

ارائه الگویی جهت محاسبه هزینه اجتماعی نهایی کوتاه‌مدت تولید برق

در نیروگاه‌های حرارتی

مطالعه موردی نیروگاه‌های شهید محمد منتظری و اسلام آباد اصفهان

حامد پاروند^۲

علیمراد شریفی^۲

رحمان خوش اخلاق^۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۱/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۸/۱۷

چکیده

انتشار آلاینده‌ها در نیروگاه‌های با سوخت فسیلی، هزینه‌های محیط‌زیستی بالایی را به افراد جامعه تحمیل می‌کند. این هزینه‌ها، به صورت سنتی در محاسبه هزینه تولید وارد نمی‌شوند. هدف این تحقیق، محاسبه هزینه خصوصی و هزینه اجتماعی نهایی تولید برق در منطقه اصفهان برای یک روز مشخص از دیماه سال ۱۳۸۸ است. به این منظور، از یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی با محدودیت‌های خطی استفاده شده است. تابع هدف که همان هزینه‌های اجتماعی است، برابر با مجموع هزینه‌های متغیر و هزینه‌های خارجی نیروگاه‌های منطقه در نظر گرفته شده است. این تابع، با توجه به دو قید محدودیت عرضه نیروگاه‌ها و مقدار تقاضای منطقه در هر یک از ساعت‌های شبانه‌روز، بهینه شده است. نتایج حاصل از حداقل کردن تابع هدف، نشان‌دهنده تفاوت قابل توجهی بین هزینه اجتماعی نهایی و هزینه خصوصی نهایی است. این تفاوت که به‌عنوان هزینه خارجی نهایی شناخته می‌شود، در ساعات پرباری، افزایش آشکاری نسبت به ساعات کم‌باری مصرف برق داشته است. بنابراین، با لحاظ هزینه‌های اجتماعی، فناوری‌های تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر در مقایسه با نیروگاه‌های با سوخت فسیلی مانند مازوت، رقابت‌پذیر خواهند شد.

واژگان کلیدی: هزینه اجتماعی نهایی، هزینه خصوصی، محیط‌زیست، آلودگی، اثرات خارجی.

JEL: Q40, Q50, Q53.

۱. استاد گروه اقتصاد دانشگاه اصفهان، Email: rahmankh44@yahoo.com

۲. دانشیار گروه اقتصاد دانشگاه اصفهان، Email: alimorad@ase.ui.ac.ir

۳. کارشناس ارشد اقتصاد دانشگاه اصفهان، Email: parvandhamed@yahoo.com

۱. مقدمه

صنعت برق با توجه به اهمیتی که در عرضه ارائه خدمات به تولیدکنندگان به‌عنوان کالاهای واسطه و به خانوارها به‌عنوان تقاضاکنندگان نهایی دارد، به‌عنوان یک صنعت زیربنایی در فرآیند توسعه اقتصادی کشورها همواره نقش اساسی داشته است. نیروگاه‌های تولیدکننده برق با تولید انرژی الکتریکی مورد نیاز، از اهمیت ویژه‌ای جهت ادامه حیات صنعتی و اقتصادی کشور دارند، اما در طی فرآیند تولید، آلاینده‌هایی نیز از نیروگاه‌ها خارج می‌شوند که اثرات نامطلوبی بر کیفیت محیط‌زیست می‌گذارند و باید مورد توجه قرار گیرند.

طی چند دهه گذشته محیط‌زیست و حفاظت از آن از مهمترین مسائلی است که جوامع با آن روبرو هستند. توسعه همراه با اثرات مثبت خود، همواره دارای تاثیرات منفی مستقیم و غیرمستقیم بالقوه‌ای بر محیط‌زیست است و چنانچه برای این اثرات منفی چاره‌اندیشی نشود، نتایج ناگواری در پی خواهد داشت. بدین جهت و با توجه به اهمیت روزافزون بهبود کیفیت محیط‌زیست و حفظ منابع طبیعی که منجر به ارتقا سطح سلامت و کیفیت زندگی انسان می‌شود، برنامه‌ریزی‌های توسعه در بسیاری کشورهای جهان براساس اصول توسعه پایدار و حفظ محیط‌زیست استوار گردیده است. در بخش انرژی و به ویژه صنعت برق هزینه‌های خارجی فراوانی از طریق آلاینده‌های زیست‌محیطی بر جامعه تحمیل می‌شود که در محاسبات تابع هزینه و قیمت برای صنعت برق لحاظ نمی‌شود. سوخت‌های اولیه و موردنیاز بنگاهها در جریان تبدیل به انرژی سبب متصاعدشدن آلاینده‌هایی مانند SO_2 ، NO_x ، CO_2 می‌شوند که سبب زیان‌های قابل توجهی بر روی محیط‌زیست می‌شوند. اقتصاددانان محیط‌زیست درصدد تحقیقاتی برای وارد کردن این هزینه‌های خارجی در تابع هزینه نیروگاه‌ها هستند، چرا که هزینه‌های خارجی به وجود آمده توسط هیچ یک از گروه‌های تولیدکننده و مصرف‌کننده پرداخت نمی‌شود. ارزیابی هزینه‌ها بدون محدودیت زیست‌محیطی، استفاده بیش از اندازه از کالاها و خدمات زیست‌محیطی غیربازاری (بدون قیمت‌گذاری) به‌عمل خواهد آورد. بدین ترتیب این معضل ناشی از عمومی بودن بسیاری از کالاها و خدمات محیط‌زیستی است. از آنجا که قیمت کالاها و خدمات گویای ارزش واقعی کل منابع مورد استفاده برای تولید آنها نیست، بازارهای بدون محدودیت در تخصیص کارآمد و موثر منابع عاجز می‌مانند. بنابراین بین هزینه اجتماعی که از جمع هزینه خصوصی و هزینه خارجی بدست می‌آید و هزینه خصوصی تفاوت وجود دارد.

برآورد هزینه‌های زیست‌محیطی و لحاظ کردن آنها در تابع هزینه تولید برق گامی است بسوی بهینه‌کردن هزینه‌ها و البته شفاف‌سازی در فرآیند قیمت‌گذاری که زمینه علمی لازم را برای توجیه‌پذیری اقتصادی هزینه‌های کنترل بر آلودگی ایجاد می‌کند و زمینه را برای عرضه انرژی‌های پایدار و نو، که از لحاظ

محیط‌زیستی آثار مخرب بسیار کمی دارند فراهم می‌کند. در این تحقیق ابتدا به مبانی نظری موضوع مورد مطالعه پرداخته سپس برای تابع هزینه اجتماعی بازار برق با توجه به فروض خاص یک مدل منطقه‌ای (شهر اصفهان) ارائه می‌شود و طبق روش حل مدل، هزینه اجتماعی نهایی تولید برق بدست می‌آید.

۲. مبانی نظری

یک هزینه خارجی^۱ زمانی به وجود می‌آید که اقدام و تصمیم یک عامل اقتصادی به تولید یا مصرف، بر مطلوبیت یک یا چند عامل اقتصادی دیگر (تولیدکننده یا مصرف‌کننده) اثر گذارد و کسی که پیامد خارجی را ایجاد کرده است، ضرر و زیان وارده به سایر گروه‌ها را جبران نکند (استری میکین و پاسینیت^۲، ۲۰۰۸). طبق تئوری‌های اقتصادی، مطلوبیت هر شخصی فقط به مقدار کالایی که انتخاب کرده و مصرف می‌کند، بستگی دارد. به همین ترتیب مقدار تولید یک کالا در یک محدوده زمانی خاص، فقط بستگی به مقادیر نهادهای تولیدی که تولیدکننده مورد استفاده قرار داده است، دارد. اما در عمل مطلوبیت کسب‌شده توسط گروهی از مصرف‌کنندگان و محصول تولیدشده توسط گروهی از تولیدکنندگان، بر روی رفتار مصرفی و تولیدی سایر گروه‌ها تأثیر می‌گذارد. بنابراین فعالیت‌های اقتصادی و رفتار عوامل اقتصادی (تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان) دارای پیامدهای خارجی^۳ است.

