تحقیقات اقتصادی / دورهٔ ۵۱، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۳۹۵ / ص ۴۳۵-۴۱۳

برنامه‌ریزی عرضهٔ بهینهٔ انرژی پایدار با استفاده از مدل برنامه‌ریزی آرمانی (مطالعهٔ موردی: شهرستان اصفهان)

بابک صفاری[۱]، رضا نصر اصفهانی*[۲]، نسیم منصوری[۳]

۱. استادیار اقتصاد، گروه اقتصاد، دانشگاه اصفهان b_saffari@ase.ui.ac.ir

۲. استادیار اقتصاد، گروه اقتصاد شهری، دانشگاه هنر اصفهان r.nasr@aui.ac.ir

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد اقتصاد شهری، دانشگاه هنر اصفهان Mansouri.nasim@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۴/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۲۵

چکیده

گسترش نیازمندی‌های محلی به انرژی، لزوم برنامه‌ریزی منطقه‌ای انرژی را در فرایند کلان برنامه‌ریزی انرژی مهم جلوه می‌دهد. از این نظر که قسمتی از اثرهای مستقیم بیرونی تولید و مصرف انرژی به صورت محلی اثرگذار است، کمتر در فرایندهای کلان برنامه‌ریزی انرژی دیده می‌شود. لذا در این مقاله سعی شده است موضوع تداوم عرضهٔ انرژی، امکان دسترسی بلندمدت به منابع، و کاهش آلایندگی‌ها از بعد محلی بررسی شود. شهرستان اصفهان به عنوان نمونه برای مطالعه انتخاب شده و ترکیب بهینهٔ عرضهٔ انرژی الکتریکی ناشی از انرژی‌های جایگزین مانند خورشیدی، بادی، و گازی در بازهٔ زمانی ۱۰ سال آینده بر اساس اهداف آرمانی بررسی شده. مدل برنامه‌ریزی آرمانی پیشنهادی، بر اساس پیش‌بینی تقاضای مصرفی، توان جایگزینی انرژی‌های نو، هزینه‌های سرمایه‌ای و حداقل کردن انتشار آلاینده‌های ناشی از تولید، سبد بهینه‌ای را برای تولید انرژی الکتریکی پیشنهاد می‌کند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد سهم تولید انرژی‌های خورشیدی و بادی طی ۱۰ سال آینده باید به هشت درصد کل مصرف برسد و برای جبران کمبود عرضهٔ انرژی الکتریکی از توان شبکهٔ برق سراسری (تولید غیرمحلی) استفاده شود، در این شرایط با هزینهٔ سرمایه‌ای یکسان نسبت به ادامهٔ روند موجود میزان آلایندگی کمتری را به صورت منطقه‌ای شاهد خواهیم بود.

طبقه‌بندی JEL : C61, Q42, R11.

واژگان کلیدی: اقتصاد شهری، برنامه‌ریزی آرمانی، برنامه‌ریزی محلی انرژی.

---

* نویسندهٔ مسئول، ۰۳۱۳۶۲۶۲۰۱۱- ۰۹۱۳۳۱۵۲۴۴۴

مقدمه

در سال ۱۹۷۰ با بحران نفت موضوعاتی مانند انرژی و محیط زیست به نگرانی‌ای برای سیاست‌گذاران و جوامع سراسر جهان تبدیل شد. نگرانی‌هایی که اصلاح رفتار جمعی و انگیزهٔ شخصی افراد برای استفادهٔ مناسب از انرژی را در دهه‌های بعدی برمی‌انگیزد. همچنین موضوعاتی مانند استفاده از منابع طبیعی، تأثیرات زیست‌محیطی فنّاوری‌های تولید انرژی، و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به منزلهٔ نتیجه مورد بحث قرار می‌گیرد (سامپایو[1]، ۲۰۱۲: ۹۲۴).

از طرفی شهرنشینی جوامع توجه خاصی را در خصوص واقعیت‌های شهری به برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیران ارائه می‌کند. همچنین جنبه‌های بسیاری مانند دسترسی انرژی و اثرهای زیان‌آور زیست‌محیطی از جمله آلودگی بر روی جمعیت را مورد توجه قرار می‌دهد که در تصمیم‌گیری و سیاست‌گذاری‌های محلی خصوصاً در زمینهٔ انرژی مؤثر است. در واقع می‌توان گفت برنامه‌ریزی محلی انرژی، بهینه‌یابی انرژی پویا بین فنّاوری‌های جایگزین منابع فسیلی (انرژی خورشیدی، بادی و ...) برای استفادهٔ منطقی انرژی و کاهش آلودگی در شهرها را گسترش می‌دهد.

در برنامه‌ریزی منطقه‌ای، مناطق کلان‌شهری را باید نیازمندترین مناطق هر کشور به برنامه‌ریزی انرژی به شمار آورد. جمعیت متراکم و زیاد، تحرک و جابه‌جایی گستردهٔ افراد، کالاها و خدمات و تمرکز فعالیت‌های خدماتی، تجاری، و صنعتی این مناطق را به مراکز عمدهٔ مصرف انرژی تبدیل کرده است. مصرف بدون برنامه‌ریزی انرژی میزان آلودگی منتشرشده در کلان‌شهرها را آن‌چنان افزایش داده است که رشد و توسعهٔ فعلی آن‌ها را در آینده‌ای نه‌چندان دور با خطر کندی و توقف مواجه خواهد کرد. کلان‌شهر اصفهان نمونه‌ای گویا از این مناطق است.

با شدت گرفتن مسئلهٔ آلودگی در کلان‌شهرها تلاش برای حل این مشکل نیز شدت گرفت که حاصل آن را می‌توان معرفی سیستم‌هایی برای جایگزینی سیستم‌های موجود عرضهٔ انرژی کلان‌شهرها دانست. آلودگی به‌مراتب کمتر از بعد زیست‌محیطی و افزایش

1. Sampio

هزینه‌های سرمایه‌گذاری از بعد اقتصادی از مشخصات این سیستم‌هاست، که با ساختار برنامه‌ریزی مناسب نقطهٔ بهینه‌ای از نظر ابعاد اقتصادی و زیست‌محیطی می‌توان پیدا کرد.

به کار گرفتن منابع فسیلی برای تولید برق هزینه‌های اجتماعی مانند آلودگی هوا و خسارت‌های ناشی از آن را در پی دارد. به دلیل آلودگی‌های ناشی از سوخت‌های فسیلی در سیستم عرضهٔ برق کلان‌شهر اصفهان می‌توان گفت که تأمین انرژی در منطقه به صورت بهینه صورت نمی‌گیرد که در این تحقیق با ارائهٔ ترکیبی از منابع متفاوت از جمله منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر با هزینه‌های سرمایه‌ای، هزینه‌های اجتماعی، و هزینه‌های تأمین سوخت اولیهٔ متفاوت می‌توان روش بهینه‌ای را برای تأمین برق این کلان‌شهر پایه‌ریزی کرد. در واقع در این تحقیق شاخص‌های اصلی از یک سیستم برنامه‌ریزی انرژی در ابعاد زیست‌محیطی و اقتصادی تجزیه و تحلیل شده است.

در این تحقیق برنامه‌ریزی چندهدفهٔ آرمانی برای تولید برق در شهرستان اصفهان با توجه به اهداف زیست‌محیطی، اقتصادی، و انرژی منظور می‌شود. هدف این تحقیق، به منظور برطرف کردن مصرف افزایشی در شهرستان بر اساس سیستم‌های انرژی محلی مانند بادی، فتوولتائیک و سیستم‌های مبتنی بر گاز طبیعی دنبال می‌شود.

مبانی نظری

۱. برنامه‌ریزی انرژی

در دهه‌های اخیر با توجه به رشد روزافزون اقتصاد و نقش پیچیدهٔ انرژی در این زمینه، نمی‌توان تصمیمات مربوط به انرژی را به‌سادگی اتخاذ کرد؛ زیرا با توجه به نقش انرژی به عنوان یکی از نهاده‌های اصلی تولید، هر گونه تصمیم‌گیری در این زمینه اقتصاد کشورها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در واقع، برنامه‌ریزی انرژی به مجموعه فعالیت‌هایی اطلاق می‌شود که، در سطح کلان، مطالعهٔ ارتباط متقابل بین بخش انرژی و سایر بخش‌های اقتصادی اجتماعی با تأکید بر ملاحظات زیست‌محیطی به منظور ایجاد هماهنگی بین عرضه و تقاضا در سطوح محلی، ملی، منطقه ای، و جهانی با ارزیابی محدودیت‌های سیستم انرژی است (منظور و ماجد، ۱۳۹۰: ۷۶).

