مدل‌سازی توزیع بار همزمان اقتصادی و زیست محیطی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ε – محدودیت (مورد مطالعاتی: بازار برق منطقه‌ای اصفهان)

علی ناظمی[1]، شادی خلیل‌مقدم[2]، مجید فشاری[3]

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۰/۰۷ تاریخ پذیرش: ۹٤/۱۱/۱۲

چکیده

در سال‌های اخیر افزایش نگرانی‌ها در زمینه محیط زیست باعث توجه بیش از پیش به این بخش گردیده است. بر این اساس مدل‌های توزیع اقتصادی بار که پیش از آن صرفاً حداقل‌سازی هزینه تولید و تعیین آرایش بهینه تولیدکنندگان بر اساس حداقل شدن هزینه کل را مد نظر قرار می‌دادند، امروز با تغییر بنیادی در نحوه اجرا و مدل‌سازی مواجه شده‌اند. بر این اساس در این مدل‌ها آرایش بهینه تولیدکنندگان بر اساس دو هدف حداقل هزینه تولید و حداقل آلودگی محیط زیست تعیین خواهد شد و بدیهی است در این شرایط مسئله پیش رو از یک مسئله تک هدفه به یک مسئله چند هدفه تغییر می‌کند. تحقیق حاضر نیز مسئله توزیع بهینه اقتصادی و زیست محیطی را مد نظر قرار می‌دهد؛ و هدف آن تعیین

۱. استادیار دانشکده اقتصاد دانشگاه خوارزمی Email: Nazemi@khu.ac.ir

۲. کارشناس ارشد مهندسی صنایع- گرایش سیستم‌های اقتصادی اجتماعی، دانشگاه خوارزمی، (نویسنده مسئول) Email: shadi_moghaddam@yahoo.com

۳. استادیار دانشکده اقتصاد دانشگاه خوارزمی Email: majid.feshari@gmail.com

آرایش بهینه تولیدکنندگان در حالتی است که هر دو هدف اقتصادی و زیست محیطی تحقق یافته است. روش اجرای مدل با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی اپسیلون محدودیت بوده و مدل‌سازی انجام شده در این مطالعه نیز بر اساس داده‌های واقعی بازار برق منطقه‌ای اصفهان در سال ۱۳۹۱ اجرا شده است. نتایج تحقیق حاکی از آن است که عملکرد واقعی بازار با بهینه اقتصادی و زیست محیطی متفاوت است و به دلیل عدم توجه به هزینه‌های زیست محیطی، عملا انحراف عملکرد واقعی نسبت به وضعیت بهینه در بخش زیست محیطی بسیار جدی‌تر و بیشتر است. بعلاوه اینکه روش مورد استفاده امکان استخراج منحنی مبادله اقتصادی-زیست محیطی را نیز بوجود می‌آورد. بعلاوه با استفاده از مجموعه جواب حاصل، امکان ترسیم منحنی بی تفاوتی بوجود می‌آید. ترسیم منحنی بی‌تفاوتی و دستیابی به یک مجموعه جواب بهینه اطلاعات مفیدی در اختیار تصمیم گیران و مدیران قرار می‌دهد.

طبقه بندی JEL: Q31: Q32: P48: C30:C61

واژگان کلیدی: توزیع بار، توزیع اقتصادی بار، توزیع اقتصادی-زیست محیطی بار، بهینه سازی چند هدفه، الگوریتم بهینه‌سازی ε – محدودیت.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