سیستم بازار خصوصی بر میزان و نحوه بهره‌برداری از منابع قیمت‌گذاری شده تأثیر قابل توجهی می‌گذارد ولی در جهت‌دهی صحیح موسسات و بنگاه‌های تولیدی جهت استفاده موثر و کارآمد از منابع قیمت‌گذاری نشده (محیط‌زیست) ناموفق بوده است. در بازار دو نوع کالا وجود دارد. کالای خصوصی، که تولیدکننده آن را تولید کرده و به بازار عرضه می‌کند و قیمتی هم برای آن در نظر می‌گیرد و در نهایت به مصرف‌کننده می‌رسد و تنها مالک آن می‌تواند از خدمات و نتایج این کالا بهره‌مند شود. کالای عمومی، که نه تنها مالک آن بلکه دیگر مصرف‌کنندگان نیز می‌توانند از آن استفاده کنند مانند بسیاری از کالاها و خدمات زیست‌محیطی مثل هوای پاک و یا طبیعت زیبا که کالاهای کاملاً عمومی یا با دسترسی آزاد و مالکیت مشترک هستند. نظام بازار خصوصی در قیمت‌گذاری این کالاها ناتوان است، بنابراین در قیمت‌ها منعکس نمی‌شوند و باعث ناتوانی بازار در تخصیص و استفاده بهینه از منابع قیمت‌گذاری نشده همانند محیط‌زیست می‌شود (کوومی و فلورنتین^۴، ۱۹۹۷).

1. External Cost
2. Streimikiene and Pusinaite
3. Externality
4. Koomey and Florentine

هزینه اجتماعی^۱ هزینه‌ای است که جامعه برای دریافت یک کالا یا خدمت پرداخت می‌کند (بویی^۲، ۱۹۹۶) و (اسکات و جانن^۳، ۲۰۰۰). این هزینه شامل هزینه خصوصی (هزینه تولید انرژی الکتریکی) و هزینه‌های خارجی است و می‌توان آن را به صورت ذیل بیان کرد:

$$SC = (PC, EC) \quad (1)$$

که در رابطه (۳) SC، هزینه اجتماعی، PC، هزینه خصوصی تولید^۴ و EC، هزینه خارجی تولید را نشان می‌دهد و هزینه خارجی خود نیز تابعی از هزینه کنترل آلودگی (PCC) و مقدار آلودگی باقیمانده (UP) است:

$$EC = (UP, PCC) \quad (2)$$

UP، مقدار آلودگی باقیمانده (ناشی از ناکارایی کنترل آلودگی) و PCC، هزینه کنترل آلودگی را نشان می‌دهد.

علت وجود رابطه (۲) به سبب آن است که تجهیزات کنترل آلودگی، کارایی ۱۰۰ درصد ندارند و میزان بازده آنها کمتر از این مقدار است. طبیعی است برای استفاده و بهره‌جویی از حد کارایی آنها، نیاز به سرمایه‌گذاری است که این سرمایه‌گذاری را می‌توان همان هزینه کنترل آلودگی یا PCC تلقی نمود. اما میزان عدم کارایی این تجهیزات موجب انتشار آلودگی می‌شود که آثار آن بر محیط‌زیست می‌تواند به صورت هزینه‌های خارجی تلقی شود. تابع هزینه در تولید برق نسبت به قیدهای عرضه و تقاضا بررسی می‌شود و بنابراین لازم است که هزینه اجتماعی بحث شده در بالا نسبت به محدودیت‌های عرضه و تقاضا بررسی شود. بنابراین باید تابع هزینه نسبت به این محدودیت‌ها کمینه شود. شوپ و همکاران^۵ (۱۹۸۸) نشان می‌دهند که متغیر دوگان در این مسئله بهینه‌یابی تابع هزینه، همان هزینه نهایی (برای رابطه ۱، هزینه اجتماعی نهایی)^۶ است که بهترین معیار برای قیمت‌گذاری در صنعت برق به شمار می‌آید. قیمت مهمترین مکانیسم فرآیند بازار است، که به وسیله عرضه و تقاضا مشخص می‌شود. مزیت اصلی مکانیسم قیمت، این است که مصرف‌کنندگان را متوجه هزینه‌های تولید کالا و تولیدکنندگان را از ارزش‌گذاری‌های نسبی مصرف‌کنندگان آگاه می‌کند. ولی هنگامی که قیمت نتواند تمامی هزینه‌ها و مزایای مربوط به مبادله یک کالا را در بازار نشان دهد بازار با شکست مواجه می‌شود و این شکست زمانی رخ می‌دهد که شخص سومی در اثر تولید و مصرف کالا تحت تاثیرات خارجی قرار گیرد، که اگر تولید هزینه کند با عنوان اثرات

-
1. Social Cost
 2. Bui
 3. Scott and Janet
 4. Private Cost
 5. Schweppe
 6. Marginal Social Cost

خارجی منفی معرفی می‌شود. هزینه نهایی بهترین معیار برای قیمت‌گذاری است. بنابراین برای محاسبه قیمت تعادلی، باید هزینه‌های خارجی نهایی به هزینه‌های خصوصی نهایی اضافه شوند، تا هزینه جدیدی به نام هزینه اجتماعی نهایی حاصل شود. این هزینه نشان‌دهنده هزینه خصوصی نهایی تولید و هزینه تخریب محیط‌زیست و به عبارتی هزینه خارجی منفی است. روش بررسی عدم‌توانایی بازارهای آزاد در حفظ کیفیت محیط‌زیست، بررسی هزینه‌های خارجی آلاینده‌های ناشی از تولید و مصرف کالا است که بر شخص سوم خارج از بازار اثر می‌گذارد. هزینه‌های متعددی در تولید برق در نیروگاه‌های حرارتی در نظر گرفته می‌شوند، یکی از آنها هزینه‌های خصوصی است که در محاسبات وارد شده و در برگیرنده تولید تا مرحله توزیع کالا است. از دیگر هزینه‌هایی که در بخش تولید کالا وجود دارند ولی در هزینه‌های خصوصی وارد نشده و به عبارتی داخلی نمی‌شوند، هزینه‌های خارجی است. این هزینه‌ها به صورت اثرات منفی ظاهر می‌شوند و قیمتی برای آنها وجود ندارد آثار جانبی بر روی شرایط کارایی اقتصادی اثر گذاشته و آنها را تغییر می‌دهند به عبارتی دیگر وجود اثرات جانبی شرایط لازم برای کارایی را تغییر می‌دهد.

جهت وارد کردن هزینه‌های خارجی در هزینه‌های تولید نیروگاه‌ها می‌توان از روش‌های مبتنی بر بازار استفاده کرد که از روش‌های کنترل مستقیم آلودگی کارآمدتر هستند. از جمله این روش‌ها روش اخذ هزینه دفع آلودگی، است. در این روش دولت قیمتی برای دفع و پخش آلودگی‌ها به محیط‌زیست را تعیین می‌نماید، یعنی تولیدکنندگان می‌توانند هر مقدار که می‌خواهند آلودگی وارد محیط‌زیست نمایند و بهای آن را نیز با قیمت‌های تعیین‌شده توسط دولت پرداخت نمایند. این روش در ادبیات اقتصاد محیط‌زیست، روش اخذ هزینه دفع^۱ یا روش درونی کردن هزینه‌های خارجی نامگذاری شده است. در صورت برقراری چنین روشی واحدهای تولیدی دائماً در فکر چاره‌اندیشی برای کاهش آلودگی‌های ایجاد شده خود خواهند بود تا از آن طریق در هزینه‌های پرداختی به دولت صرفه‌جویی نمایند و در جهت افزایش صرفه‌جویی‌ها هر اقدامی که موجب کاهش آلودگی شود، از قبیل تغییر ماشین‌آلات یا شیوه تولید، مورد توجه قرار دهند.

۳. پیشینه تحقیق

ترستون و اسرینیواسان^۱ (۲۰۰۳)، در مقاله‌ای با عنوان "بهینه‌یابی مقید برای مهندسی سبز"، یک مدل بهینه‌یابی مقید در حالت کلی که برای صنایعی همچون برق و کامپیوتر کاربرد دارد، با در نظر گرفتن قیود لازم و از جمله قید آلاینده‌گی محیط‌زیستی را مطرح کرده‌اند. نویسندگان در تحقیق خود مقدار بهینه مصرف انرژی که بهترین ترکیب هزینه و اثرات محیط‌زیستی جهت تولید در محل مورد مطالعه را داراست، بدست آورده‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که سیاست‌های قانونی می‌تواند مدل ارائه شده را در برابر تضاد و کشمکش بین مینیمم کردن هزینه‌ها و مینیمم کردن تأثیرات محیط‌زیستی، کمک کند. بهینه‌یابی مقید برای شناسایی بهترین سیاستها که مطلوبیت اجتماعی را ماکزیمم می‌کند و در عین حال که قیده‌های منطقی همچون قیده‌های آلودگی را رعایت می‌کند، مناسب است.