طبق تعریف هوگ و هابس[1] (۱۹۹۳) برنامه‌ریزی انرژی یکپارچهٔ منابع انرژی، فرایند یافتن ترکیب بهینهٔ منابع عرضه و تعدیل مصرف در سمت تقاضا به منظور برآورده کردن نیازهای انرژی در سطح یک منطقه یا کشور است.

در سال‌های اخیر، به دلایل زیست‌محیطی و آشکار شدن مضرات ناشی از سوخت های فسیلی و تأثیرات منفی آن‌ها بر روی چرخه‌های اکولوژیکی، انگیزهٔ استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و غیرآلایندهٔ محیط زیست نظیر باد، خورشید و آب‌های جاری افزایش و از این رو در برنامه‌ریزی انرژی استفاده از منابع تجدیدپذیر اهمیت ویژه‌ای یافته است.

۲. توسعهٔ پایدار انرژی

در سال ۱۹۸۷ کمیسیون جهانی محیط زیست و توسعه (کمیسیون برونتلاند) توسعهٔ پایدار را بدین ترتیب تعریف کرد: توسعهٔ پایدار عبارت است از توسعه‌ای که نیازهای نسل حاضر را برطرف کرده بدون آن‌که توانایی و قابلیت برطرف کردن نیازهای نسبی آینده را با تهدید و یا مشکل مواجه کند. این توسعه قبل از هر چیزی نیازمند بررسی‌های زیست‌محیطی و اقتصادی ـ اجتماعی در سطوح بالا و تصمیم‌گیران دولتی است (کمیسیون جهانی توسعه و محیط زیست، 1987).[2]

توسعهٔ پایدار انرژی به رغم آن‌که استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی را مد نظر قرار می‌دهد، نیازمند توجه همه‌جانبه برای توسعهٔ استفاده از منابع تجدیدناپذیر انرژی نیز است. از آن‌جا که با فنّاوری‌های کنونی تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر، امکان برآورده کردن نیازهای انرژی مصرفی نیست، لازم است منابع تجدیدناپذیر نیز در حد معقول و متناسب با روش‌های بهینه استفاده شوند. بنابراین بشر نیاز دارد که علاوه بر توسعهٔ استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، مانند انرژی خورشیدی و بادی، منابع تجدیدناپذیر انرژی نظیر سوخت‌های فسیلی را برای نیازهای کنونی مد نظر قرار دهد (رئیسی و همکاران، ۱۳۸۰: ۲۷۰).

۳. هزینه‌های سرمایه‌ای و متغیر تکنولوژی‌های توان الکتریکی

از عوامل بسیار مهم و اساسی در برنامه‌ریزی عرضهٔ انرژی آگاهی داشتن از هزینه‌هایی

1. Hoog & Habbs
2. World Commission on Environment and Development

است که هریک از روش‌های تولید برای عرضه‌کنندگان به همراه دارد. عمدتاً هزینه‌های تولید توان الکتریکی به سه دسته تقسیم می‌شوند:

الف) هزینهٔ سرمایه: این هزینه که به عنوان هزینهٔ فرصت استفاده از سرمایه است، به مقدار سرمایهٔ اولیه بستگی دارد. کلیهٔ هزینه‌های یک واحد تولیدی تا پیش از راه‌اندازی و بهره‌برداری از واحد در این هزینه‌ها دیده می‌شود.

ب) هزینه‌های عملیاتی و نگه‌داری ثابت: این هزینه عموماً هزینه‌هایی را شامل می‌شود که پس از راه‌اندازی واحد بر تولیدکننده اعمال می‌شود، اما تابعی از مقدار تولید نیست و به عنوان هزینه‌های تعمیرات فصلی، صرف نظر از مقدار تولید در دورهٔ مذکور، به صورت ثابت در هزینه‌های بنگاه لحاظ می‌شود. هزینهٔ نیروی انسانی، اداری، و فنی نیز از این جمله هزینه‌هاست؛ زیرا با تغییر مقدار تولید در عمل میزان به‌کارگیری نیروی کار چندان تغییر نمی‌کند، در نتیجه اگرچه جزو هزینه‌های عملیاتی است اما ثابت در نظر گرفته می‌شود.

ج) هزینه‌های عملیاتی و نگه‌داری متغیر: این هزینه‌ها شامل هزینه‌های سوخت و مواد مصرفی حین انجام فرایند تولید است. این هزینه‌ها کاملاً به مقدار تولید بستگی دارد و با تغییر در مقدار تولید، حتی در مقیاس کوچک، قابل مشاهده و اندازه‌گیری است (دپارتمان انرژی امریکا، ۲۰۱۰).[1]

تکنولوژی‌های مختلف اساساً از سطوح هزینه‌ای مختلفی برخوردارند. این تفاوت در هزینه‌های عملیاتی و نگه‌داری ثابت و متغیر قابل مشاهده است و معمولاً تکنولوژی‌هایی که هزینه‌های ثابت بالایی دارند، هزینه‌های متغیر کمتری دارند و بالعکس تکنولوژی‌هایی که هزینه‌های ثابت پایینی دارند، هزینه‌های متغیر بیشتری خواهند داشت.

۴. انتشار آلاینده‌ها در صنعت برق

موضوع آلودگی و حفاظت از محیط زیست مسئله‌ای جهانی است که امروزه حتی در امور سیاسی کشورها هم وارد شده است. همهٔ کشورها، از کشورهای صنعتی و پیشرفته گرفته تا کشورهای در حال توسعه، همه باید در امر کنترل آلودگی سهیم باشند؛ زیرا آلودگی یک اثر

1. Energy Information Administration

جانبی سیال است و از یک مکان به مکان دیگر منتقل می‌شود؛ لذا اثر منفی آن شامل همه می‌شود.

از طرفی بخش برق از مهم‌ترین منابع انتشار گازهای گلخانه‌ای در سطح جهان است. طبق محاسبات انجام‌شده، حدود ۳۷/۵ درصد انتشار کربن در سطح جهان ناشی از فعالیت‌های تولید برق است. کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از بخش برق، مستلزم استفاده از الگوهای مختلف انرژی برای تولید برق است. مقایسهٔ میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای از فنّاوری‌های مختلف برق، به انتخاب روش‌های مؤثر در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند (گوربا[1]، ۲۰۰۶).

با مقایسهٔ آمار سال‌های گوناگون می‌توان گفت که نیروگاه‌های حرارتی و بخاری نسبت به بقیهٔ نیروگاه‌ها، بیشترین سهم را در انتشار آلاینده‌ها دارند. از طرفی برای تأمین ۷۵ درصد از شبکهٔ برق اصفهان نیاز به تولید نیروگاه‌های اصفهان و منتظری است که از این دسته است و باعث افزایش روزافزون گازهای گلخانه‌ای مانند CO_2 و NO_x می‌شود.

پیشینهٔ تحقیق

رحمن و همکاران (۲۰۰۷) در مقاله‌ای با عنوان «هزینهٔ تولید انرژی خورشیدی با استفاده از پنل‌های خورشیدی» با استفاده از داده‌های تداوم تابش خورشید به مطالعهٔ توزیع تداوم تابش و تشعشع خورشید در عربستان صعودی پرداخته‌اند. این تحلیل شامل تولید انرژی تجدیدپذیر و ارزیابی اقتصادی نیروگاه ۵ مگاواتی فتوولتائیک برای تولید برق است.

آکلا[2] و همکارانش (۲۰۰۷) در مقاله‌ای با عنوان «استفادهٔ بهینه از منابع انرژی تجدیدپذیر در یک منطقه»، یک سیستم بهینه‌یابی یکپارچه برای انرژی‌های تجدیدپذیر (برق ـ آبی کوچک، فتوولتائیک، بادی و بیومس) به منظور دست‌یابی به حداقل هزینه برای تولید و تأمین انرژی روستایی در هند پایه‌ریزی کردند.

ونگ[3] و همکاران (۲۰۱۰) در مقاله‌ای با عنوان «توسعهٔ اخیر عرضه و انرژی در چین» روندهای اخیر توسعه در تولید و مصرف انرژی و برنامه‌ریزی استراتژیک انرژی و

1. Gerbil
2. Akella
3. Wang

سیاست‌های چین تا سال ۲۰۳۰ را بررسی کردند و با استفاده از نرم‌افزار LEAP آثار اجرای سیاست‌های محیطی و سیاست‌های انرژی جدید را مورد بررسی قرار دادند.