۱. مقدمه

یکی از اهداف مهم در دنیای امروز توزیع بهینه‌ی بار الکتریکی در میان مراکز تولید می‌باشد. نیروگاههای مختلف ظرفیت های تولید متفاوتی دارند. و مجموع این ظرفیت تولید عموما از تقاضا در هر بازه زمانی بالاتر است و بر همین اساس است که مسئله توزیع اقتصادی بار به مفهوم تعیین مراکز تولید از بین کل توان تولیدی به نحوی که کارایی تولید وجود داشته باشد، مطرح می‌شود. توزیع اقتصادی بار[1] بیانگر توزیع بار در میان نیروگاهها با در نظر گرفتن بحث اقتصادی (کاهش هزینه‌ی سوخت) می‌باشد. اما امروزه مسائل مهم دیگری همچون بحث محیط زیست و انتشار بیش از حد گازهای گلخانه‌ای نیز مطرح شده‌اند. برخی از گازهای گلخانه‌ای به طور طبیعی در جو زمین وجود دارند، در حالیکه برخی دیگر در اثر فعالیت های بشری به وجود می‌آیند. این گازها مانند شیشه‌های گلخانه‌ای عمل کرده و باعث گرم شدن کره‌ی زمین می‌شوند، که نه تنها برای انسانها، بلکه برای گیاهان و حیوانات نیز مضر هستند. سوزاندن سوخت‌های فسیلی در نیروگاهها یکی از دلایل اصلی تولید این گازها می‌باشد، از اینرو سعی بر این است که با راهکارهایی مناسب میزان انتشار کاهش یابد. جایگزینی تجهیزات قدیمی نیروگاهها با تجهیزات جدید و نصب تجهیزات فیلتر کننده‌ی آلاینده ها در نیروگاهها ازجمله راهکارهای کاهش انتشار می‌باشند. اما نیاز به سرمایه‌گذاری های بالا باعث شده که این روش‌ها در برنامه‌ریزی‌های بلند مدت در نظر گرفته شوند. در برنامه‌ریزی‌های کوتاه مدت سعی بر آن است که همزمان با کاهش هزینه‌ی سوخت میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز کاهش یابد (جمشیدپور، ۱۳۸۰).

در این مطالعه مسئله‌ی توزیع اقتصادی و توزیع اقتصادی- زیست محیطی بار[2] با در نظر گرفتن محدودیت‌های تعادل و حداقل و حداکثر ظرفیت تولید، مدل‌سازی می‌شوند. به عبارت دیگر در این تحقیق تلاش شده است که حداقل‌سازی همزمان هزینه تولید کوتاه‌مدت برق (بهینه‌سازی اقتصادی) و میزان انتشار آلاینده‌های محیط زیست (بهینه‌سازی

1. Economic Load Dispatch
2. Economic and Environmental Load Dispatch

زیست محیطی) به صورت همزمان و در قالب یک مسئله بهینه‌سازی دو هدفه مورد توجه قرار گیرد. روش مورد استفاده در این بهینه‌سازی دو هدفه، الگوریتم ε – محدودیت[1] می‌باشد. با استفاده از این روش مجموعه جواب پارتو (نامغلوب) بدست می‌آید. مهمترین تفاوت پژوهش حاضر با مطالعات گذشته به روش مدل‌سازی و دستیابی به مجموعه جواب بهینه بازمی‌گردد. جواب‌های پارتو در اینجا ترکیب‌های بهینه‌ی نیروگاهها و میزان تولیدشان برای دستیابی به حداقل همزمان اهداف مسئله می‌باشند. مزیت بدست آوردن مجموعه جواب پارتو این است که بهینه بودن را معطوف به یک ترکیب نمی‌کند، زیرا در عمل ممکن است دسترسی به یک ترکیب خاص امکان پذیر نباشد، لیکن مجموعه جواب پارتو امکان استفاده از گزینه‌های دیگر را نیز در اختیار اپراتور مرکزی و یا بخش تصمیم‌گیری قرار می‌دهد. این در حالی‌است که پژوهش‌های گذشته در این حوزه عموما بر مدل‌سازی تک هدفه اقتصادی متمرکز شده اند و یا با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چند هدفه به یافتن نقطه بهینه متمایل بوده‌اند. تحقیق حاضر از این بعد مدل‌سازی، روش حل مسئله و رویکرد پرداختن به موضوع متفاوت از مطالعات پیشین است. در بخش مدل‌سازی با استفاده از داده‌های واقعی تابع هزینه کوتاه مدت تولید برق و تابع انتشار آلاینده‌های محیط زیست بر اساس تفکیک نوع آلاینده برآورد و مدل شده‌اند. روش ابسیلون محدودیت نیز برای اولین بار برای حل مسئله بهینه‌سازی همزمان اقتصادی و زیست محیطی مورد استفاده قرار می‌گیرد و علت اصلی استفاده از این روش هم توجه به انعطاف حاصل از حل مسئله با استفاده از این روش می‌باشد. همانگونه که ذکر شد دستیابی به مجموعه جواب‌های بهینه پارتو عملا یک مجموعه راه‌حل به عنوان مبنای تصمیم‌گیری در اختیار برنامه‌ریزان قرار خواهد داد. در این مقاله از اطلاعات واقعی نیروگاههای بازار برق منطقه‌ای اصفهان در سال ۱۳۹۱ استفاده شده است.

