های چهارم تا هفتم به حداکثر خود می‌رسد و در این دوره است که بیشترین میزان نفوذ قدرت خورشیدی نیز مشاهده می‌شود.

لازم به ذکر است که در خصوص ورود نیروگاه‌ها به سیستم تولید، بالا بودن هزینه سوخت، مالیات آلاینده زیست‌محیطی و هزینه عملیات و نگهداشت در نیروگاه‌های فسیلی، باعث ایجاد عدم اولویت در این نیروگاه‌ها برای ورود به سیستم تولید خواهد شد. چنین قضاوتی در صورتی دقیق و کامل خواهد بود که قید پایداری شبکه و لزوم بکارگیری واحدهای پایدارساز در کنار واحدهای تجدیدپذیر نوسانی، در برنامه‌ریزی آنالیزی سیستم تولید مدنظر قرار نگیرد. این در حالی است که بر اساس آنچه در بند چهارم بخش (۲) بدان اشاره شد، آنالیز پایداری شبکه یکی اجزای اساسی برنامه‌ریزی سیستم‌های هیبرید است. به عبارت دیگر، حضور نیروگاه‌های فسیلی در سیستم تولید برنامه‌ریزی‌شده، الزاما به معنای برخورداری این نیروگاه‌ها از اولویت کمینگی هزینه نهایی کوتاه‌مدت نیست، بلکه نشان از لزوم حضور این نیروگاه‌ها برای برقراری پایداری شبکه دارد. نتایج پژوهش نیز به طور کامل موید این ادعاست، زیرا با کاهش ۶/۷۴ تراوات ساعتی تولید برق فسیلی، سیستم تولید با کاهشی ۲۰ درصدی در

پایداری شبکه مواجه می‌شود. به علاوه، کاهش ۴/۲۲ میلیون تنی تولید آلاینده زیست-محیطی در سیستم هیبرید جامع نشان‌دهنده تاثیر مالیات بر انتشار آلاینده در سیستم تولید است که باعث شده است با افزایش ظرفیت تجدیدپذیر و جانشین‌پذیری تولید تجدیدپذیر با فسیلی، اولویت تولید برق فسیلی برای پایدارسازی شبکه از میان برود و برق فسیلی (که الزاما باید مالیات آلایندگی پرداخت کند)، در رقابت با ظرفیت‌های بالای برق تجدیدپذیر (که اکنون ماهیت غیرنوسانی پیدا کرده است) نتواند جایگاه الزام‌آور خود برای پایدارسازی شبکه را حفظ کند و از این رو جای خود به برق تجدیدپذیر بدهد و کاهشی ۴/۲۲ میلیون تنی در تولید آلاینده زیست‌محیطی را برای سیستم تولید به ارمغان آورد.

٦. نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج پژوهش، استفاده از حداکثر توان تجدیدپذیر در سیستم هیبرید، کاهش انتشار آلاینده و افزایش حجم بهینه صادراتی را به دنبال دارد اما دو معضل مهم نیز در این سیستم هیبرید به چشم می‌خورد:

چالش اول، چالش قیمت لحظه‌ای-ساعتی بالای سیستم تولید است که به دلیل بالا بودن قیمت تمام شده و هزینه‌های سرمایه‌گذاری تولید برق تجدیدپذیر خورشیدی و بادی، خروجی قیمتی بسیار بالایی را به وجود آورده است. در شرایط فعلی انرژی‌های تجدیدپذیر قابلیت رقابت آزاد با دیگر عرضه‌کنندگان فسیلی را ندارند. بنابراین باید استراتژی‌های مناسبی را در سیستم تولید اتخاذ نمود که عرضه‌کنندگان انرژی‌های تجدیدپذیر قابلیت حضور بلندمدت در سیستم تولید را داشته باشند. برای کاهش قیمت باید بومی‌سازی و حمایت مالی از پروژه‌های بادی و خورشیدی در کنار تسهیم هزینه نهایی تولید در سیستم هیبرید با مشترکان، در اولویت‌های حمایتی و قانونی دولت قرار گیرد.