یک مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه (۲۰۱۰) با عنوان «بهینه‌سازی چندهدفه برای بهره‌برداری از سیستم‌های انرژی توزیع‌شده با توجه به جنبه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی» از سوی رن[1] و همکارانش پیشنهاد شده، که استراتژی بهره‌برداری بهینه از منابع تعیین شود؛ و رابطهٔ متقابل بین اقتصاد (حداقل کردن هزینهٔ انرژی سالانه) و محیط زیست (حداقل کردن انتشار کربن دی اکسید) را آشکار می‌کند.

سامپایو[2] و همکارانش (۲۰۱۳) در مقاله‌ای با عنوان «برنامه‌ریزی انرژی پایدار شهر: نمونهٔ موردی یک شهر گرمسیری» به ارائهٔ یک ایستگاه عرضهٔ نیروی برق متمرکز در شهر، که ترکیبی از فنّاوری ممکن از جمله نیروگاه‌های حرارتی، نیروگاه برق آبی، سیستم‌های باد، و سیستم‌های مبتنی بر انرژی خورشیدی طی سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۲۰ است، با الگوی انتشار مربوطه به آن‌ها می‌نمایند. مدل بهینه‌سازی چندهدفهٔ آرمانی برای تجزیه و تحلیل گسترش برق شهر گرمسیری گواراتینگوتا[3] در برزیل ارائه شد. همچنین با توجه به الگوی سرعت باد و تابش خورشید از طریق روش تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی سناریوهای ارائه‌شده و نتایج هدف محیط زیست، هدف اقتصادی هر کدام به طور جداگانه بررسی شده است. دربارهٔ نتایج هر تصمیم، با لحاظ انتشار آلاینده به اطراف و نیاز به مکمل برق با خرید آن از شبکهٔ برق، بحث شده است.

شریفی و همکاران (۱۳۸۸) در مقاله‌ای با عنوان «تأثیر یادگیری فنی بر توسعهٔ فنّاوری‌های انرژی‌های تجدیدپذیر در بخش برق ایران در شرایط اختلالات قیمت انرژی» به بررسی تأثیر یادگیری فنی بر سهم و جایگاه انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌ویژه انرژی بادی و خورشیدی، در تولید برق کشور در شرایط یارانه‌ای بودن قیمت‌های انرژی و در صورت حذف یارانه‌ها پرداختند. در این زمینه، بخش برق کشور در قالب یک «سیستم مرجع انرژی» و با استفاده از مدل برنامه ریزی انرژی «مارکال» مدل سازی شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد، با وجود فرض یادگیری فنی، فنّاوری‌های تجدیدپذیر

1. Ren
2. Sampaio
3. Guaratinguetá

فاقد توان رقابت با سایر فنّاوری‌های رایج در بازار است، لذا هزینه‌های دولت برای پرداخت یارانهٔ حامل‌های انرژی نوعی اثر «برون‌رانی» به همراه دارد و موجب می‌شود سرمایه‌گذاری در فنّاوری‌های جدید کاهش یابد.

کاظمی و همکاران (۱۳۹۰) در مقاله‌ای با عنوان «ارائهٔ یک مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه برای تخصیص بهینهٔ منابع انرژی ایران» تخصیص بهینهٔ منابع انرژی کشور به بخش‌های مختلف خانگی، تجاری، حمل و نقل، صنایع، کشاورزی، صادرات، تزریق به مخازن نفتی و نیروگاه‌ها به عنوان تولیدکنندهٔ انرژی ثانویه را بررسی کردند. در این راستا اهداف سیاسی، اقتصادی، و زیست‌محیطی نیز مورد توجه قرار گرفتند. با توجه به اجرا شدن طرح هدفمند کردن یارانه‌ها، تخصیص منابع نفت و گاز به بخش‌های مختلف مصرف طی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ بررسی شده است.

شریفی و همکاران (۱۳۹۲) مقاله‌ای با عنوان «ارزیابی جایگزینی انرژی‌های تجدیدپذیر به جای سوخت‌های فسیلی در ایران: رهیافت کنترل بهینه» تألیف کردند که در این مقاله به منظور حداکثر کردن رفاه اجتماعی، یک مدل کنترل بهینه طراحی کردند و با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک مسیرهای بهینهٔ جایگزینی انرژی خورشید و باد به جای سوخت‌های فسیلی طی زمان در ایران ارائه شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد در صورت ثابت ماندن هزینهٔ تبدیل انرژی خورشیدی و بادی و در نظر گرفتن نرخ تنزیل اجتماعی ۵٪، انتقال از انرژی‌های فسیلی به سمت انرژی خورشیدی و بادی با فرض کاهش ۵۰ درصدی هزینهٔ تبدیل انرژی خورشید و باد در هر ده سال، این انتقال در سال ۱۴۰۹ (۲۰ سال پس از سال مبنا) می‌بایست صورت پذیرد.

مدل چندهدفهٔ برنامه‌ریزی آرمانی

برنامه‌ریزی آرمانی راه حرکت هم‌زمان به سوی چندین هدف را نشان می‌دهد. مبنای کار چنین است که در این روش اهداف از طریق وضع یک سری مقاصد خاص با جهت‌گیری و زمان‌بندی مشخص تبدیل به آرمان شده و سپس بر اساس میزان اهمیتشان اولویت‌بندی می‌شود. در این زنجیره، انحراف‌ها به گروهی از متغیرها تبدیل می‌شود که فاصلهٔ میان مقاصد تعیین‌شده و دست‌یابی واقعی به اهداف را نشان می‌دهد.

اولویت آرمان‌ها از طریق مغایرت در سطح برتری آن‌ها معین می‌شود که غالباً از آن به عنوان «تابع هدف» یاد می‌شود (سامپایو، ۲۰۱۲: ۹۲۴).

در مدل برنامه‌ریزی آرمانی، یک سری معادلات محدودیت بر روی تابع اهداف اولیه اعمال می‌شود و تابع هدف جدید با در نظر گرفتن انحراف بیشتر و انحراف کمتر در دست‌یابی به اهداف در نظر گرفته شده کمینه‌سازی می‌شود. از آن‌جا که انحراف مثبت و منفی هم‌زمان برای یک آرمان غیرممکن است، حاصل ضرب d^+ یا d^- باید صفر باشد (d^- $d^+=0$). تابع عمومی برنامه‌ریزی آرمانی که انحراف بیشتر یا انحراف کمتر در دست‌یابی به اهداف (d^+ و d^-) را وزن‌دهی (g^+ و g^-) می‌کند در معادلهٔ ۱ نشان داده شده است.

$$MinA=\left\{g_1\left(d_1^-,d_1^+\right),g_2\left(d_2^-,d_2^+\right),...g_k\left(d_k^-,d_k^+\right)\right\} \quad (1)$$

تابع هدف برنامه‌ریزی آرمانی که برای شهرستان اصفهان در نظر گرفته شده در معادلهٔ ۲ نشان داده شده است. برای هر تصمیم‌گیری انحراف‌های نامطلوب از متغیرها در نظر گرفته شده است که در تابع هدف به علت ناهمگونی انحراف‌ها، به گونه‌ای وزن‌دهی شده است که همهٔ انحراف‌ها ارزش پولی (دلار) پیدا کنند. انحراف‌هایی که از نظر پژوهشگر مطلوب بوده با وزن صفر خنثی نشان داده شده است (که این مقدار می‌تواند بسته به درک تصمیم‌گیرنده از مسئله متفاوت باشد).

$$Min\sum_{۲۰۱۵}^{۲۰۲۵}\left(g_1v_j^-+g_2f_j^-+g_3e_j^++m_j^-\right) \quad (2)$$

v_j^-: انحراف مثبت از آرمان زیست‌محیطی CO_2 که با وزن g_1، ۰/۳۹۲۵، هزینهٔ کاهش آلایندگی یک کیلوگرم CO_2 (اسدی، ۱۳۸۸: ۲۰۰) وزن داده می‌شود.

f_j^- : انحراف مثبت از آرمان زیست‌محیطی No_x که با وزن g_2، ۵/۳۲۵، هزینهٔ کاهش آلایندگی یک کیلوگرم No_x (همان) وزن‌دهی می‌شود.

e_j^+: انحراف منفی از آرمان انرژی الکتریکی که با وزن g_3، ۰/۰۰۴۶، هزینهٔ متغیر تأمین برق از شبکه (دپارتمان انرژی امریکا، ۲۰۱۲: ۶) وزن داده می‌شود.

m_j^-: انحراف مثبت از آرمان هزینه است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان انحراف‌های مثبت از آرمان‌های زیست‌محیطی جزو وزن‌های اصلی هستند، زیرا به علت گسترش مسائل زیست‌محیطی جزو آثار منفی

زیست‌محیطی محسوب می‌شود که باعث تخریب و تنزل و همچنین ایجاد هزینه‌های اجتماعی می‌شود؛ به همین علت در تابع هدف تعریف و مینیمم می‌شود. همچنین برای ایجاد وزن همگون این دو متغیر با دیگر متغیر ها در تابع هدف، به‌ترتیب در هزینهٔ کاهش آلایندگی یک کیلوگرم CO_2 و No_x ضرب شده است که بتواند به‌راحتی با دیگر متغیرها قابل مقایسه باشد و به میزان ارزش پولی‌شان مینیمم شود.