بازسیویچ^۲ (۲۰۰۵)، در مقاله خود با عنوان "بررسی هزینه خارجی تولید برق از نیروگاه‌های فسیلی در کشور روسیه"، صدمات ناشی از نیروگاه‌های برق فسیلی را بر سلامت انسان تعیین ارزش نمود. با استفاده از GIS، نیروگاه‌های منطقه مکان‌یابی گردیده و غلظت آلاینده‌ها در نقاط مختلف اندازه‌گیری شده است.

جدول ۱. برآورد هزینه‌های بهداشتی ناشی از آلودگی در روسیه (۲۰۰۵)

| هزینه (دلار امریکا ۱۹۹۵) | بیماری‌ها |
|--------------------------|------------------------|
| ۵۰۰،۱۴۸ | مرگ و میر حاد |
| ۱،۳۷۵،۰۰۰ | مرگ و میر مزمن |
| ۱۰،۳۰۰ | مشکل تنفسی |
| ۱۰،۳۰۰ | بیماری عروقی |
| ۱۰،۳۰۰ | نارسایی قلبی |
| ۳۰۰ | برونشیت مزمن در بچه‌ها |
| ۱۳۸،۰۰۰ | برونشیت مزمن در جوانان |
| ۳۰۰ | سرفه مزمن در بچه‌ها |
| ۱۰۰ | کاهش فعالیت روزانه |

منبع: بازسیویچ (۲۰۰۵)

سپس نحوه پراکنش این آلاینده‌ها در نقاط مختلف مشخص گردید و با تعیین تراکم جمعیت در نقاط مختلف و از روی هم قرار دادن این لایه‌های اطلاعاتی، نقشه نهایی با اطلاعات مکانی نیروگاه، تراکم

1. Thurston and Srinivasan
2. Bozicevic.

جمعیت و میزان غلظت آلاینده‌ها، تعیین شد. ارزش‌گذاری مالی صدمات وارده به سلامت انسان، که تحت‌عنوان هزینه‌های خارجی معرفی شده است کاملاً وابسته به مطالعات انجام‌شده در امریکا و اروپا بود. در این کشورها یک رشته مطالعات در زمینه ارزش‌گذاری اثرات مرگ و میر و علائم و نشانه‌های بیماری صورت گرفته است.

مطالعات مشابهی نیز جهت تعیین هزینه‌های خارجی گزینه‌های مختلف تولید انرژی الکتریکی در کشورهایی همچون کشور دانمارک توسط میر و همکارانش^۱ در سال ۱۹۹۴، کشور فنلاند توسط اکونو^۲ در سال ۱۹۹۴، کشور سوئیس توسط باندسامت^۳ در سال ۱۹۹۴، کشور آلمان توسط فردریک^۴ در سال ۱۹۹۰ و هومیر^۵ در سال ۱۹۹۲، کشور تایلند توسط بویی^۶ در سال ۱۹۹۶ و بویی و لفر^۷ در سال ۱۹۹۸ و کشور کانادا توسط هایدر^۸ در سال ۲۰۰۰ صورت پذیرفته است.

کای و همکاران^۹ (۲۰۱۰)، در مقاله‌ای با عنوان "روش MOCASO" (بهینه‌سازی تابع هدف چندگانه با استفاده از روش کلونی مورچه‌ها) برای پخش بار اقتصادی و پخش آلودگی "به بهینه‌کردن تابع هزینه چندگانه در چارچوب مسائل EED" (مسائلی که پخش بار اقتصادی و محیط‌زیستی را با هم در نظر می‌گیرند) در سه سیستم عملیاتی تولید برق نمونه، پرداخته‌اند. در این مقاله سعی شده که علاوه بر مسئله پخش بار اقتصادی به آلودگی‌های ناشی از تولید برق، بخصوص نیروگاه‌های حرارتی، توجه شود. نتایج عددی این مقاله نشان می‌دهند که استفاده از روش MOCASO برای حل مسائل EED منطقی و کارا است و با وجود اینکه سیستم تولید برق با قیدهای بیشتر (برای اعتبار بیشتر)، پیچیده‌تر می‌شود، انتظار می‌رود که روش MOCASO پیشنهادشده در این مقاله و ارائه نتایج آن برای حل مسائل EED با استفاده از روش هوش مصنوعی مفید واقع شود. در پایان نتایج این روش با دیگر روش‌های مانند الگوریتم ژنتیک، مورد مقایسه قرار گرفته و بنابراین مقایسه‌ها اعتبار و اطمینان‌پذیرش این روش بالا رفته است.

-
1. Meyer
 2. Ekono
 3. Bundesamt
 4. Friedrich
 5. Hohmeyer
 6. Bui
 7. Bui and Lefvre
 8. Hydro
 9. Cai et al.
 10. Multi-Objective Chaotic Ant Swarm Optimization
 11. Environmental Economic Dispatch

۴. مدل تحقیق و روش برآورد

در این تحقیق هزینه اجتماعی نهائی عرضه الکتریسیته با فرض وجود ظرفیت مازاد در زمینه تولید و انتقال برای بازار برق منطقه‌ای اصفهان به‌عنوان نمونه مطالعاتی، محاسبه شده است. بر این اساس که هزینه نهائی، شاخص اقتصادی برای انجام مبادلات در یک بازار الکتریسیته است. همچنین تعیین ساختار بازار نیز می‌تواند بر مبنای انحراف قیمتهای جاری با هزینه نهائی صورت گیرد. مدل پیشنهادی در این مقاله بر اساس حداقل‌سازی هزینه‌های متغیر تولید و همچنین هزینه‌های خارجی ناشی از تولید الکتریسیته با توجه به محدودیت‌های مختلف است. به‌عبارت دیگر، هزینه اجتماعی ناشی از تولید در نیروگاه‌های منطقه اصفهان، جهت تامین انرژی الکتریکی مورد نیاز منطقه، حداقل می‌شود.

از آنجا که انتشار آلاینده‌ها از نیروگاه‌های حرارتی روز به روز سبب نگرانی بیشتر تصمیم‌گیران در جهت حفظ محیط‌زیست شده است، لازم است که مسائل پخش بار اقتصادی (ED) به مدلهایی که هم پخش بار اقتصادی و هم پخش آلودگی را در نظر می‌گیرد (EED)، بسط داده شود. هدف مدل EED، تعیین ترکیب بهینه‌ای از تولید برق برای نیروگاه‌ها است که هزینه‌های کلی تولید (هزینه اجتماعی) را با در نظر گرفتن هر دو هزینه سوخت مصرفی (هزینه خصوصی) و هزینه‌های انتشار آلاینده‌ها (هزینه‌های خارجی) نسبت به محدودیت تولید و محدودیت بار الکتریکی می‌نیمم می‌کند (پالانچامیو بابو^۱، ۲۰۰۸).

مدل ارائه شده در این مقاله در راستای مدل EED یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی با هدف کمینه کردن هزینه‌های اجتماعی تولید برق در نیروگاه‌های حرارتی، نسبت به محدودیت‌های مختلف است. در ادامه اجزای مدل ارائه شده است.

۴.۱. تابع هدف مدل

دو تابع هدف در مدل استفاده شده (EED)، با هم و در یک زمان می‌نیمم می‌شود.