در ادامه مبانی نظری تحقیق، مفاهیم توزیع بار، توزیع اقتصادی و توزیع زیست محیطی بار عنوان شده و سپس ادبیات تحقیق به تفکیک پژوهش‌های انجام شده در زمینه توزیع

1. ε – const raint

اقتصادی و توزیع اقتصادی- زیست محیطی ارائه شده است. پس از آن با استفاده از داده‌های موجود مسئله‌ی مورد نظر مدل‌سازی شده و در پایان، نتایج حاصل از اجرای مدل و تجزیه و تحلیل آن بیان می‌شود.

۲. مبانی نظری تحقیق

پیش از تجدید ساختار صنعت برق به صورت متمرکز و بر اساس یک سیستم کنترل شده و تنظیم مقررات شده اداره می‌شد. در این ساختار ورود و خروج تولیدکنندگان به مدار بر اساس منطق و تصمیم‌گیری مرکز کنترل سیستم یا به عبارت دیگر برنامه ریز مرکزی انجام می‌شد. در این ساختار برنامه ریز مرکزی بر اساس محدودیت‌ها و منطقی که تعریف می شود به منظور برابری عرضه و تقاضا در هر ساعت اقدام به تعیین نیروگاه‌های فعال (روشن) و غیر فعال (خاموش) می‌نماید. به عبارت دیگر در تضاد با مبانی نظری اقتصاد، آنچه تعیین کننده میزان عرضه و منافع بازیگران است منطق بازار یا دست نامریی بازار محسوب نمی شود و بطور کامل توسط سیستم، طراحی نحوه تولید و فعالیت بازیگران انجام خواهد شد.

در این ساختار برنامه ریز مرکزی به منظور تصمیم‌گیری برای تولید و پوشش تقاضا از حداکثر سازی تابع رفاه اجتماعی (یا حداقل سازی هزینه) بر اساس محدودیت‌هایی که سیستم با آن مواجه است استفاده خواهد کرد. محدودیت‌های شناخته شده شامل محدودیت برابری عرضه و تقاضا، محدودیت‌های فنی تولیدی، محدودیت‌های سیستم انتقال و توزیع می‌باشند؛ لیکن بدیهی است که با توجه به شرایط سیستم محدودیت‌های دیگری نیز می‌تواند وجود داشته باشد.

بدیهی است خروجی این مدل لیست نیروگاه‌هایی است که با توجه به محدودیت‌های مدل‌سازی شده و تابع هدف مسئله، امکان تولید با کمترین هزینه را داشته باشند. به عبارت دیگر در این مدل‌سازی برنامه ریز مرکزی در هر بازه اجرای بازار با توجه به شرایطی که پیش رو دارد، به منظور پوشش تقاضا از بین کل تولیدکنندگان، کم هزینه‌ترین آنها را برای پوشش تقاضای مورد نظر انتخاب خواهد کرد. در این ساختار لیست حاضران در بازار

بر اساس حداقل سازی هزینه تولید تعیین شده است و رقابت به عنوان عنصر محرک ساختار اقتصادی که به توسعه نوآوری، کاهش هزینه و... می‌انجامد از فرایند تعیین برندگان بازار حذف شده است.

بزرگترین مزیت این ساختار این‌است که با توجه به اینکه برنامه‌ریز مرکزی تمام اطلاعات مربوط به تولیدکنندگان را در اختیار دارد می تواند کارایی تولید را تضمین نماید. به این مفهوم که در ساختار تنظیم مقررات شده کم‌هزینه ترین تولیدکنندگان در هر زمان به منظور پوشش تقاضا مورد استفاده قرار گرفته‌اند که از منظر اقتصادی تضمین کننده شرایط کارایی تولید خواهد بود.