همین طور، میزان انحراف منفی از آرمان انرژی (نشان‌دهندهٔ کمبود عرضه) در میزان هزینهٔ شبکهٔ برق منطقه با احتساب قیمت جهانی سوخت‌های فسیلی به ازای یک کیلووات ساعت وزن‌دهی شده است. دیگر انحرافات وزن‌های خنثی هستند (از این رو در معادلهٔ ۲ ارائه نشده‌اند).

هر متغیر برای سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ مدل‌سازی شده که به صورت $j_{2015\text{-}2025}$ و برای سه تکنولوژی جدید به‌ترتیب، خورشیدی، بادی، و گازی به صورت k=1,2,3 نشان داده شده است. برای حل مسئله از نرم‌افزار GAMS استفاده شده است.

در مدل برنامه‌ریزی برای تابع هدف یک سری قیود طرح می‌شود که به منزلهٔ محدودیت‌های مدل برنامه‌ریزی انرژی به شکل ذیل مطرح می‌شوند.

رابطهٔ ۳ آرمان اقتصادی را نشان می‌دهد که در این رابطه طرف راست معادله هزینهٔ فناوری‌های جدید و طرف چپ آن هزینه‌های ناشی از شبکه به مقدار مصرف انرژی در شهرستان اصفهان را نشان می‌دهد.

$$\sum_{۲۰۱۵}^{۲۰۲۵}\left(E_{kj}.C_{kj}\right)+I_{kj}+\left(m_j^{+}-m_j^{-}\right)=\left(D_j.C_{grid}\right)+\left(a_{grid}.\frac{D_j}{۸۷۶۰}\right)\quad k=۱,۲,۳ \qquad (۳)$$

E_{kj}: انرژی تولیدی سالانه برای Kامین فنّاوری تولیدکنندهٔ انرژی برق در سال jام؛

C_{kj}: میزان هزینه‌های متغیر ناشی از تولید سالانه (دلار بر حسب کیلووات ساعت)؛

I_{kj}: هزینه‌های خواب سرمایه در فنّاوری kام در سال jام (دلار)[۱]؛

D_j: تقاضای مصرف سالانهٔ شهرستان اصفهان (بر حسب کیلووات ساعت در سال)[۲]؛

C_{grid}: تعرفهٔ عمومی شبکهٔ انرژی برق (دلار بر حسب کیلووات ساعت)؛

Agrid: ضریب هزینهٔ خواب شبکهٔ برق به میزان تقاضای مصرفی در شهرستان اصفهان (دلار بر کیلووات).

معادلات ۴ و ۵ نشان‌دهندهٔ آرمان زیست‌محیطی است که طرف چپ معادله میزان انتشار آلاینده‌های CO_2 و NO_x از جمع تکنولوژی‌های خورشیدی، بادی، و گازی است و طرف راست معادله میزان انتشار آلاینده‌های CO_2 و NO_x ناشی از شبکهٔ برق به میزان تأمین تقاضای مصرفی برق شهرستان (D_j) است.

Cokj و NO_{kj}: ضریب انتشار CO_2 و NO_x در سال jام برای هر یک از فناوری‌های جدید (بر حسب کیلوگرم بر کیلووات)؛

---

۱. به این صورت که برای به دست آوردن سرمایهٔ استفاده‌شده در نیروگاه‌ها (فسیلی و غیرفسیلی) نیز می‌توان میزان ظرفیت اسمی نیروگاه را در ضریب خواب سرمایه ضرب کرد. البته این ضرایب در هر سال تغییر خواهند کرد که در نیروگاه‌ها بسته به نوع تکنولوژی به کار گرفته شده ضریب متفاوتی در نظر گرفته می‌شود. با توجه به داده‌های تخمین‌زده‌شده از سوی دپارتمان انرژی امریکا، ضریب هزینهٔ سرمایه برای تکنولوژی‌های خورشیدی و بادی با نرخ رشد کاهنده ۰/۰۲۲- و ۰/۰۶۷۳- در سال های آینده برآورد می‌شود و برای نیروگاه‌های حرارتی و گازی به‌ترتیب ۰/۰۲ و ۰/۰۲۳۱- است. گفتنی است برای تخمین هزینه‌های سرمایه‌ای شبکه از ضرایب هزینهٔ سرمایهٔ مربوط به نیروگاه‌های حرارتی استفاده می‌کنیم.

۲. برای برآورد این پارامتر، مصرف انرژی الکتریکی در سال های قبلی مورد ارزیابی قرار گرفته و با استفاده از این اطلاعات برای چند سال آتی پیش‌بینی‌هایی بر مبنای فرمول رشد $y_t = y_0 \cdot e^{gt}$ صورت پذیرفته است. که y_t میزان تقاضا در سال t ام، y_0 میزان تقاضا در سال پایه، g نرخ رشد و t زمان مورد نظر است. البته این فرم از سناریوسازی فقط به منظور به دست آوردن میزان عرضهٔ سال‌های آتی بوده و چندان از نظر دقت پیش‌بینی مورد توجه نیست؛ چرا که اگر هدف ارائهٔ پیش‌بینی دقیق باشد لازم است عناصر مختلف تقاضا مانند قیمت، رجحان‌های مصرف‌کننده و کالاهای جانشین را ابتدا در محاسبات وارد کرده و با ارائهٔ مدل‌های مبتنی بر نظریه‌های تقاضا اقدام به پیش‌بینی نماید. به همین علت برای پیش‌بینی مصرف در شهرستان اصفهان در ۱۰ سال آینده از داده‌های تعداد مشترکان و میزان متوسط سالانه طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۳ استفاده می‌کنیم و میزان مصرف سالیانهٔ شهرستان اصفهان را به دست می‌آوریم. با توجه به این‌که نرخ رشد مورد نظر در طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ برای تعداد مشترکان و متوسط مصرف سالانه به‌ترتیب ۰/۰۴۶۷ و ۰/۰۲۴- است، به برآورد تقاضای مصرفی به منظور میزان عرضهٔ انرژی الکتریکی در شهرستان اصفهان می‌پردازیم.

Cco_j و CNo_{kj}: ضریب انتشار CO_2 و NO_x از شبکهٔ برق منطقه (بر حسب کیلوگرم بر کیلووات)؛

$$\sum_{۲۰۱۵}^{۲۰۲۵} E_{kj}.\left(CO_{kj}\right)+\left(\nu_j^+-\nu_j^-\right)=D_j.\left(CCo_{kj}\right) \quad k=۱,۲,۳ \qquad (۴)$$

$$\sum_{۲۰۱۵}^{۲۰۲۵} E_{kj}.\left(NO_{kj}\right)+\left(f_j^{\ +}-f_j^{\ -}\right)=D_j.\left(CNo_{kj}\right) \quad k=۱,۲,۳ \qquad (۵)$$

معادلهٔ ۶ آرمان انرژی بیان می‌دارد که مجموع انرژی تولیدی سالانه (E_{kj}) از فنّاوری‌های جدید و انحراف‌های مثبت (e^+_j) و منفی (e^-_j) در دست‌یابی به هدف متناظر باید مطابق با کل مصرف سالانهٔ انرژی (D_j) در شهرستان اصفهان باشند.

$$\sum_{۲۰۱۵}^{۲۰۲۵} E_{kj}+\left(e_j^+-e_j^-\right)\le D_j \quad k=۱,۲,۳ \qquad (۶)$$

در این پژوهش محدودیت‌های سیستمی مدل برنامه‌ریزی آرمانی به صورت محدودیت های فنی، کاربردی، و زیست محیطی مرتبط با فنّاوری‌های مورد نظر برای تولید انرژی در معادلات ۷ تا ۲۱ در نظر گرفته شده‌اند.