۴.۱.۱. تابع هزینه خصوصی

با توجه به اینکه مدل در بازه زمانی یک روز (۲۴ ساعت) استفاده می‌شود و با توجه به اینکه در بازه‌های زمانی کوتاه (ساعتی) هزینه‌هایی همچون هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه توسعه ظرفیت و ... نامحسوس است جهت محاسبه هزینه‌های خصوصی، هزینه‌های سوخت نیروگاه‌ها، به‌عنوان عامل تعیین‌کننده در هزینه‌های تولید نیروگاه‌ها در کوتاه‌مدت در نظر گرفته برای بدست آوردن رابطه هزینه سوخت از یک رابطه درجه دوم برحسب تولید نیروگاه استفاده می‌شود که این رابطه مشخصه ورودی-خروجی نیروگاه نامیده

1. Economic Dispatch

2. Palanichamy and Babu

می‌شود (وود و وولنبرگ^۱، ۱۹۹۶). برای تخمین این رابطه از اطلاعات مربوط به مقدار تولید برحسب مگاوات و مقدار مصرف سوخت برحسب کیلوگرم استفاده می‌شود. بنابراین تابع هدف هزینه‌های خصوصی بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_t = \sum_{i=1}^n (e_i) H_i(P_{ti}) = \sum_{i=1}^n F_i(P_{ti}) = \sum_{i=1}^n (a_i P_{ti}^2 + b_i P_{ti} + c_i) \quad (۳)$$

که F_t هزینه تولید در کل منطقه در زمان t ؛ e_i و H_i و F_i به ترتیب قیمت سوخت مورد استفاده، تابع نرخ حرارت ورودی نسبت به تولید (تابع ورودی-خروجی) و تابع هزینه i امین تولیدکننده a_i و b_i و c_i ضرایب هزینه i امین تولیدکننده، p_i مقدار تولید i امین تولیدکننده و n تعداد تولیدکننده‌های ترکیب‌شده در یک سیستم عملیاتی است.

۲.۱.۴. تابع هزینه خارجی

در نیروگاه‌ها، سه گاز اصلی آلوده‌کننده محیط‌زیست دی‌اکسید کربن (CO_2)، اکسیدسولفور و ترکیبات آن (SO_x) و اکسیدنیترژن و ترکیبات آن (NO_x) هستند، که عمده آلودگی در نیروگاه‌ها ناشی از گازهای SO_x و NO_x است. در نتیجه می‌توان گفت که هدف از وارد کردن هزینه‌های خارجی در تابع هدف (درونی کردن هزینه‌های خارجی)، می‌نیم کردن میزان گازهای آلوده‌کننده و در نتیجه هزینه‌های خارجی ناشی از انتشار آنها است. با بررسی میزان گازهای آلوده‌کننده خروجی از نیروگاه‌ها مشاهده شده است که عوامل زیادی بر روی نرخ و میزان این گازها تاثیرگذار هستند، عامل اصلی مؤثر بر میزان گازهای آلاینده خروجی نیروگاه‌ها نوع سوخت مصرفی و توان اکتیو (توان مصرفی) تولیدی نیروگاه است. از طرف دیگر با ارزیابی رابطه بین میزان آلودگی منتشره و توان اکتیو تولیدی مشاهده می‌شود که این رابطه یک رابطه غیرخطی است چرا که با افزایش تولید در بازه‌های متفاوت مقدار انتشار آلاینده یکسان نخواهد بود به عبارت دیگر مقدار انتشار نهایی آلاینده نسبت به تولید یکسان نبوده و یک معادله غیرخطی درجه دوم بر حسب توان اکتیو تولیدی نیروگاه، بیشترین تطابق را با تابع میزان آلودگی منتشره برحسب توان تولیدی نیروگاه خواهد داشت. از آنجا که هزینه انتشار آلودگی رابطه مستقیم با میزان انتشار آلاینده دارد لذا تابع هزینه آلاینده‌ها یک نیروگاه، یک تابع درجه دوم بر حسب توان اکتیو تولیدی خواهد بود (کومار و همکاران، ۲۰۰۶؛ تاکور و همکاران، ۲۰۰۳).

بنابراین در راستای می‌نیم کردن هزینه‌های خارجی ناشی از انتشار آلاینده‌ها رابطه (۴) ارائه می‌شود:

1. Wood and Wollenberg
2. Kumar
3. Thakur

$$E_t = \sum_{i=1}^n E_i(P_{ti}) = \sum_{i=1}^n (\alpha_i P_{ti}^2 + \beta_i P_{ti} + \gamma_i) \quad (۴)$$

که α_i ، β_i و γ_i ضرایب i امین تولیدکننده آلاینده هستند.

مسئله می‌نیمم کردن هزینه‌های انتشار آلاینده‌ها، باعث کاهش میزان آلودگی می‌شود با رسیدن به این هدف، هزینه سوخت افزایش می‌یابد و برعکس. با در نظر گرفتن این تأثیرات، باید بین دو حالت مذکور مطالعه‌ای انجام داد و هر دو هدف را توأمآ بهینه نمود.

در این مقاله با استفاده از روش درونی کردن هزینه‌های خارجی برای تولیدکننده آلودگی، سعی در کاهش هزینه‌های خارجی ناشی از آلودگی شده است. مدل ما دارای دو تابع هدف با نام‌های هزینه خصوصی تولید برحسب (Rial/h) و هزینه‌های خارجی تولید برحسب (Tone/h) است که برای درونی کردن هزینه‌های خارجی و همچنین بررسی توأمآ این دو تابع، باید توابع هدف را با هم جمع کرد و تبدیل به یک تابع هدف به نام هزینه اجتماعی کرد. اما از آنجا که رابطه (۳) برحسب (Tone/h) است برای اینکه قابل جمع کردن با رابطه (۲) باشد نیاز به یک ضریب تبدیل است که به‌ازای آن مقدار (Tone/h) آلودگی تبدیل به معیار هزینه (Rial/h) شود. معمولاً در مطالعات انجام‌شده در حوزه مهندسی برق برای یکسان‌سازی دو تابع بالا از ضریب تبدیل (P_{ti}) زیر استفاده می‌شود:

$$P_{ti} = \frac{a_i + b_i \cdot p_{i, \max} + c_i \cdot p_{i, \max}^2}{\alpha_i + \beta_i \cdot p_{i, \max} + \gamma_i \cdot p_{i, \max}^2} \quad (۵)$$

اما با توجه به اینکه ما در این تحقیق به دنبال ارزش‌گذاری ریالی هزینه‌های خارجی هستیم بجای استفاده از ضریب بالا از مقدار زیان ریالی محاسبه شده برای انتشار هر واحد آلاینده استفاده می‌کنیم. این ضریب تبدیل را می‌توان از روش‌های ارزش‌گذاری هزینه‌های خارجی که در فصل دوم گفته شد بدست آورد. در حقیقت این ضریب برابر مقدار زیان ریالی است که بر اثر انتشار یک واحد آلاینده، ایجاد می‌شود. در این تحقیق این ضریب با استفاده از روش تبدیل تعدیل‌یافته و با استفاده از محاسبات بانک جهانی محاسبه شده است.

بنابراین بطور کلی رابطه هزینه اجتماعی که به‌عنوان تابع هدف مدل معرفی می‌شود، بصورت رابطه (۶) بیان می‌شود:

$$SC_t = \sum_{i=1}^n (F_{ti} + (P_{di} E_{ti})) \quad (۶)$$

که در رابطه (۶)، P_{di} ضریب تبدیلی است.

۲.۴. محدودیت تقاضا

از یک سو هدف از تولید انرژی الکتریکی، تامین تقاضای آن بوده و از سوی دیگر به دلیل ادواری بودن فعالیت‌های بشر، تقاضای انرژی الکتریکی نیز دارای نوسانات ادواری است. این نوسانات غالباً به صورت روزانه، هفتگی، ماهانه، فصلی و سالانه قابل تفکیک است. یکی از ابزارهای مهم برای این منظور منحنی تداوم بار (LDC) است. منحنی تداوم بار از منحنی بار بدست می‌آید. منحنی بار در یک دوره نشان دهنده میزان مصرف بر حسب مگاوات در هر لحظه از دوره است. در حالیکه منحنی تداوم بار مشخص می‌کند که چند درصد از طول دوره قدرت مصرفی از حد مشخصی تجاوز کرده است. از سوی دیگر منحنی تداوم بار بیانگر آنست که مقدار مشخصی از قدرت تولیدی در چه مدت از زمان دوره تناوب توسط مصرف کننده‌ها جذب می‌شود. همچنین سطح زیر منحنی تداوم بار، میزان مصرف انرژی بر حسب مگاوات ساعت (MVH) را نشان می‌دهد. برای لحاظ محدودیت مقدار تقاضا در مدل، از منحنی تداوم بار استفاده می‌شود. برای لحاظ محدودیت بار الکتریکی مورد نیاز در مدل، منحنی تداوم بار را به صورت برون‌زا در مدل وارد می‌کنیم. در واقع آنچه در مورد مقدار تقاضای برق اهمیت دارد اینست که در طول دوره برنامه‌ریزی هر سطح از توان الکتریکی به مدت چند ساعت مورد تقاضا واقع شده است.