با توجه به الگوهای حمایت قیمتی موجود و رایج می‌توان الگوی بازنویسی‌شده Feed-in Tariff را برای حمایت از تولیدات تجدیدپذیر بکار گرفت. این الگو که اکثر کشورهای پیشتاز دنیا در عرصه انرژی‌های تجدیدپذیر، برای ایجاد زمینه قیمتی مناسب

برای تولید برق تجدیدپذیر از آن استفاده می‌کنند، 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. در مقابل در تمامی این کشورهای پیشرفته، الگوی مناسب تعرفه تولید برق متناسب با الگوی تولید، ظرفیت تولید و گذشت زمان، تغییرات متناسبی داشته است. برای مثال در تعرفه تولید برق تجدیدپذیر سال ۲۰۱۵ در آلمان، تعرفه متفاوتی برای توربین‌های بادی با ظرفیت‌های مختلف در نظر گرفته شده است و در قوانین اعطای تعرفه دوره‌های زمانی با مقادیر مختلف هدف‌گذاری می‌شوند به نحوی که میزان پرداختی به ازای هر کیلووات ساعت برق تولیدی در یک توربین ۱۰۰ کیلوواتی در سال ۲۰۱۵، ۰/۰۸۹ یورو خواهد بود که از سال ۲۰۱۶ در هر فصل ۰/۴ درصد از این مبلغ کاسته می‌شود تا به سقف ۰/۰۴۹۵ یورو به عنوان قیمت پایه برسد. به علاوه بر اساس گزارش شبکه سیاست‌گذاری انرژی‌های تجدیدپذیر برای قرن بیست و یکم[1] (REN21) (۲۰۱۴)، آلمان در سال ۲۰۱۴ به طور متوسط در هر کیلووات ساعت برق بادی، ۳۷۰ تومان، در هر کیلووات ساعت برق خورشیدی بین ۴۶۵ تا ۵۳۵ تومان (در ظرفیت‌های مختلف) و در هر کیلووات ساعت برق زیست‌توده بین ۲۴۵ تا ۵۷۴ تومان (در ظرفیت‌های مختلف)، تعرفه تولید برق اعطا نموده است. این انعطاف قیمتی و تنوع حمایتی می‌تواند جهت‌دهی‌های مدنظر سیاست‌گذاری کلان انرژی را به خوبی به مرحله اجرا درآورد. بنابراین پیشنهاد می‌شود که در تدوین الگوی تعرفه تولید برق در ایران و به ویژه شرکت برق منطقه‌ای خراسان، گزاره‌های زیر مدنظر قرار گیرد:

1. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century

۱- تعرفه برق به صورت متنوع به الگوهای تولید برق تجدیدپذیر تعلق گیرد و به ترتیب بیشترین حمایت از برق خورشیدی، بادی و زیست‌توده در سطوح کوچک مقیاس صورت گیرد.

۲- تغییرات قیمت خرید تضمینی به ظرفیت مولد بستگی داشته باشد و به مولدهای با ظرفیت کمتر، قیمت خرید تضمینی بالاتری تعلق گیرد.

۳- تغییرات قیمت خرید تضمینی به میزان استفاده از پیمان‌کار و تجهیزات داخلی بستگی داشته باشد و افزایش استفاده از منابع داخلی باعث افزایش قیمت خرید تضمینی شود.

۴- ارائه تضمین بلندمدت برای خرید برق تجدیدپذیر در کنار ارائه جدول زمانی هدفمند برخوردار از الگوی حمایتی کاهشی برای رسیدن به قیمت پایه قابل رقابت.

۵- اما معضل دوم سیستم هیبرید مورد مطالعه، چالش فنیِ پایداری شبکه و قابلیت اطمینان سیستم تولید است ورود برق تجدیدپذیر با ماهیت نوسانی و نا اطمینانی بالا، پایداری شبکه را به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌دهد. استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی همانند سیستم‌های ذخیره‌ساز هوای فشرده[1] (CAES) در نیروگاه‌های بادی و گازی و استفاده از واحد ذخیره‌ساز انرژی هیدروالکتریک پمپ‌شده[2] (PHES) در نیروگاه‌های برق‌آبی می‌تواند معضل کاهش پایداری شبکه به هنگام ورود حداکثر توان تجدیدپذیر را جبران کند و علاوه بر کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، آربیتراژ انرژی را نیز همراه داشته باشد که این مسئله می‌تواند، موضوع پژوهش‌های آتی باشد.