در این مطالعه، با استفاده از رابطه‌های ۷ و ۸ به‌ترتیب استفاده از صفحات فتوولتائیک، تعداد توربین‌های بادی به حداقل میزان موجود در شهر اصفهان و حداکثر استفاده‌شده در ایران محدود می‌شود. با توجه به معادلهٔ ۹ حداکثر ظرفیت نیروگاه گازی به میزان ۹۷۵۰۰۰ (حداکثر ظرفیت نیروگاه گازی موجود در کشور) فرض شد (مطالعات دپارتمان انرژی امریکا، ۲۰۱۲: ۷). در معادلهٔ ۱۰ متوسط تولید سالانهٔ انرژی فتوولتائیک برای یک صفحهٔ خورشیدی محاسبه می‌شود که توان پانل (۴۰ وات) در $I_{avg}\left(j\right)$، میزان متوسط تابش خورشید در روز است. در معادلهٔ ۱۱ متوسط تولید سالانهٔ انرژی بادی به وسیلهٔ یک توربین محاسبه می‌شود با فرض A، سطح جاروب‌شده به وسیلهٔ پره‌های توربین، ρ، چگالی هوا، و $\boldsymbol{v}_j^{\ ۳}$، مکعب متوسط سرعت سالانهٔ باد بر حسب (m/s). معادلات ۱۲ و ۱۳ حداکثر انرژی قابل استحصال برای هر یک از فنّاوری‌های تولید انرژی به‌ترتیب سیستم‌های فتوولتائیک، نیروی بادی، و گاز طبیعی را نشان می‌دهند. HPY میزان حداکثر ساعت کارکرد سالانهٔ نیروگاه‌ها را نشان می‌دهد. برای نیروگاه‌های خورشیدی ۲۹۶۰ و بقیهٔ نیروگاه‌ها ۸۷۶۰ ساعت در نظر گرفته می‌شود. FC_k ضریب ظرفیت نیروگاه‌هاست. برای سیستم‌های فتوولتائیک ۰/۳۰، سیستم‌های بادی ۰/۳۰، و گاز طبیعی ۰/۴۵ در نظر گرفته شد. در

رابطه‌های ۱۴ و ۱۵ میزان ظرفیت نیروگاه‌های خورشیدی و بادی بر حسب متوسط تابش خورشیدی و سرعت باد به دست می‌آید.

$$۱۰۰ < NP < ۸۱۶۳ \quad (۷)$$

$$۱ < NT < ۱۲۷ \quad (۸)$$

$$۳۴۰۰۰۰ < P_j < ۹۷۵۰۰۰ \quad (۹)$$

$$E_{pv,avg}(j) = ۴۰ \times I_{avg} \times ۳۶۵/۱۰۰۰ \quad (۱۰)$$

$$E_{wind,avg}(j) = \left(\frac{۱}{۲} t.pv^{۳}(j).\mathrm{A}\right).\frac{۳۶۵}{۱۰۰۰} \quad (۱۱)$$

$$E_{wind,avg}(j) = \left(\frac{۱}{۲} pv^{۳}(j).\mathrm{A}\right).۳۶۵/۱۰۰۰ \quad (۱۵-۳)$$

$$E_{kj} < .H_{k,j}.HPY.FC_k \quad k = ۱,۲ \quad (۱۲)$$

$$E_{kj} < .P_j.HPY.FC_k \quad k = ۳ \quad (۱۳)$$

$$H_{۱j} = NP_j * E_{pv,avg}(j) \quad (۱۴)$$

$$H_{۲j} = NT_J * E_{wnd,avg}(j) \quad (۱۵)$$

تولید انرژی سیستم‌های مبتنی بر انرژی خورشید و باد به میزان و شدت تابش خورشید و باد بستگی دارد. در این شرایط تابش خورشید یا سرعت باد مانند سوخت نیروگاه‌های فسیلی عمل می‌کند. بر این اساس، با توجه به میزان حداقل و حداکثر تابش خورشید و سرعت باد در سال و با استفاده از رابطه‌های ۱۶ تا ۱۹ میزان حداقل و حداکثر انرژی قابل استحصال از ظرفیت نیروگاه خورشیدی و نیروگاه بادی محاسبه شده است. بر اساس مقدار حداقل و حداکثر تشعشع خورشیدی و سرعت باد روزانه در سال بر اساس مدل پیش‌بینی تشعشع خورشیدی محاسبه می‌شود.

$$E_{۱j} > E_{pv,\min}.NP_j.HPY.Fc_k \quad (۱۶)$$

$$E_{۱j} < E_{pv,\max}.NP_j.HPY.Fc_k \quad (۱۷)$$

$$E_{۲j} > E_{wind,\min}.NT_j.HPY.Fc_k \quad (۱۸)$$

$$E_{۲j} < E_{wind,\max}.NT_j.HPY.Fc_k \quad (۱۹)$$

هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای هر تکنولوژی را به صورت زیر محاسبه می‌نماییم که با استفاده از رابطه‌های ۲۰ و ۲۱ میزان ضریب هزینهٔ خواب سرمایهٔ سیستم‌های فتوولتائیک، بادی، و گازی (a_{kj}) در میزان ظرفیت این نیروگاه‌ها ضرب می‌شود و میزان سرمایهٔ اولیه برای احداث به دست خواهد آمد.

$$I_{k,j} = \alpha_{k,j}.H_{k,j} \quad k = ۱,۲ \tag{۲۰}$$

$$\begin{aligned} I_{k,j} &= \alpha_{k,j}.H_{k,j} \quad k = ۱,۲ \\ I_{k,j} &= \alpha_{k,j}.P_{k,j} \quad k = ۳ \end{aligned} \tag{۲۱}$$

برآورد پتانسیل انرژی خورشیدی و بادی در شهرستان اصفهان

برای برآورد پتانسیل تولید انرژی فتوولتائیک یا بادی در شهرستان اصفهان از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵، با استفاده از سری‌های فصلی، تشعشع خورشیدی و سرعت بادی در ۵ سال گذشته، با استفاده از مدل ARIMA (خود رگرسیون میانگین متحرک انباشته)، ورد تجزیه و تحلیل شد. با توجه به آزمون ریشهٔ واحد و مانا شدن متغیرها در تفاضل مرتبهٔ اول، نتایج حاصل از تخمین بیان می‌کند که مدل تابش خورشیدی سه ماه اول سال از نوع ARIMA(2,1,2) و سه ماههٔ دوم از نوع ARIMA(2,1,3) و سه ماههٔ سوم از نوع ARIMA(2,1,3) و سه ماههٔ چهارم از نوع ARIMA(2,1,3) است و مدل سرعت باد سه ماه اول سال از نوع ARIMA(1,1,1) و سه ماههٔ دوم از نوع ARIMA(1,1,1) و سه ماههٔ سوم از نوع ARIMA(1,1,3) و سه ماههٔ چهارم از نوع ARIMA(4,1,0) است. با توجه به مدل تخمین زده شده برای سه ماههٔ اول تا سه ماههٔ چهارم، تابش خورشیدی به‌ترتیب با معادلات ۲۲ تا ۲۵ نمایش داده شده است. برای سه ماههٔ اول تا چهارم سرعت بادی به‌ترتیب با معادلات ۲۶ تا ۲۹ بیان شده است.

$$y_t^{۱} = y_{t-۱} - ۰/۳۴۸ y_{t-۲} + ۰/۳۴۸ \tag{۲۲}$$

$$y_t^{۲} = y_{t-۱} - ۰/۴۷۱ y_{t-۲} + ۰/۴۷۱ y_{t-۳} \tag{۲۳}$$

$$y_t^{۳} = y_{t-۱} - ۰/۲ y_{t-۲} + ۰/۲ y_{t-۳} \tag{۲۴}$$

$$y_t^{۴} = y_{t-۱} - ۰/۴۲۵ y_{t-۲} + ۰/۴۲۵ y_{t-۳} \tag{۲۵}$$

$$y_t^{۱} = ۰/۰۵۲ + ۰/۳۹۲ y_{t-۱} + ۰/۶۰۸ y_{t-۲} \tag{۲۶}$$

$$y_t^{۲} = y_{t-۱} - ۰/۵۱۵ y_{t-۱} + ۰/۵۱۵ y_{t-۲} \quad (۲۷)$$

$$y_t^{۳} = y_{t-۱} - ۰/۷۱۵ y_{t-۱} + ۰/۷۱۵ y_{t-۲} \quad (۲۸)$$

$$y_t^{۴} = y_{t-۱} - ۰/۲۷۲ y_{t-۴} + ۰/۲۷۲ y_{t-۵} \quad (۲۹)$$

پس از به دست آوردن سری‌های فصلی سالیانه برای سال‌های آتی، متوسط میزان تابش خورشیدی و سرعت باد را به طور سالیانه به دست می‌آوریم و پس از آن طبق رابطه‌های ۱۰ و ۱۱ به برآورد تولید انرژی الکتریکی به وسیلهٔ هر پانل خورشیدی و هر توربین بادی می‌پردازیم.