در مدل لحظه‌ای مورد استفاده در این تحقیق ما با یک بازه زمانی ۲۴ ساعته (یک شبانه‌روز) مواجه هستیم. در حقیقت هر سطح از توان الکتریکی به مدت یک ساعت مورد تقاضا واقع شده است، با توجه به این موضوع، نیروگاه‌های فعال در سیستم باید به مدت t ساعت (یک ساعت)، توانی برابر با k مگاوات ساعت تولید نمایند. اگر تعداد تقسیم‌بندی روی منحنی تداوم بار برابر M باشد (در این مدل ۲۴ ساعت)، مدل شامل M محدودیت تقاضا است. بدیهی است هر چه M بالاتر باشد، دقت مدل بیشتر می‌شود. از طرف دیگر با افزایش M ابعاد مدل نیز افزایش یافته و حل آن مشکل‌تر می‌شود. به هر حال باید تقسیمات انجام شده روی منحنی تداوم بار به نحوی صورت گیرد که مجموع مقادیر انرژی الکتریکی تقاضا شده در M ناحیه بار، برابر با کل انرژی الکتریکی در طول دوره برنامه‌ریزی (یک شبانه‌روز) باشد.

اما در این جا یک نکته قابل ذکر است و آن اینکه بخشی از انرژی تولیدی نیروگاه در خود نیروگاه به مصرف می‌رسد که به مصرف داخلی موسوم است و می‌توان آنرا به صورت ضریب از میزان تولید نیروگاه در نظر گرفت. در اینجا مراکز مصرف همان شرکتهای توزیع است که شرکت برق منطقه‌ای اصفهان به‌عنوان نماینده آنها عمل می‌کند و پیش‌بینی مقدار تقاضا که با در نظر گرفتن تلفات توزیع صورت می‌گیرد توسط شرکت برق منطقه‌ای به بازار ارائه می‌شود. اگر مصرف داخلی نیروگاه δ را با δ نشان دهیم، رابطه تقاضا به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\sum_{i=1}^n (1-\delta_i)y_{i,t} \geq D_t \quad i = 1,2,3,\dots,n ; t = 1,2,3,\dots,T \quad (7)$$

رابطه (۷)، بیان می‌کند که مجموع ظرفیت نیروگاه‌های سیستم باید برابر با مقدار کل بارالکتریکی تقاضا شده D_t باشد. این شرط باید برای تمامی نواحی بار برقرار باشد، اگر تعداد تقسیم‌بندی روی منحنی تداوم بار برابر با T باشد مدل شامل T محدودیت تقاضا است.

۳.۴. محدودیت تولید

از آنجا که توان تولیدی نیروگاه در فاصله مشخصی قابل تغییر است بنابراین خروجی نیروگاه در هر یک از نواحی بار (P_{it}) باید در این فاصله قرار گیرد. اگر حداکثر توان تولیدی نیروگاه P_{imax} و حداقل آن P_{imin} باشد، محدودیت تولید برای N نیروگاه و M ناحیه بار به صورت زیر بیان می‌شود:

$$P_{imin} \leq P_{it} \leq P_{imax} \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (8)$$

با مشخص شدن ابعاد مدل پیشنهادی، تابع هدف و محدودیت‌های مدل در ذیل ارائه شده است:

$$\text{Min } SC = \sum_{t=1}^m \sum_{i=1}^n (F_{it} + (P_{di}E_{ti})) \quad i = 1,2,\dots,n; t = 1,2,\dots,m \quad (9)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^n (1 - \delta_i) P_{it} = D_t$$

$$P_{imin} \leq P_{it} \leq P_{imax}$$

با اجرای مدل فوق توسط نرم‌افزار^۱ GAMS، خروجی‌های برنامه مقدار تولید بهینه هر یک از نیروگاه‌ها، مقدار تابع هدف و هزینه اجتماعی نهایی تولید در هر ساعت است. این نرم‌افزار از روش "لاگرانژ مرحله‌ای"^۲ برای حل مسائل غیرخطی استفاده می‌کند. هزینه اجتماعی نهایی، همان متغیر دوگان در مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی بالاست. شوپ^۳ و همکاران (۱۹۸۸) در مدل قیمت‌گذاری خود اثبات می‌کنند که هزینه نهایی همان متغیر دوگان در مسئله کمینه‌کردن تابع هزینه مقید است که قیمت باید برابر این مقدار باشد.

در واقع در این مدل تولیدکنندگان می‌توانند هر مقدار که می‌خواهند آلودگی وارد محیط‌زیست نمایند لیکن باید مقدار زبانی را که براساس این آلودگی به وجود می‌آورند (P_{di})، را نیز پرداخت نمایند. همانطور که اشاره شد این روش در ادبیات اقتصاد محیط‌زیست، روش اخذ هزینه دفع یا همان روش درونی کردن هزینه‌های خارجی نامگذاری شده است.

1. General Algebraic Modeling System
2. Projected Lagrangian
3. Schweppe

۵. داده‌ها و نتایج تجربی

برای استخراج رابطه‌های هزینه خصوصی و خارجی، از داده‌های ساعتی مربوط به مقدار تولید برحسب مگاوات و مقدار مصرف سوخت بر حسب کیلوگرم و مقدار انتشار آلاینده برحسب کیلوگرم در هر یک از ۲۴ ساعت شبانه‌روز در چند روز انتخابی از سال ۱۳۸۸ استفاده شده است. اطلاعات در شرایطی که هر دو نیروگاه صرفاً از مازوت به‌عنوان سوخت و در دمای حدود ۲۰ الی ۲۵ درجه فعالیت می‌کنند استفاده شده است. برای بدست آوردن نرخ حرارت ورودی (H) از ارزش حرارتی مازوت که معادل ۹۶۰۰ kcal/kg (کیلو کالری بر کیلوگرم) است استفاده می‌کنیم. بدین صورت با استفاده از روش حداقل مربعات معمولی و با استفاده از نرم‌افزار EVIEWS6 حداقل انرژی مصرفی نیروگاه را بر روی تولید برازش می‌نماییم و بهترین تخمین برای منحنی تبادل انرژی نیروگاه‌ها (اصفهان و منتظری) بدست می‌آید.

نتایج برآورد منحنی تبادل انرژی (ورودی-خروجی) نیروگاه شهید محمد منتظری و نیروگاه اسلام‌آباد اصفهان به ترتیب براساس رابطه (۱۰) و رابطه (۱۱)، در جدول ۲ ارائه شده است.

$$H_1 (Mcal / h) = a_1 p_1^2 + b_1 P_1 + c_1 \quad (10)$$

$$H_2 (Mcal / h) = a_2 P_2^2 + b_2 P_2 + c_2 \quad (11)$$

که در این روابط H نرخ حرارت ورودی به واحد (برحسب مگا کالری) و P تولید (برحسب مگاوات ساعت) را نشان می‌دهد.

جدول ۲. نتایج برآورد منحنی ورودی-خروجی (نیروگاه منتظری و اسلام‌آباد اصفهان)

| ضریب تعیین (R ^۲) | احتمال (prob) | آماره t | مقدار برآورد شده | ضریب |
|------------------------------|---------------|---------|------------------|----------------|
| %۹۸ | ۰/۰۰۹۳ | ۲/۸۰ | ۰/۰۱۱۷ | a _۱ |
| | ۰/۰۰۰ | ۲۲/۶ | ۵/۱۶۱۴ | b _۱ |
| | ۰/۰۳۹ | ۲/۱۶ | ۸۶۴۹۲۸۳ | c _۱ |
| %۹۸/۸ | ۰/۰۴۳ | ۲/۱۰ | ۰/۹۰۵ | a _۲ |
| | ۰/۰۳۹ | ۲/۱۵ | ۱۱۲۸/۹۳۴ | b _۲ |
| | ۰/۰۰۸ | ۲/۸۰ | ۴۲۶۸۱۵/۳ | c _۲ |