در کنار مدل‌های توزیع اقتصادی بار، مدل‌های مربوط به توزیع زیست‌محیطی نیز ارائه گردیده است. گسترش این مدل‌ها با توجه به افزایش نگرانی‌ها نسبت به مباحث زیست محیطی و در دهه نود آغاز شد. پیش از آن برنامه ریز مرکزی صرفا حداقل سازی هزینه تولید برق در شبکه و سیستم تولید را مد نظر قرار می‌داد لیکن با افزایش نگرانی‌های زیست محیطی بحث استفاده از روش‌هایی که بتواند بر محدویت‌های زیست محیطی نیز توجه داشته باشد، گسترش یافت و موضوع توزیع زیست محیطی نیز در دسته مطالعات قرار گرفت.

آنچه به عنوان توزیع زیست محیطی بار شناخته می‌شود مدل‌هایی است که بر حداقل‌سازی آلودگی‌های ناشی از تولید برق در نیروگاه‌ها تاکید دارد. به عبارت دیگر در این مدل‌ها هدف پوشش تقاضای موجود در هر بازه اجرای بازار با استفاده از نیروگاه‌ها و تولیدکنندگانی است که کمترین میزان آلودگی زیست محیطی را به همراه داشته باشند. در این دسته مدل‌ها تابع هدف مسئله تحقیق تابع انتشار ذرات یا آلودگی در شبکه برق است. محدویت‌های مدل نیز همان محدودیت‌های فنی و تکنولوژیک در کنار محدودیت تعادلی شبکه خواهد بود. آنچه در ادبیات صنعت برق و مباحث پژوهشی تحت عنوان توزیع اقتصادی بار یا مدل‌سازی بهره‌برداری بهینه اقتصادی از نیروگاه‌ها شناخته می‌شود مدل‌سازی نحوه تهیه لیست تولیدکنندگان با توجه به شرایط شبکه و سیستم برق است.

۳. پیشینه تحقیق

توزیع اقتصادی بار دارای پیشینه‌ی قدیمی‌تری نسبت به مطالعات چندهدفه است. تابع هزینه می‌تواند به صورت خطی یا غیرخطی در نظر گرفته شود، اما به منظور تدقیق نتایج عموماً از توابع غیرخطی برای مدل‌سازی استفاده می‌شود. روشهای ریاضی و تکنیک‌های مختلف بهینه سازی نیز برای حل مسئله‌ی توزیع اقتصادی بار بکار گرفته شده اند.

رفیعی(۱۳۸۳) در مقاله‌ی خود یک استراتژی بر اساس برنامه ریزی درجه دوم جهت حل مسئله پخش بار بهینه، با در نظر گرفتن قید امنیت و تلفات سیستم ارائه می دهد. این روش مسئله را با یک تابع هدف درجه دوم بر حسب توان تولیدی واحدها بیان می کند؛ قیود نیز بصورت معادلات برابری و نابرابری خطی مدل شده اند. در این مقاله از روش سیمپلکس[1] جهت تعیین اینکه مسئله جواب دارد یا خیر و یافتن حل ممکن آن استفاده شده است. بی جامی (۱۳۹۰) و فلقی (۱۳۹۰) توسط الگوریتم جهش قورباغهٔ بهبودیافته[2] (ISLFA) مسئله را حل نموده‌اند. آنها اثر شیر بخار و سوخت های چندگانه را در مدل درنظر گرفته‌اند و قیود مطرح شده، برابری عرضه و تقاضا، محدودیت ظرفیت تولید، نرخ تغییر تولید و مناطق اجرایی ممنوعه می‌باشند. به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، نتایج حاصل با جواب های چند روش دیگر مانند الگوریتم ژنتیک[3] و برخی الگوریتم‌های ممتیک[4] مشابه، مقایسه شده استقاسمی مرزبالی(۱۳۹۱) از روش بهبود یافته کلونی مصنوعی زنبور عسل[5] (ABC) استفاده نموده، گرالد[6] (۱۹۷۳) الگوریتم ولف[7] و پوهانگ[8] (۱۹۹۵)، اُررو[9] (۱۹۹۶) و هسام[10] (۲۰۰۰) نیز الگوریتم ژنتیک را برای انجام

1. Simplex
2. Improved Shuffled Frog Leaping Algorithm
3. Genetic Algorithm
4. Memetic Algorithm
5. Artificial Bee Coloney
6. Gerald
7. Wolfe
8. Po-Hung
9. Orero
10. Hosam

توزیع اقتصادی به کار گرفته‌اند. هسام و همکاران در مقاله‌ی خود به مسئله‌ی امنیت نیز همزمان با مسئله‌ی اقتصادی توجه نموده‌اند. ابرهارت[1] و همکاران (1995) بهینه سازی توابع غیر خطی را با استفاده از روش بهینه سازی انبوه ذرات[2] (PSO) توصیف نموده‌اند. از دو نمونه برای اجرای مدل توزیع اقتصادی، با استفاده از روش های بهینه سازی انبوه ذرات و الگوریتم ژنتیک استفاده نموده، سپس به مقایسه‌ی دو روش نام برده پرداخته‌اند.