نتایج حاصل از اجرای مدل

۱. تقاضا و میزان عرضهٔ بهینهٔ سالانه برای تکنولوژی‌های جایگزین

برای بهتر مشخص شدن ترکیب بهینهٔ اقتصادی و زیست‌محیطی از فنّاوری‌های تولید توان الکتریکی برای تأمین تقاضای سالانه در سطح شهرستان اصفهان جدول ۱ ارائه شده است که میزان تقاضا و تولید بهینهٔ انرژی الکتریکی به وسیلهٔ هر یک از فنّاوری‌ها در سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ در آن ذکر شده است.

جدول ۱. نتایج بهینه‌یابی مدل برنامه‌ریزی آرمانی (هزارمگاوات ساعت)

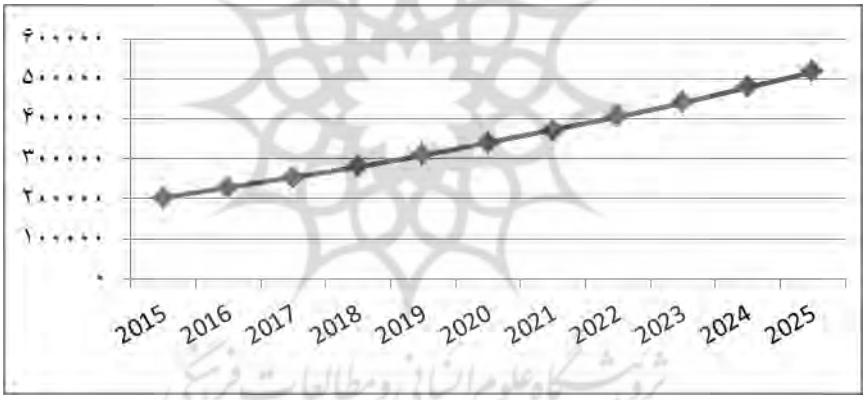
سال	فتوولتائیک	بادی	گازی	شبکهٔ برق	تقاضا
۲۰۱۵	۲۰۲/۴۱۷۷	۱۷/۸۶۳۲۱	۳۹۳۰/۱۷۴	۳۸۰/۴۴۰۷	۴۵۳۰/۸۹۵۶۱
۲۰۱۶	۲۲۷/۷۷۳۷	۱۶/۳۳۸۷۸	۳۹۳۰/۱۷۴	۴۶۰/۶۳۶۸	۴۶۳۵/۴۶۳۲۱
۲۰۱۷	۲۵۲/۸۳۳۱	۱۸/۸۶۴۶۳	۳۹۳۰/۱۷۴	۴۶۸۴/۵۳۹	۴۷۴۱/۳۳۹۲۳
۲۰۱۸	۲۸۱/۰۰۵۱	۱۷/۱۰۷۵۱	۳۹۳۰/۱۷۴	۶۲۱/۹۰۹۵	۴۸۵۰/۱۹۸۵۶
۲۰۱۹	۳۰۸/۹۸۱۶	۱۹/۵۸۴۷۱	۳۹۳۰/۱۷۴	۷۰۲/۴۱۴۵	۴۹۶۱/۱۵۵۷۳
۲۰۲۰	۳۴۰/۱۲۲۳	۱۷/۶۵۴۹۹	۳۹۳۰/۱۷۴	۷۸۷/۵۲۱۲	۵۰۷۵/۴۷۲۵۲۵
۲۰۲۱	۳۷۱/۲۹۵۸	۲۰/۱۰۲	۳۹۳۰/۱۷۴	۸۷۰/۴۳۱۶	۵۱۹۲/۰۰۳۳۳
۲۰۲۲	۴۰۵/۹۲۹۵	۱۸/۰۴۳۴۸	۳۹۳۰/۱۷۴	۹۵۷/۰۶۹۷	۵۳۱۱/۲۰۹۴۲
۲۰۲۳	۴۴۰/۱۲۷۲	۲۰/۴۷۴۱۶	۳۹۳۰/۱۷۴	۱۰۴۱/۶۳۴	۵۴۳۳/۱۵۳۴۲
۲۰۲۴	۴۷۸/۷۱۶۱	۲۰/۳۱۸۳۴	۳۹۳۰/۱۷۴	۱۱۳۰/۶۶۸	۵۵۵۷/۸۹۳۷
۲۰۲۵	۵۱۷/۹۶۲۵	۲۰/۷۴۲۸۶	۳۹۳۰/۱۷۴	۱۲۱۶/۷۹	۵۶۸۵/۵۰۳۳

مأخذ: نتایج پژوهشگر

۲. انرژی قابل استحصال از نیروگاه فتوولتائیک

در واقع برای استفاده از انرژی فتوولتائیک ابتدا باید به میزان تابش خورشید در منطقه توجه داشت که استفاده از نیروگاه‌های فتوولتائیک علاوه بر صرفهٔ اقتصادی کارکرد مناسب داشته باشند.

به همین دلیل، با بررسی میزان تابش خورشید در شهرستان اصفهان و برآورد متوسط آن به میزان ۵ کیلووات ساعت بر مترمربع در روز می‌توان نتیجه گرفت برای تولید انرژی الکتریکی پانل‌های خورشیدی در سال می‌تواند مناسب باشد. با توجه به نحوهٔ محاسبهٔ تولید متوسط سالانهٔ هر پانل و مدل ارائه‌شده میزان بهینهٔ تولید انرژی فتوولتائیک از نیروگاه خورشیدی به منظور تأمین قسمتی از تقاضا در ۱۰ سال آینده به طور سالانه در شکل ۱ ارائه شده است. همان طور که مشخص است میزان استفاده از انرژی قابل استحصال از نیروگاه خورشیدی رو به افزایش است.

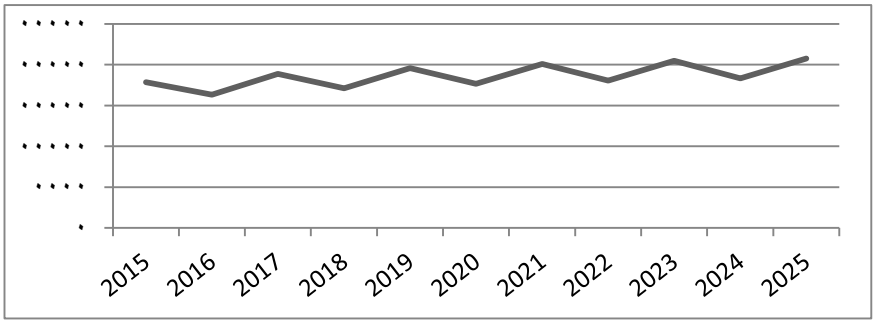


شکل ۱. انرژی قابل استحصال از نیروگاه خورشیدی (مگاوات ساعت)

۳. انرژی قابل استحصال از نیروگاه بادی

با توجه به متوسط سرعت باد در سال، به میزان ۲/۵ متر بر ثانیه، می‌توان میزان انرژی قابل استحصال از نیروگاه بادی را به طور سالانه به دست آورد. در کل می‌توان گفت که این میزان با نرخ رشد کمی در حال افزایش است. گفتنی است که نوسانات نشان داده شده در شکل ۲ به دلیل تغییرات متوسط سالانهٔ سرعت باد پیش‌بینی‌شده است، به این

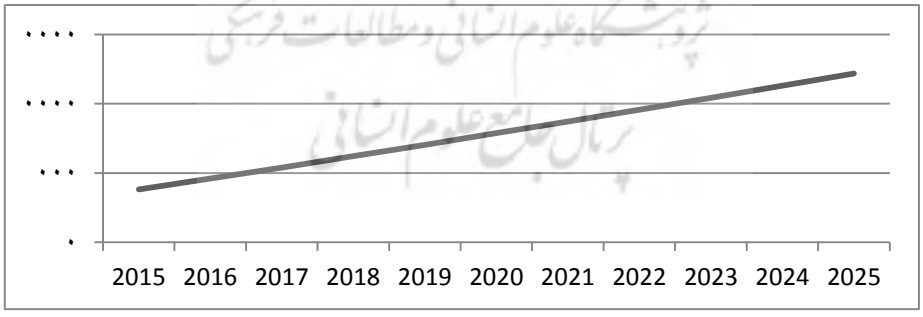
علت که میزان انرژی قابل استحصال از نیروگاه بادی طبق رابطهٔ ۱۱ تابع مکعب سرعت باد است.