1. Compressed air energy storage
2. Pumped Hydroelectric Energy Storage

منابع و مآخذ

- اسلاملوئیان، کریم و استادزاد، علی حسین. (۱۳۹۱)، تعیین سهم بهینه انرژی های تجدیدپذیر در یک الگوی رشد پایدار: مورد ایران، *فصلنامه اقتصاد محیط زیست و انرژی*، سال دوم، شماره ۵، صص ۱-۴۸.
- امامی میبدی، علی. (۱۳۷۸)، روش قیمت گذاری برق بر مبنای ساختار صنعت برق کشور، *نشریه برنامه و بودجه (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور)*، اردیبهشت ۱۳۷۸، دوره ۴، شماره ۱ (پیاپی ۳۷)، صص ۳۷-۵۶.
- امامی میبدی، علی و حیدری، کیومرث. (۱۳۹۱)، بررسی تبدیل نیروگاه های گازی ساده (SCGT) به چرخه ترکیبی (CCGT) و تاثیر آن بر میزان مصرف سوخت های فسیلی، *فصلنامه پژوهشهای اقتصادی (پژوهشهای رشد و توسعه پایدار)*، سال دوازدهم، شماره ۳، صص ۲۵-۴۶.
- پژویان، جمشید و محمدی، تیمور. (۱۳۷۹)، قیمت گذاری بهینه رمزی برای صنعت برق ایران، *پژوهشهای اقتصادی ایران*، پاییز ۱۳۷۹، دوره ۳، شماره ۶، صص ۳۹-۶۱.
- ترازنامه انرژی سال ۱۳۹۱ (۱۳۹۲)، وزارت نیرو، دفتر برنامه ریزی کلان برق و انرژی، *معاونت امور برق و انرژی*، تهران.
- خوش اخلاق، رحمان؛ شریفی، علیمراد و کوچک زاده، میثم. (۱۳۸۴)، ارزیابی اقتصادی استفاده از انرژی خورشیدی در مقایسه با نیروگاه دیزلی، *پژوهش‌های اقتصادی ایران*، پاییز ۱۳۸۴، شماره ۲۴، صص ۱۷۱-۱۹۶.
- رحیمی عبدالرحیم؛ ثقفی، مجید و سروقدی، زهرا. (۱۳۸۷)، بررسی فنی استفاده از انرژیهای تجدیدپذیر در یک واحد نمونه ساختمانی جهت فرهنگ سازی و آموزش، *مجله مهندسی مکانیک*، سال هفدهم، شماره ۶۱، صص ۳۸-۵۲.
- روحانی، سید علی. (۱۳۸۸)، بررسی و مقایسه دو روش قیمت‌گذاری MCP و PAB و کاربرد آنها در بازار برق ایران، پروژه کارشناسی مهندسی برق، گرایش قدرت، دانشگاه صنعتی شریف.
- سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا). (۱۳۸۶)، گزارش پتانسیل منابع زیست‌توده در ایران، وزارت نیرو، معاونت امور انرژی، تهران.

- سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا). (۱۳۷۷)، گزارش پتانسیل منابع و نقشه زمین گرمایی در ایران، وزارت نیرو، معاونت امور انرژی.
- شادی طلب، ژاله و نایه در، مهدی. (۱۳۸۸)، واکاوی عوامل مؤثر بر پذیرش آبگرمکن های خورشیدی خانگی در نواحی روستایی - مطالعه موردی شهرستان بردسکن، *فصلنامه توسعه محلی*، پاییز و زمستان ۱۳۸۸، شماره ۳۶، صص ۶۷-۸۸.
- شرکت برق منطقه‌ای خراسان. (۱۳۹۱)، گزارش اقدامات شرکت برق منطقه‌ای خراسان در زمینه توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، مشهد، تاریخ انتشار گزارش: ۱۳۹۱/۰۸/۲۹.
- شریفی، علیمراد؛ کیانی، غلامحسین و خوش اخلاق، رحمان و باقری تودشکی، محمد مهدی. (۱۳۹۲)، ارزیابی جایگزینی انرژی های تجدیدپذیر به جای سوخت های فسیلی در ایران: رهیافت کنترل بهینه، *فصلنامه تحقیقات مدلسازی اقتصادی*، سال سوم، شماره ۱۱، صص ۱۲۳-۱۴۰.
- عبدی، حمدی؛ حسین زاده خنکداری، تقی؛ ذاکری فر، رزم آرا؛ عباسی کهن، سید حسن و هاشمی پنبه چوله، سید ابراهیم. (۱۳۹۰)، امکان سنجی احداث نیروگاه بادی ۱۰ مگاواتی مراوه تپه، *فصلنامه انرژی ایران*، سال چهاردهم، شماره ۳۷، صص ۵۵-۷۷
- کتابداری، محمد جواد و احمدی، محمد احسان. (۱۳۹۰)، امکان سنجی جذب انرژی از امواج دریا در سواحل جنوبی ایران به کمک مدلسازی عددی، *فصلنامه علوم و فناوری دریا*، سال هجدهم، شماره ۶۰، صص
- متقی، ابراهیم. (۱۳۸۶)، نیاز امروز سرمایه داری در حوزهٔ انرژی، *همشهری دیپلماتیک*، شماره ۲۲، ص ۲۴-۳۰.
- مستوفی، فرشید؛ شایقی، حسین و کاظمی کارگر، حسین. (۱۳۹۱)، پتانسیل سنجی و طراحی بهینه سیستم ترکیبی انرژی های تجدیدپذیر جهت تامین برق مورد نیاز ایستگاه های پمپاژ آب سایت مشکین شهر، *فصلنامه انرژی ایران*، سال پانزدهم، شماره ۴۳، صص ۲۰-۲۹.
- ملکی، عباس. (۱۳۸۶)، امنیت انرژی و درس‌هایی برای ایران؛ *راهبرد یاس*، شماره ۱۲. ص ۲۲۲-۲۰۶.
- ملکی، عباس. (۱۳۹۰)، سیاستگذاری انرژی، نشر نی، تهران.

- معینی، سام؛ جوادی، شهرام؛ کوکبی، محسن و دهقان منشادی، محسن. (۱۳۸۹)، برآورد تابش خورشیدی در ایران با استفاده از یک مدل بهینه، *فصلنامه انرژی ایران*، سال سیزدهم، شماره ۳۴، صص ۱-۱۰
- منظور، داود و رضایی، حسین. (۱۳۹۰)، محاسبه قیمت سایه‌ای انرژی الکتریکی در بازار برق ایران، *تحقیقات مدل سازی اقتصادی*، زمستان ۱۳۹۰ شماره ۶، صص ۱۵۵-۱۷۲.
- نامور بهرغانی، بهنام؛ آقا شفیعی، محمد؛ مرادی دالوند، محمد؛ احمدیان، محمد. (۱۳۹۱)، تعیین اندازه بهینه منابع در یک ریزشبکه متعامل با بازار برق برای تامین بار الکتریکی و حرارتی با هدف کاهش وابستگی ریزشبکه به سوخت فسیلی، *فصلنامه مهندسی و مدیریت انرژی*، سال دوم، شماره ۳ (پیاپی ۵)، صص ۲-۱۱.
- یوسفی، حسین و نوراللهی، یونس. (۱۳۸۵)، مکان یابی مناطق دارای پتانسیل انرژی زمین گرمایی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی درایران، *بیست و پنجمین گردهمایی علوم زمین*، تهران، وزارت صنایع و معادن، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