در تمامی تحقیقات مورد اشاره مسئله بهینه‌سازی تک هدفه مد نظر بوده و تمرکز اصلی محققان برتوسعه روش‌های حل مدل بهینه‌سازی قرار گرفته است. لیکن در سال‌های اخیر شکل توجه به موضوع تغییر یافته و مسئله از یک بهینه‌سازی تک‌هدفه به توجه همزمان به موضوع اقتصادی و زیست محیطی معطوف شده است.

هوشمند (۱۳۸۷) وکومار[3] (۲۰۰۳) توزیع اقتصادی-زیست محیطی را به روش بهینه سازی انبوه ذرات (PSO)، انجام داده‌اند. قیود به کار رفته در مسئله، برابری عرضه و تقاضا، محدودیت ظرفیت تولید ونرخ تغییر تولید می‌باشند. آنها اثر شیر بخار را در مدل‌سازی تابع هزینه‌ی سوخت درنظر گرفته و با استفاده از ضریب جریمه‌ی قیمتی[4]، تابع انتشار را به تابع هزینه‌ی انتشار تبدیل نموده‌اند.امینی (۱۳۹۱) در مقاله‌ای از الگوریتم بهینه سازی جهش قورباغهٔ بهبود یافته(ISLFA) استفاده نموده و قیود برابری عرضه و تقاضا ومحدودیت ظرفیت تولید را استفاده نموده است. در این مقاله به این مسئله توجه شده که در واقعیت ممکن است اهمیت هر یک از اهداف هزینه سوخت و آلودگی از دیدگاه بهره بردار سیستم یکسان نباشد، پس در مدل سازی تابع هدف از ضریب وزنی w استفاده شده است.

ونکاتش[5] (۲۰۰۳) با استفاده از روش های محاسبات تکاملی[6] (EC) مانند الگوریتم ژنتیک(GA)، MGA[7]، برنامه ریزی تکاملی[8] (EP) و راگلند[9] (۲۰۱۰) از ترکیب روشهای

1. Eberhart
2. Particle Swarm Optimization
3. Kumar
4. price penalty factor
5. Venkatesh
6. Evolutionary Computation
7. Micro Genetic Algorithm
8. Evolutionary Programming
9. Raglend

هوشمند مانند الگوریتم ژنتیک - برنامه ریزی تکاملی- بهینه سازی انبوه ذرات- تکامل دیفرانسیلی[1] (DE) به حل مسأله‌ی توزیع اقتصادی- زیست محیطی پرداخته اند. پالانی چامی[2] (۲۰۰۷) نیز از یک استراتژی تحلیلی بر پایه‌ی مدلسازی ریاضی استفاده نموده است. همچنین در این مدلسازی‌ها، برای استفاده از هزینه‌ی انتشار و تبدیل تابع دو هدفه به تک هدفه، از ضریب جریمه‌ی قیمتی استفاده شده است.

کریشنان[3] (۲۰۱۱) از الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات و الگوریتم ژنتیک و عابدینیا (۲۰۱۲) از روش MOICA[4] برای حل مسأله‌ی توزیع اقتصادی- زیست محیطی استفاده نموده‌اند. آنها اثر شیر بخار و محدودیت های برابری و نابرابری جریان توان را نیز در نظر گرفته‌اند. سینگلا[5] و همکاران (۲۰۱۳) در مقاله‌ی خود، مقایسه نتایج با استفاده از الگوریتم ژنتیک، بهینه سازی انبوه ذرات، الگوریتم SPEA[6] و سیستم ایمنی مصنوعی[7](AIS) را مد نظر قرار داده داده‌اند.