شکل ۲. انرژی قابل استحصال از نیروگاه بادی (مگاوات ساعت)

۴. انرژی گرفته‌شده از شبکهٔ برق منطقهٔ اصفهان

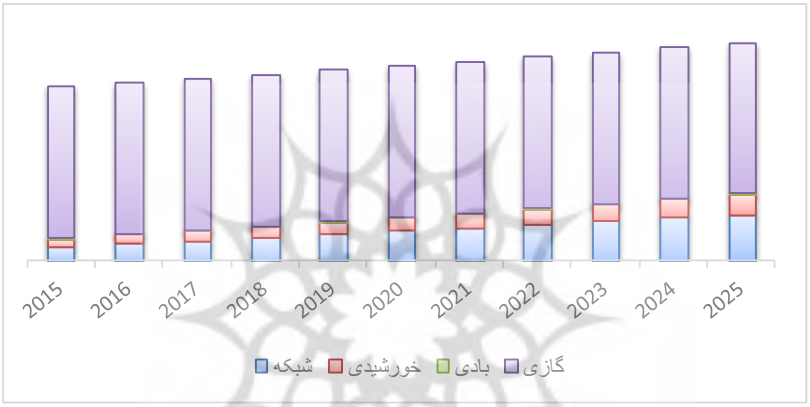
در شکل ۳ می‌توان میزان انرژی الکتریکی گرفته‌شده از شبکهٔ برق منطقهٔ اصفهان را مشاهده کرد. همان‌طور که نشان داده می‌شود، این مقدار طی زمان رو به افزایش است، به این علت که ظرفیت نیروگاه گازی به حداکثر خود رسیده است. پس به دلایل اقتصادی و زیست‌محیطی، قسمتی از میزان کمبود عرضه به وسیلهٔ شبکهٔ برق منطقه تأمین می‌شود و می‌توان گفت به دلیل افزایش روزافزون تقاضا، میزان انرژی الکتریکی گرفته‌شده رو به افزایش است.



شکل ۳. انرژی قابل استحصال از نیروگاه گازی (مگاوات ساعت)

۵. سهم تکنولوژی‌های تولید توان

در شکل ۴ سهم فناوری‌های گوناگون در سیستم عرضهٔ انرژی الکتریکی پیشنهاد سهم هر یک را نشان می‌دهد. گفتنی است که سهم انرژی بادی بسیار اندک است و در شکل ۴ به صورت واضح قابل تشخیص نیست. پرواضح است که نیروگاه گازی سهم عمده‌ای در سیستم عرضهٔ انرژی الکتریکی پیشنهادی دارد و پس از آن، به‌ترتیب شبکهٔ برق و نیروگاه خورشیدی تقاضای انرژی را بر عهده می‌گیرند.

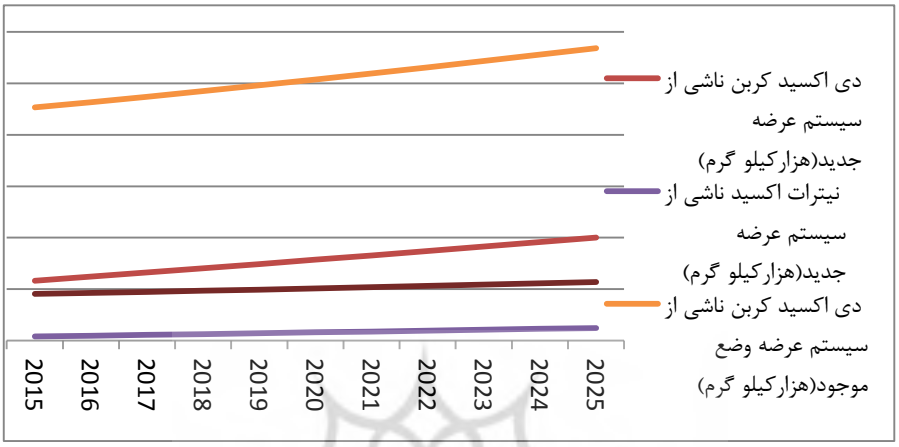


شکل ۴. سهم فنّاوری‌های گوناگون در عرضهٔ انرژی الکتریکی

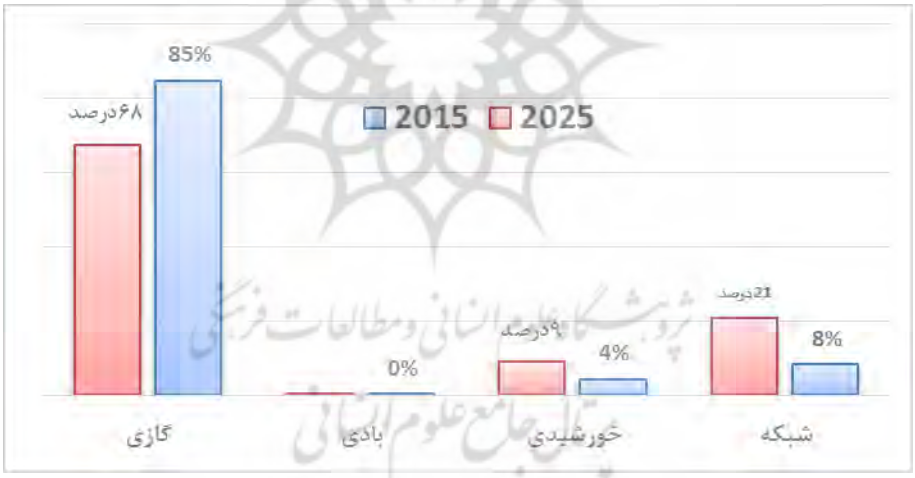
۶. انتشار گازهای گلخانه‌ای

یکی از محدودیت‌های اساسی استفاده از شبکهٔ برق انتشار گازهای گلخانه‌ای و ایجاد آلودگی‌های ناشی از نیروگاه‌های بخاری و حرارتی است. حتی اگر بپذیریم که سوخت‌های فسیلی نسبت به منابع تجدیدپذیر قیمت کمتری دارند، استانداردهای زیست‌محیطی اجازهٔ استفاده از آن‌ها را نخواهند داد؛ زیرا استفادهٔ بیش از اندازهٔ آن‌ها باعث می‌شود چگالی گازهای گلخانه‌ای از حد مجاز فراتر برود و این بار نه به دلیل اقتصادی بلکه به دلیل محدودیت‌های زیست‌محیطی استفاده از سوخت‌های فسیلی محدود می‌شود. به همین دلیل موضوع انتشار گازهای گلخانه‌ای و روند افزایش آن از مهم‌ترین ملاحظاتی است که در برنامه‌ریزی‌های عرضهٔ انرژی باید به آن پرداخته شود.

در نتیجهٔ این بهینه‌یابی، میزان کاهش آلاینده‌های CO_2 و NO_x نسبت به وضع موجود در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. میزان انتشار آلاینده‌ها و مقایسهٔ آن‌ها در سیستم عرضهٔ جدید و وضع موجود



شکل ۶. مقایسهٔ سهم تولید انرژی در ابتدا و انتهای دورهٔ برنامه‌ریزی

نتیجه‌گیری

بر اساس آنالیز چندهدفهٔ بهینه‌سازی زیست‌محیطی و اقتصادی، مدل انرژی در طولانی‌مدت، نیروگاه گازی را در فاصلهٔ سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ با حداکثر ظرفیت پیشنهادی در نظر می‌گیرد؛ به این معنا که به میزان ۳۹۳۰۱۷۴۰۰۰ کیلووات ساعت تولید انرژی برای تأمین تقاضای مصرفی طی ۱۰ سال را دارد. سیستم مبتنی بر انرژی خورشیدی (فتوولتائیک) به میزان ۲۰۲۴۱۷۷۰۰ کیلووات ساعت از عرضهٔ انرژی الکتریکی را در سال ۲۰۱۵ بر عهده می‌گیرد و تا سال ۲۰۲۵ به ۵۱۷۷۹۶۲۰۰ کیلووات ساعت عرضه خواهد رسید. نیروگاه بادی به علت کم بودن سرعت باد و زیاد بودن هزینه‌های سرمایه‌ای در سال ۲۰۱۵ میزان ۱۷۸۶۳۲۱۰ کیلووات ساعت تولید انرژی داشته و تا سال ۲۰۲۵ به ۲۰۷۴۲۸۶۰ می‌رسد. جالب توجه است که برای جبران کمبود میزان عرضهٔ انرژی برای تأمین تقاضا به صرفه است که به میزان ۴۵۳۰۸۹۵۶۱۰ کیلووات ساعت در سال ۲۰۱۵ و ۱۳۶۸۶۷۲۰۰۰ کیلووات ساعت در سال ۲۰۲۵ از شبکهٔ برق منطقه واردات برق داشته باشیم.