منبع: یافته‌های تحقیق

برای تعیین رابطه هزینه، قیمت سوخت مازوت معادل ۳۰ Rls/lit، معادل ۲۸ Rls/kg (باتوجه به جرم حجمی مازوت) با احتساب هزینه حمل و نقل مورد استفاده قرار می‌گیرد. باتوجه به اینکه ارزش حرارتی هر کیلوگرم مازوت معادل ۹۶۰۰ kcal/kg یا ۹/۶ mkal/kg است، برای تبدیل رابطه ورودی - خروجی به رابطه هزینه داریم:

$$PC_1(Rls / h) = 28 / 9.6(0.0117P_1^2 + 1614.5P_1 + 8649283) \quad (12)$$

$$PC_2(Rls / h) = 28 / 9.6(0.905P_2^2 + 1128.93P_2 + 426815.3) \quad (13)$$

که PC^۱ بیانگر هزینه خصوصی تولید است. از مجموع روابط (۱۲) و (۱۳)، تابع هزینه خصوصی برای منطقه اصفهان برای هر ساعت بدست می‌آید بنابراین تابع هزینه خصوصی کل (TPC)^۲ برای یک روز مشخص بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$TPC = 28 / 9.6 \sum_T (0.0117P_{1T}^2 + 1614.5P_{1T} + 8649283 + 0.905P_{2T}^2 + 1128.93P_{2T} + 426815.3) \quad (14)$$

T=1,2,3,...,24

باتوجه به اینکه سوخت در دسترس نیروگاه‌های کشور با پرداخت یارانه از طرف وزارت نیرو است، مدل یکبار نیز با توجه به سوخت با قیمت جهانی اجرا می‌شود. بر این اساس هزینه سوخت معادل ۲۷۰۰ Rls/lit، معادل ۲۴۳۰ Rls/kg خواهد بود. بنابراین تابع هزینه خصوصی مدل انتخابی هزینه متغیر نیروگاه‌های سطح منطقه را شامل می‌شود. که برای بدست آوردن این رابطه از تقریب منحنی ورودی-خروجی استفاده شده است.

باتوجه به محدودیت در دسترسی به اطلاعات مربوط به انتشار آلاینده‌ها در نیروگاه‌ها و باتوجه به اینکه سهم عمده آلودگی ناشی از استفاده سوخت مازوت توسط انتشار گاز آلاینده SO₂ به وجود می‌آید، در این مطالعه سعی شده است که تابع انتشار گاز آلاینده SO₂ و به دنبال آن تابع هزینه خارجی این آلاینده در حالتی که نیروگاه فقط از سوخت مازوت جهت تولید استفاده کرده است، محاسبه شود (مقدار انتشار SO₂ ناشی از مصرف سوخت گاز طبیعی، بسیار کم و ناچیز است). مقدار انتشار آلاینده‌ها از داده‌های موجود در قسمت محیط‌زیست هر دو نیروگاه بصورت روزانه استخراج شده است. براساس مدل ارائه شده، تابع مقدار انتشار آلاینده SO₂، برای نیروگاه منتظری و نیروگاه اصفهان به ترتیب طبق رابطه (۱۵) و (۱۶)، برآورد شده است:

-
1. Private Cost
 2. Total Private Cost

$$E_1 (kg / h) = \alpha_1 p_1^2 + \beta_1 P_1 + \gamma_1 \quad (15)$$

$$E_2 (kg / h) = \alpha_2 P_2^2 + \beta_2 P_2 + \gamma_2 \quad (16)$$

در این رابطه E، مقدار انتشار آلاینده (برحسب کیلوگرم) و P تولید (برحسب مگاوات ساعت) را نشان می‌دهد.

جدول ۳. نتایج برآورد تابع انتشار آلاینده (نیروگاه منتظری و اسلام‌آباد)

| ضریب تعیین (R^2) | احتمال (prob) | آماره t | مقدار برآورد شده | ضریب |
|----------------------|---------------|---------|------------------|------------|
| ۰/۹۷/۶ | ۰/۰۰۸ | ۲/۸۱ | ۰/۰۰۰۰۷۵ | α_1 |
| | ۰/۰۰۰ | ۵/۶۸ | ۹/۴۲۵ | β_1 |
| | ۰/۰۳۸۳ | ۲/۱۷ | ۵۵۳۸۴ | γ_1 |
| ۰/۹۸ | ۰/۰۳۵ | ۲/۲۱ | ۰/۰۰۵ | α_2 |
| | ۰/۰۲۸ | ۵/۳۱ | ۶/۸۸۱ | β_2 |
| | ۰/۰۰۶ | ۲/۹۵ | ۲۵۲۲/۸ | γ_2 |

منبع: یافته‌های تحقیق

برای تبدیل این توابع که برحسب کیلوگرم هستند به تابع هزینه (برحسب ریال) از ضریب تبدیل استفاده می‌شود. همانطور که در فصل پیش بحث شد ما از زیان ریالی که انتشار یک واحد SO_2 بر محیط‌زیست ایجاد می‌کند به‌عنوان ضریب تبدیل استفاده کرده‌ایم. مقدار این ضریب از مطالعه بانک جهانی در گزارش بازنگری زیست‌محیطی (EER)^۱ در ایران، آورده شده است. تابع هزینه انتشار آلاینده SO_2 برای نیروگاه منتظری و نیروگاه اصفهان به ترتیب بصورت رابطه (۱۷) و (۱۸)، محاسبه شده است.

$$EC_1 (Rls / h) = 14600(0.000075 p_1^2 + 9.425 P_1 + 55384) \quad (17)$$

$$EC_2 (Rls / h) = 14600(0.005 P_2^2 + 6.881 P_2 + 2522.8) \quad (18)$$

بنابراین تابع هزینه انتشار آلاینده (هزینه خارجی) در یک روز مشخص (مجموع ۲۴ ساعت) برای کل منطقه اصفهان بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$TEC = 14600 \sum_T (0.000075 p_{1T}^2 + 9.425 P_{1T} + 55384 + 0.005 P_{2T}^2 + 6.881 P_{2T} + 2522.8)$$

$$T=1,2,\dots,24 \quad (۱۹)$$

که در این رابطه TEC^1 هزینه کل انتشار آلاینده بر حسب (RIs/h) است.

با توجه به روابط (۱۴) و (۱۹) تابع هزینه اجتماعی برای کل منطقه اصفهان به صورت زیر است:

$$TSC = TPC + TEC \quad (۲۰)$$

که در این رابطه TSC^2 ، هزینه اجتماعی کل است.

نتایج محاسبه هزینه اجتماعی نهایی با استفاده از بهینه‌سازی تابع هدف پیشنهادی با توجه به دو محدودیت تقاضا و تولید گفته شده در بالا، در جدول ۴ آورده شده است. به منظور به دست آوردن نتایج واقعی‌تر، مدل با قیمت‌های داخلی و قیمت‌های خارجی به طور جداگانه حل شده است. همچنین جهت محاسبه مدل از نرم‌افزار GAMS بهره‌گیری شده است. این نرم‌افزار از روش لاگرانژ مرحله‌ای^۳ برای حل مسائل غیرخطی استفاده می‌کند.

جدول ۴. هزینه اجتماعی نهایی کوتاه مدت تولید برای روزیست و ششم آذرماه هشتاد و هشت (RIs/MWh)

| ساعت | قیمت داخلی | قیمت جهانی | ساعت | قیمت داخلی | قیمت جهانی |
|------|------------|------------|------|------------|------------|
| ۱ | ۱۵۶۱۵۰ | ۵۹۸۶۳۰ | ۱۳ | ۱۷۸۵۲۰ | ۶۸۲۸۵۰ |
| ۲ | ۱۵۵۹۴۰ | ۵۹۷۸۷۰ | ۱۴ | ۱۵۶۷۲۰ | ۶۰۰۶۰۰ |
| ۳ | ۱۵۵۸۳۰ | ۵۹۷۳۹۰ | ۱۵ | ۱۵۶۶۷۰ | ۶۰۰۴۹۰ |
| ۴ | ۱۵۵۷۹۰ | ۵۹۷۲۰۰ | ۱۶ | ۱۵۶۵۹۰ | ۶۰۰۲۰۰ |
| ۵ | ۱۵۵۸۲۰ | ۵۹۷۳۵۰ | ۱۷ | ۱۷۷۳۰۰ | ۶۷۷۹۵۰ |
| ۶ | ۱۵۵۸۵۰ | ۵۹۷۵۲۰ | ۱۸ | ۲۲۱۵۵۰ | ۸۵۴۷۹۰ |
| ۷ | ۱۵۶۰۷۰ | ۵۹۸۳۳۰ | ۱۹ | ۲۱۹۲۸۰ | ۸۴۵۷۰۰ |
| ۸ | ۱۵۶۲۹۰ | ۵۹۹۱۲۰ | ۲۰ | ۲۰۲۸۴۰ | ۷۸۰۰۰۰ |
| ۹ | ۱۷۷۴۷۰ | ۶۷۸۶۵۰ | ۲۱ | ۱۵۶۵۷۰ | ۶۰۰۱۳۰ |
| ۱۰ | ۱۹۳۲۱۰ | ۷۴۱۵۶۰ | ۲۲ | ۱۵۶۵۲۰ | ۵۹۹۹۴۰ |
| ۱۱ | ۲۰۵۶۳۰ | ۷۹۱۱۸۰ | ۲۳ | ۱۵۶۳۵۰ | ۵۹۹۳۲۰ |
| ۱۲ | ۲۰۶۸۶۰ | ۷۹۶۰۷۰ | ۲۴ | ۱۵۶۰۲۰ | ۵۹۸۱۶۰ |