نکته حایز اهمیت در مروری بر مطالعات گذشته مرتبط با حوزه‌ی تحقیق به روند کلی مطالعات در این حوزه اختصاص دارد. بطور کلی عمده تحول رخ داده در این حوزه مربوط به بهبود تکنیکهای مربوط به روشهای بهینه سازی مدل می باشد و لیکن ساختار مدل تغییری نداشته و رویکرد مسئله نیز بیش از آنکه بر توسعه ابزارها و شاخص‌های برنامه‌ریزی قرار گیرد بر روش‌های مهندسی و بهینه‌سازی توجه نموده است. مطالعات مورد اشاره متکی بر داده‌های غیر واقعی و با رویکرد غیر سیاست‌گذارانه تهیه شده است که نقطه تفاوت بین این مطالعه نسبت به پژوهش‌های مورد اشاره نیز محسوب می‌شود.

٤. مدل‌سازی تحقیق

٤-١. تابع هزینه‌ی تولید کوتاه مدت و تابع انتشار

نظریه دوگانگی گام مهمی در برآورد توابع هزینه و تولید محسوب می شود. بر این اساس تحت قوانین مشخص تابع تولید و هزینه ای وجود دارد که دوگان یکدیگر هستند و

1. Differential Evolution
2. Palanichamy
3. Krishnan
4. Multi-Objective Imperialist Competitive Algorithm
5. Singla
6. Strength Pareto Evolutionary Algorithm
7. Artificial Immune System

تصریح تابع تولید (هزینه) بیانگر تابع هزینه (تولید) است (Christensen et al,۱۹۷۶). بنابراین هزینه ها را می توان در قالب تابع تولید و یا تابع هزینه مورد تحلیل قرار داد. تخمین مستقیم تابع تولید زمانی می تواند جذاب باشد که مقدار تولید یک متغییر درونزا در بخش مورد مطالعه محسوب شود و طبیعتا در صورتیکه تولید متغییر برونزا باشد، تعیین تابع هزینه روش منطقی تری است. قبل از تجدید ساختار در صنعت برق تولید یک متغییر برونزا محسوب می شد که در یک فضای قانونمند از طریق برنامه ریزی متمرکز تعیین می شد. در این دوره برآورد تابع هزینه در صنعت برق بسیار مرسوم و مورد توجه بود (Christensen et al,۱۹۷۶). با تشکیل بازارهای برق تولید به عنوان متغییر تصمیم بنگاهها مورد اهمیت قرار گرفت و بر این اساس برآورد تابع هزینه کوتاه مدت با استفاده از تابع تولید روش متداول تری است.

برق در نیروگاههای بخاری از طریق فرایند تبدیل سوخت حاصل می شود. در حالتیکه یک نیروگاه ساخته شده و در حال فعالیت است ظرفیت و تکنولوژی آن در کوتاه مدت امکان تغییر نداشته و ثابت است. به عبارت دیگر تولید یک واحد تابعی از مقدار سوخت مصرفی، تجهیزات نگهداری، نیروی انسانی و مشخصات فنی است. لیکن برای واحد ساخته شده می توان گفت:

$$Q_t = f(X_t, \overline{X_t}) \qquad (۱)$$

در این رابطه $\overline{X_t}$ بردار نهاده های ثابت و X_t نهاده های متغیر تولید را نشان می دهد. لذا تابع هزینه کوتاه مدت واحد با توجه به مقدار ثابت $\overline{X_t}$ در کوتاه مدت بصورت رابطه 2 است.

$$C_t(Q_t, W_t) = W_t f^{-1}(Q_t) \qquad (۲)$$

در این رابطه $C_t(Q_t W_t)$ تابع هزینه متغییر کوتاه مدت و W_t بردار قیمت نهاده در زمان t برای واحد مشخص محسوب می شود. بنابراین رابطه بین سوخت و مقدار تولید امکان تبیین تابع هزینه متغییر تولید در کوتاه مدت را در صنعت برق خواهد داشت.