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، با لحاظ آرمان اقتصادی و آرمان زیست‌محیطی می‌توان گفت برای جبران کمبود عرضهٔ هر سال میزان ظرفیت نیروگاه خورشیدی و تأمین از شبکهٔ برق بالاتر رفته و میزان استفاده از انرژی بادی تقریباً ثابت است و این نشان‌دهندهٔ این است که برای تأمین تقاضای مصرفی در سطح شهرستان اصفهان نیروگاه گازی و نیروگاه خورشیدی از لحاظ اقتصادی و زیست‌محیطی به‌صرفه‌تر است و باید در اولویت‌های سیاست‌های سرمایه‌گذاری باشد.

نتایج بهینه‌یابی نشان می‌دهد، با همان میزان سرمایه‌گذاری به میزان عرضهٔ انرژی الکتریسیته خواهد رسید، علاوه بر این‌که تقاضای مورد نظر ما در سطح شهرستان اصفهان را تأمین می‌کند به کاهش آلاینده‌هایی مانند Co_2 و NOx منجر می‌شود. در حالت جزئی‌تر می‌توان گفت که میزان کاهش آلایندهٔ Co_2 نسبت به وضع موجود بسیار بیشتر از NOx بوده است. در این شرایط می‌توان انتظار داشت انتشار آلاینده‌ها کاهش یابد.

در مجموع می‌توان گفت، ضریب انتشار آلایندگی کم و هزینهٔ سرمایه‌گذاری به نسبت پایین و میزان وفور گاز طبیعی از مزیت‌های نیروگاه گازی بوده و همان‌طور که

انتظار می‌رفت در آنالیز نتایج این بهینه‌یابی از حداکثر ظرفیت تعریف‌شده در همان سال اول استفاده شده است. دربارهٔ نیروگاه بادی می‌توان گفت، به دلیل وجود سرعت کم در منطقهٔ مورد نظر و بالا بودن هزینهٔ سرمایه‌گذاری، میزان استفاده از این انرژی بسیار ناچیز است. دربارهٔ نیروگاه فتوولتائیک می‌توان گفت، چون اصفهان از تابش به نسبت بالایی برخوردار است و ضریب انتشار آلایندگی این فنّاوری صفر است، با وجود هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری استفاده از آن توجیه‌پذیر است.

در نهایت ساختار بهینهٔ سیستم عرضهٔ انرژی در شهرستان اصفهان و میزان سهم هریک از تکنولوژی‌ها در ۱۰ سال آینده در شکل (۶) ارائه شده است.

۱. میزان سهم نیروگاه گازی در تأمین تقاضای مصرفی در سال ۲۰۱۵ به میزان ۸۲ درصد است. تا سال ۲۰۲۵ میزان ۱۹ درصد از سهم آن کاهش می‌یابد؛ به دلیل این‌که برای جبران عرضهٔ انرژی الکتریکی از افزایش ظرفیت نیروگاه خورشیدی و تأمین تقاضا از شبکهٔ برق صورت می‌پذیرد.

۲. سهم بهینهٔ استفاده از نیروگاه‌های خورشیدی و بادی به میزان ۲ درصد در سال‌های اولیه است که این میزان تا سال ۲۰۲۵ به ۸ درصد افزایش می‌یابد. این نتیجه نقطهٔ عطفی است برای کاهش آلاینده های زیست‌محیطی ناشی از تولید برق. به دلیل وفور منابع سوخت‌های فسیلی و پایین بودن هزینه‌های سرمایه‌گذاری در ایران در ۱۰ سال آینده بیشتر از ۱۰ درصد از عرضهٔ انرژی در سطح شهرستان را نمی‌توان به این نوع منابع اختصاص داد.

۳. در سال ۲۰۱۵ میزان سهم بهینهٔ شبکهٔ برق ۶ درصد است و به علت استفاده از حداکثر نیروگاه گازی در مدل افزایش تأمین تقاضا از شبکه، در سال ۲۰۲۵ این میزان به ۲۷ درصد افزایش می‌یابد.

۴. در مجموع می‌توان گفت با افزایش سهم منابع تجدیدپذیر و کاهش آلاینده‌های ناشی از آن می‌توان به یک سیستم عرضهٔ بهینه رسید، در واقع با همان میزان هزینهٔ سرمایه در وضع موجود می‌توان میزان آلایندگی ناشی از تولید برق را کاهش داد.

منابع

۱.اسدی، مرتضی (۱۳۸۸). «هزینهٔ خسارات آلودگی هوا و ضرورت اجرای مالیات سبز»، *فصل‌نامهٔ تخصصی مالیات*، دورهٔ جدید، شمارهٔ ۳، صفحات ۱۹۹–۲۳۴.

۲.رئیسی، محمدرضا و علی سمیعی (۱۳۸۰). «کاربرد روش A.H.P در ارزیابی زیست‌محیطی ـ اقتصادی پروژه‌های تولید انرژی الکتریکی»، در *مجموعه مقالات همایش کیفیت و بهره‌وری در صنعت برق*، صفحات ۲۶۹-۲۷۹.

۳.شریفی، علیمراد، کیومرث آقایی، مهدی صادقی شاهدانی، رحیم دلالی اصفهانی، و سعید شوالپور آرمانی (۱۳۸۸). «تأثیر یادگیری فنی بر توسعی فنّاوری‌های انرژی‌های تجدیدپذیر در بخش برق ایران در شرایط اختلالات قیمت انرژی»، *فصل نامه مطالعات اقتصاد انرژی*، سال ششم، شمارهٔ ۲۱، صفحات ۱۳۷–۱۶۰.

۴.شریفی، علیمراد، غلامحسین کیانی، رحمان خوش‌اخلاق، و محمدمهدی باقری (۱۳۹۲). «ارزیابی جایگزینی انرژی‌های تجدیدپذیر به جای سوخت‌های فسیلی در ایران: رهیافت کنترل بهینه»، *فصل‌نامهٔ تحقیقات مدل‌سازی اقتصادی ایران*، شمارهٔ ۱۱، صفحات ۱۲۳-۱۴۰.

۵.شفیعی، سیداحسان‌الدین و مجید فرمد (دی ۱۳۸۸). «مشخصات و چهارچوب کلی برنامه‌ریزی جامع انرژی»، هفتمین همایش ملی انرژی، صفحات ۷-۱.

۶.کاظمی، عالیه، محمدرضا مهرگان، و حامد شکوری گنجوی (۱۳۹۰). «ارائهٔ یک مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه برای تخصیص بهینهٔ منابع انرژی ایران»، *چشم‌انداز مدیریت صنعتی*، شمارهٔ ۳، صفحات ۴۳–۶۶.

۷.منظور، داوود و وحید ماجد (۱۳۹۰). «روش‌شناسی برنامه‌ریزی انرژی»، *نشریهٔ انرژی ایران*، سال چهاردهم، شمارهٔ ۳، صفحات ۷۵-۹۶.

8.Akella, A. K., M. P. Sharma, & R. P. Saini (2007). 'Optimum utilization of renewable energy sources in a remote area', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(5), 894-908.

9.EIA, U. (2012). The national energy modeling system: an overview, Retrieved March, 4, 2012.

10.EIA, U. (2015). Provides Updated Capital Cost Estimates for Electric Plants, Retrieved February 24, 2015.

11.MacGill, I., Passey, R., & T. Daly (2006). 'The limited role for Carbon Capture and Storage (CCS) technologies in a sustainable Australian energy future', *International journal of environmental studies*, 63(6), 751-763.

12.Hoog, D. T., & Hobbs, B. F. (1993). 'An integrated resource planning model considering customer value, emissions, and regional economic impacts', *Energy*, 18(11), 1153-1160.

13.Rehman, S., Bader, M. A., & Al-Moallem, S. A. (2007). 'Cost of solar energy generated using PV panels', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(8), 1843-1857.

14.Ren, H., Zhou, W., Nakagami, K. I., Gao, W., & Wu, Q. (2010). 'objective optimization for the operation of distributed energy systems considering economic and environmental aspects', *Applied Energy*, 87(12), 3642-3651.

15.Sampaio, H. C., Dias, R. A., & J. A. P. Balestieri (2013). 'Sustainable urban energy planning: The case study of a tropical city', *Applied Energy*, 104, 924-935.

16.Wang, Y., Gu, A., & A. Zhang (2011). 'Recent development of energy supply and demand in China, and energy sector prospects through 2030', *Energy Policy*, 39(11), 6745-6759.

17.World Commission on Environment and Development (WCED). (1987). Our Common Future, Report of the World Commission on Environment and Development.

پرتال جامع علوم انسانی