منبع: یافته‌های تحقیق

1. Total Emission Cost
2. Total Social Cost
3. Projected Lagrangian

همچنین مدل یک بار بدون لحاظ کردن هزینه‌های خارجی نیز حل شده و هزینه نهایی خصوصی تولید محاسبه شده است. در جدول ۶ تفاوت بین هزینه خصوصی و اجتماعی نهایی تولید برق در منطقه مورد مطالعه را که هزینه خارجی نهایی نامیده می‌شود نشان می‌دهد. با درونی کردن هزینه‌های خارجی در هزینه‌های تولید و محاسبه هزینه اجتماعی نهایی تولید (جدول ۴) افزایش هزینه‌های تولید کاملاً آشکار است. با اینکه در این تحقیق تنها هزینه خارجی آلاینده SO_2 در نظر گرفته شده است اما باز هم تفاوت هزینه خصوصی با هزینه اجتماعی در منطقه مورد مطالعه شایان توجه است.

جدول ۵. هزینه اجتماعی نهایی تولید برای سه حالت پرباری، کم‌باری و میان‌باری در بازار برق منطقه‌ای اصفهان (RIs/MWh)

| هزینه اجتماعی نهایی با قیمت خارجی | هزینه اجتماعی نهایی با قیمت سوخت یارانه‌ای | هزینه زمان |
|-----------------------------------|--|------------|
| ۸۱۳۵۴۸ | ۲۱۱۲۳۲ | پرباری |
| ۶۳۴۶۲۴/۵۴ | ۱۶۵۶۵۵/۴۵ | بارمیانی |
| ۵۹۷۸۰۷/۱۲ | ۱۵۵۹۳۴/۲۵ | کم‌باری |

منبع: یافته‌های تحقیق

لازم به ذکر است که از آنجا که محاسبه هزینه‌ها با قیمت‌های یارانه‌ای سوخت، نتایج قابل اطمینانی در مورد هزینه‌های تولید به وجود نمی‌آورد، در جدول ۶ مقدار هزینه خارجی نهایی در حالتی ارائه شده است که قیمت سوخت بدون یارانه (قیمت خارجی) وارد مدل شده است.

با توجه به جدول ۶، می‌توان هزینه خارجی نهایی تولید در منطقه مورد مطالعه را برای ۳ حالت کم‌باری، بارمیانی و پرباری به ترتیب ۱۵۰۷۸۵، ۱۶۰۱۹۱ و ۲۰۴۲۱۲ (RIs/MWh) دانست که این مقدار در محاسبات هزینه نیروگاه‌ها مورد توجه قرار نمی‌گیرد که این خود سبب شده که هزینه‌های تولید کمتر از حد واقعی برآورد شود و بنابراین قیمت ارائه شده در بازار، با قیمت واقعی برق تولیدی که در آن هزینه اجتماعی نهایی مدنظر قرار می‌گیرد تفاوت زیادی داشته باشد. این در حالی است که در بازارهای برق اروپا و آمریکا هزینه خارجی مربوط به آلاینده‌ها به صورت مالیات‌های محیط‌زیستی در محاسبات هزینه‌ها در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۶. هزینه اجتماعی نهایی، هزینه خصوصی نهایی و هزینه خارجی نهایی تولید برای روز بیست و ششم آذر ماه هشتاد و هشتم (RIs/MW)

| ساعت | هزینه اجتماعی نهایی | هزینه خصوصی نهایی | هزینه خارجی نهایی |
|------|---------------------|-------------------|-------------------|
| ۱ | ۵۹۸۶۳۰ | ۴۴۷۶۳۰ | ۱۵۱۰۰۰ |
| ۲ | ۵۹۷۸۷۰ | ۴۴۷۰۸۰ | ۱۵۰۷۹۰ |
| ۳ | ۵۹۷۳۹۰ | ۴۴۶۷۱۰ | ۱۵۰۶۸۰ |
| ۴ | ۵۹۷۲۰۰ | ۴۴۶۵۴۰ | ۱۵۰۶۶۰ |
| ۵ | ۵۹۷۳۵۰ | ۴۴۶۶۸۰ | ۱۵۰۶۷۰ |
| ۶ | ۵۹۷۵۲۰ | ۴۴۶۸۳۰ | ۱۵۰۶۹۰ |
| ۷ | ۵۹۸۳۳۰ | ۴۴۷۴۲۰ | ۱۵۰۹۱۰ |
| ۸ | ۵۹۹۱۲۰ | ۴۴۷۹۹۰ | ۱۵۱۱۳۰ |
| ۹ | ۶۷۸۶۵۰ | ۵۰۷۰۲۰ | ۱۷۱۶۳۰ |
| ۱۰ | ۷۴۱۵۶۰ | ۵۵۴۷۳۰ | ۱۸۶۸۳۰ |
| ۱۱ | ۷۹۱۱۸۰ | ۵۹۲۳۷۰ | ۱۹۸۸۱۰ |
| ۱۲ | ۷۹۶۰۷۰ | ۵۹۶۰۸۰ | ۱۹۹۹۹۰ |
| ۱۳ | ۶۸۲۸۵۰ | ۵۱۰۲۰۰ | ۱۷۲۶۵۰ |
| ۱۴ | ۶۰۰۶۰۰ | ۴۴۹۱۱۰ | ۱۵۱۵۵۰ |
| ۱۵ | ۶۰۰۴۹۰ | ۴۴۸۹۹۰ | ۱۵۱۵۰۰ |
| ۱۶ | ۶۰۰۲۰۰ | ۴۴۸۷۸۰ | ۱۵۱۴۲۰ |
| ۱۷ | ۶۷۷۹۵۰ | ۵۰۶۴۰۹ | ۱۷۱۴۶۰ |
| ۱۸ | ۸۵۴۷۹۰ | ۶۴۰۶۲۰ | ۲۱۴۱۷۰ |
| ۱۹ | ۸۴۵۷۰۰ | ۶۳۳۷۲۰ | ۲۱۱۹۸۰ |
| ۲۰ | ۷۸۰۰۰۰ | ۵۸۳۸۹۰ | ۱۹۶۱۱۰ |
| ۲۱ | ۶۰۰۱۳۰ | ۴۴۸۷۳۰ | ۱۵۱۴۰۰ |
| ۲۲ | ۵۹۹۹۴۰ | ۴۴۸۵۹۰ | ۱۵۱۳۵۰ |
| ۲۳ | ۵۹۹۳۲۰ | ۴۴۸۱۴۰ | ۱۵۱۱۸۰ |
| ۲۴ | ۵۹۸۱۶۰ | ۴۴۷۲۹۰ | ۱۵۰۸۷۰ |

منبع: یافته‌های تحقیق

همانطور که اشاره شد روش اخذ هزینه دفع آلاینده‌ها و مالیات‌های زیست‌محیطی از ابزارهای مبتنی بر بازار در اختیار دولت برای رسیدن به تخصیص بهینه منابع است. این مالیات‌ها منجر به داخلی کردن هزینه‌های خارجی می‌شود و زمینه تحقق وضعیت بهینه پارتو را مهیا می‌سازد. با توجه به این موضوع که نرخ بهینه مالیات‌های محیط‌زیستی برابر با هزینه خارجی نهایی در سطح کارآمد اجتماعی انتشار آلودگی است (با مول و اتس، ۱۹۸۸)^۱، بنابراین محاسبات انجام شده در جدول ۶ می‌تواند به‌عنوان معیاری مناسب در

جهت تعیین نرخ مالیات بر انتشار آلاینده‌ها باشد. سطح کارآمد اجتماعی انتشار آلودگی زمانی اتفاق می‌افتد که منافع نهایی ناشی از رفع آلودگی برای واحدهای اقتصادی برابر با هزینه نهایی انتشار آلاینده باشد. از آنجایی که استفاده از وسایل کنترل آلودگی، هزینه دارد، نیروگاه‌ها بایستی هزینه وسایل کنترلی و مالیات پرداختی را با هم مقایسه کنند. با کنترل و کاهش میزان آلودگی، میزان مالیات پرداختی کاهش خواهد یافت. با توجه به مطالب ارائه شده می‌توان گفت که عدم توجه به هزینه‌های زیست‌محیطی تولید برق باعث ایجاد آثار مخرب بر منابع مورد استفاده می‌شود و به‌عنوان نیرویی محرک، سیستم تولید برق را به سوی ناپایداری سوق می‌دهد.