- Alberta Innovates – Technology Futures (AITF) (2011) Energy Storage: Making Intermittent Power Dispatchable, Final Report, Oct 27th, 2011.
- Caballero, F., Sauma, E., Yanine, F. (2013) Business optimal design of a grid-connected hybrid PV (photovoltaic)- wind energy system without energy storage for an Easter Island's block, *Energy*, 61 (2013) 248-261.
- 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.
- Hourcade, J.C., Richels, R. and Robinson, J. (1996). Estimating the Cost of Mitigating Greenhouse Gases, Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change, Chapter: 8, Publisher: Cambridge University Press, Editors: J. Bruce, H. Lee, E. Haites, University Press, Cambridge, 263-296.
- International Energy Agency, (2010) Energy Balances of OECD Countries & non-OECD Countries.
- 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.
- Kruyt, B, Vuuren, V, deVries, H.J.M, Groenenberg, H. (2009), Indicators for energy security, Volume 38, PP 2166 –2181
- Liu, W., Hu, W., Lund, H., Chen, Z., (2013) Electric vehicles and large-scale integration of wind power – The case of Inner Mongolia in China, *Applied Energy*, 104 (2013) 445–456

- Lund, H. (2014) Advanced Energy Systems Analysis Computer Model, Documentation Version 11.4, Aalborg University, Denmark
- Mandil, C. (2004). "Oil crises and climate challenges-30 years of energy use in iea countries," International Energy Agency.
- 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
- Østergaard, P. A. (2010) Regulation strategies of cogeneration of heat and power (CHP) plants and electricity transit in Denmark, *Energy*, 35, (2010) 2194-2202.
- Pereza, I. O. and Østergaard, P. A. (2013) the influence of an estimated energy saving due to natural ventilation on the Mexican energy system, *Energy*, 3 (2013), 1-12.
- Perkovic, L., Silva, P., Ban, M., Kranjcevic, N., Duic, N., (2013) Harvesting high altitude wind energy for power production: The concept based on Magnus' effect, *Applied Energy*, 101 (2013) 151–160.
- Schweppe, Fred C. ; Michael C. Caramanis, Richard D. Tabors, Roger E. Bohn (auth.) (1988) Spot Pricing of Electricity, *Kluwer Academic Publishers*, Boston, Dordrecht, London.
- 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.
- Vickrey, W. (1971). "Responsive Pricing of Public Utility Services," *Bell Journal of Economics*, The RAND Corporation, vol. 2(1), pages 337-346, spring.
- Yi-Ming Wei & Gang Wu & Ying Fan & Lan-Cui Liu, 2006. "Progress in energy complex system modelling and analysis," *International Journal of Global Energy Issues*, Inderscience Enterprises Ltd, Inderscience Enterprises Ltd, vol. 25(1/2), pages 109-128.
- Vivoda, V., (2010), Evaluating energy security in the Asia-Pacific region : Anovel Methodological approach, *Energy Policy*, Volume 38, PP 5258–5263
- Von Hippel, D., Suzuki, T., Williams, J.H., Savage, T., Hayes, P. (2009) Energy security and sustainability in Northeast Asia. *Energy Policy*, Volume 39, Issue 11, November 2011, PP 6719–6730.
- Van Beeck, N. (1999) Classification of Energy Models, Tilburg University and Eindhoven University of Technology, Amsterdam.
- Zhou, W. C. Z. Lou, Z. S. Li, L. Lu, H. X. Yang, (2010) "Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar-wind power generation systems," *Applied Energy*, vol. 87, pp. 380–389.
- Zelinka, I. (2001). Analytic programming by means of new evolutionary algorithms, Proceedings of 1st *International Conference on New Trends in Physics'01*, Brno, Czech Republic, pp. 210–214.
- Zelinka, I. (2002a). Analytic programming by means of soma algorithm, *Proceedings of First International Conference on Intelligent Computing and Information Systems*, Cairo, Egypt, pp. 148–154.

- Zelinka, I. (2002b). Analytic programming by means of soma algorithm, Proc. *8th International Conference on Soft Computing,* VUT Brno, Mendel'02 Czech Republic, pp. 93–101.
- Zelinka, I., Oplatkova, Z. & Nolle, L. (2005). Analytic programming - symbolic regression by means of arbitrary evolutionary algorithms*, International Journal of Simulation, Systems, Science and Technology* ,Vol.6 (No.9): 44–55.
- 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.