به نظر می‌رسد برآورد هزینه‌های زیست‌محیطی و لحاظ کردن آن در هزینه نهایی تولید برق گامی است به سوی شفاف‌سازی فرآیند قیمت‌گذاری کالا و خدمات در بخش انرژی که زمینه علمی لازم برای حرکت به سوی قیمت‌گذاری مبتنی بر بازار در مورد مصرف برق کشور فراهم می‌شود.

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

با توجه به نتایج بدست آمده از بهینه‌سازی تابع هدف هزینه خصوصی و همچنین بهینه‌سازی تابع هدف هزینه اجتماعی در ۲۴ ساعت روز مورد مطالعه و همچنین براساس تفاوت بین هزینه اجتماعی نهایی و هزینه خصوصی نهایی محاسبه شده، که بصورت هزینه خارجی نهایی برای روز مورد مطالعه در جدول ۶ ارائه شده است، به این نتیجه می‌رسیم که هزینه خارجی نهایی که در محاسبات هزینه‌ها در صنعت برق کشور وارد نمی‌شوند، حتی در ساعت‌های کم‌باری تولید که کمترین انتشار آلاینده در نیروگاه‌ها رخ می‌دهد به‌طور میانگین برابر 150785 (Rls/MWh) است که همانطور که نشان داده شد در ساعت‌های پرباری این مقدار به بالاتر از 204000 (Rls/MWh) می‌رسد. این تفاوت بالا بین هزینه خصوصی نهایی و هزینه اجتماعی نهایی ضرورت مبنا قرار دادن هزینه‌های اجتماعی در محاسبه هزینه‌ها، و همچنین در راستای حرکت صنعت برق به سمت شرایط بهینه اجتماعی، قیمت‌گذاری براساس هزینه اجتماعی نهایی را بیان می‌کند.

محاسبات هزینه تولید با سوخت مصرفی مازوت (انرژی‌های فسیلی) با در نظر گرفتن هزینه‌های خارجی تولید و همچنین قیمت سوخت آزاد، نشان دهنده هزینه‌های اجتماعی تولید بسیار بالاست. این هزینه‌ها، بسیاری از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر را در شرایط رقابتی با سوخت‌های فسیلی از جمله مازوت، جهت تولید برق قرار می‌دهد و انتظار می‌رود برخی از این منابع تجدیدپذیر را از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نماید. در این تحقیق مقدار هزینه خارجی نهایی در منطقه مورد مطالعه را برای ۳ حالت کم‌باری، باریانی و پرباری به ترتیب 150785 ، 160191 و 204212 (Rls/MWh) محاسبه شده است و از آنجا که نرخ بهینه

مالیات برای آلاینده‌ها برابر با هزینه خارجی نهایی آن‌ها است بنابراین می‌توان از این مقدار جهت برقراری مالیات محیط‌زیستی برای نیروگاه‌های منطقه استفاده نمود.

تفاوت بین هزینه متوسط متغیر تولید که مبنای قیمت‌گذاری در صنعت برق ایران است و هزینه نهایی کوتاه‌مدت تولید (به‌عنوان معیاری مناسب در جهت قیمت‌گذاری) بیانگر شرایط انحصار طبیعی و عدم کارایی سیستم قیمت‌گذاری و تولید در صنعت برق کشور است و تفاوت زیاد بین قیمت سوخت جهانی و سوخت داخل که از یارانه بالای دولت در این صنعت ناشی می‌شود سبب می‌شود ناکارایی و مشکلات موجود در سیستم بروز یافته و قیمت پایین سوخت سرپوش مشکلات موجود در سیستم باشد و بنگاه‌ها فشاری در جهت افزایش کارایی احساس نکنند.

باتوجه به نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، پیشنهادات زیر ارائه می‌شود.

درونی کردن هزینه‌های خارجی تولید در هزینه‌های نیروگاه‌ها به‌وسیله مالیات‌های زیست‌محیطی و تعیین نرخ مالیات براساس هزینه خارجی نهایی آلاینده‌ها.

فراهم کردن زمینه تجدید ساختار در صنعت برق و حرکت از ساختار انحصار طبیعی و دولتی به بخش خصوصی و تلاش در جهت اصلاح روند کنونی قیمت‌گذاری در صنعت برق و توجه به هزینه‌های اجتماعی در فرآیند قیمت‌گذاری انرژی الکتریکی.

باتوجه به محدودیت منابع انرژی فسیلی و آلاینده‌گی ناشی از بکارگیری آن‌ها در کنار ضرورت تنوع بخشی به منابع انرژی، برنامه‌ریزی جهت بهره‌برداری از منابع انرژی جایگزین و تشویق نیروگاه‌ها به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

منابع و مآخذ

پرمن، راجر؛ یوما، جیمز و مک‌گیل‌ری (۱۳۸۲)، **اقتصاد محیط‌زیست و منابع طبیعی**، ترجمه حمیدرضا ارباب، تهران: نشرنی. چاپ اول.

شرکت مادر تخصصی توانیر (۱۳۸۷)، **آمار تفصیلی صنعت برق ایران**.

وود، ا. جی. وب. اف و ولنبرگ (۱۳۷۱)، **تولید، بهره‌برداری و کنترل در سیستم‌های قدرت**، ترجمه حسین

سیفی، تهران: انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، چاپ اول.

Baumol, W.J., and Oates, W.E. (1988). "The Theory of Environmental Policy". *Cambridge University Press*.

Bozicevic, M., Zeljko, T. and Nenad, D. (2005). "External Cost of Electricity Generation: Case Study Croatia". *Energy Policy*, Vol. 33, pp. 1385-1395.

Bui, d. (1996). "Using Damage Method to Value Environmental Externalities of Power Generation Difficulties Facing DCS". Thailand, Bangkok, Kasetsart University.

Cai, J.ma, X.Li, Q.Li, L. and Peng, H. (2010). "A Multi-Objective Chaotic Ant Swarm Optimization for Environmental/Economic Dispatch". *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 32, pp. 337-344.

Koomey, J. and Florentine, K. (1997). "Introduction to Environmental Externality Costs", *Energy Analysis Program*.

Kumar, A.I.S., Dhanushkodil, K., Kumar, J. and Paul, C.K.C. (2003). "Particle Swarm Optimization Solution to Emission and Economic Dispatch Problem". In Proc. Conf. on Convergent Technologies for Asia-Pacific Region, Vol. 1, PP. 435-439.

Palanichamy, C. and Babu, N. (2008). "Analytical Solution for Combined Economic and Emissions Dispatch". *Electr Power Syst Res*, Vol. 78, No.7, PP. 1129-1139.

Schweppe, F., Caramanis, M. and Bohn, R. (1988). "Spot Pricing of Electricity". Kluwer Academic Publisher, Boston.

Scott, J.C. and Janet, M.T. (2000). "Environmental Economics and Management". UK, Harcourt College Publishers.

Streimikiene, D. and Pusinaite, R. (2008). "External Cost of Electricity Generation in Lithuania". *Environmental Research, Engineering and Management*, Vol. 44 No. 2, PP. 34-40.

Thakury, T., Sem, K., Saini, S. and Sharma, S. (2006). "A Particle Swarm Optimization Solution to NO₂ and SO₂ Emissions for Environmentally Constrained Economic Dispatch Problem". In Proc. IEEE/PESTransmission & Distribution Conf. and Exposition, PP. 1-5, 15-18.

Thurston, D., and Srinivasan, S. (2003). "Constrained Optimization for Green Engineering Decision-Making". *Environmental science & technology*, vol. 37, PP 5389-5397.