در تصریح رابطه بین سوخت و تولید از یک رابطه ترمودینامیکی منطبق بر ویژگیهای واحدهای حرارتی استفاده می شود. این رابطه که منحنی ورودی خروجی۱ واحد حرارتی نام دارد، بر حسب یک رابطه غیر خطی درجه دوم یا درجه سوم، نرخ تبدیل انرژی ورودی به خروجی را تصریح می کند (Wood et al,۱۹۹۶). مهمترین عاملی که بخش غیر خطی منحنی را ایجاد می کند هزینه های شروع اولیه یا مصرف سوخت بدون تولید است. این هزینه ها موجب می شود با افزایش سطح تولید بر بازدهی واحد افزوده شده و تابع هزینه به فرم غیر خطی تبدیل شود. در تصریح غیر خطی به فرم درجه دوم، در کوتاه مدت این تابع به صورت زیر برآورد می‌شود:

$$C_{ti} = w(a_i {Q^2}_{ti} + b_i Q_{ti} + c_i) \qquad (۳)$$

در رابطه بالا C_{ti} هزینه کوتاه مدت واحد i در زمان t، w هزینه سوخت و a_i، b_i و c_i، ضرایب معکوس تابع تولید می‌باشند.

تابع انتشار نیز همانند تابع هزینه به صورت غیر خطی و درجه دو از میزان تولید است. لذا مدلسازی به صورت زیر می‌باشد:

$$E = \sum_{i=1}^{n} E_{ti} \qquad i = 1,2,\dots,n$$
$$E_{ti}(Q_{ti}) = \alpha_i Q_{ti}^2 + \beta_i Q_{ti} + \gamma_i \qquad (۴)$$

$E_{ti}(Q_{ti})$: میزان انتشار آلاینده توسط واحد i در زمان t $\left({Ton}/{h}\right)$

٤-۲. مدل پیشنهادی تحقیق

در سالهای اخیر با افزایش نگرانی ها در خصوص مشکلات زیست محیطی و ایجاد محدودیت برای بنگاههای تولید برق، روش هایی که الگوی تولید بهینه را با در نظر گرفتن شاخصهای زیست محیطی مد نظر قرار دهد بسیار متداول شده است. در مدل های توزیع

1 .Input Output Curve

اقتصادی بار، صرفا حداقل سازی هزینه های خصوصی تولید انجام می‌شود. این مدل ها عموما تحت عنوان الگوی بهینه پخش بار اقتصادی شناخته می شود. چرا که هدف تعیین سطح تولیدی است که امکان حداقل سازی هزینه های سیستم را داشته باشد. لیکن در مدل های زیست محیطی هدف تعیین سطح تولیدی است که حداقل آلودگیهای زیست محیطی را نیز به همراه داشته باشد. این مدل ها تحت عنوان الگوی بهینه پخش بار زیست محیطی متداول است. بنابراین بهینه سازی همزمان دو تابع با اهداف مختلف در دسته مدل های بهینه سازی چند هدفی قرار می گیرد. آنچه مسلم است توجه به یکی از ابعاد به تنهایی نمی‌تواند پاسخ‌گویی اهداف اقتصادی و کارایی مورد نظر باشد. از سوی دیگر پاسخ حاصل از هر یک از بهینه‌سازی‌های مورد اشاره متفاوت و آرایش تولیدکنندگان در هر یک از مدل‌های توزیع صرف اقتصادی و توزیع صرف زیست محیطی، آرایش گاهاً متضاد ایجاد می کند. بر این اساس توزیع همزمان اقتصادی و زیست محیطی در دسته توجه و مدل‌سازی قرار گرفت.

در چنین مواقعی که چندین تابع هدف با همدیگر ملاحظه می‌شوند هر تلاشی در جهت بهینه سازی یکی از توابع هدف به قیمت قربانی کردن اهداف دیگر ممکن است بیانجامد. بنابراین معمولاً در چنین مواقعی مجبور به در نظر گرفتن نوعی مصالحه بین این توابع هدف هستیم. همچنین چون قاعده و یا اولویت خاص برای حفظ صد در صد یکی از اهداف (توابع هدف) وجود ندارد، بنابراین استفاده از روش های بهینه سازی تک هدفه با مشکل مواجه خواهد شد، تکنیکی که در زمینه این نوع مسائل استفاده می شود، فرمولبندی مسئله با چند تابع هدف می باشد. لذا مدل استفاده شده در این پژوهش به صورت زیر می‌باشد:

$$Min\left[\text{هزینه تولید برق}\ ,\ \text{مقدار تولید آلودگی}\right]$$

روشها و مدل های متنوعی در راستای حل مسائل همزمان زیست محیطی و اقتصادی ارائه شده است. تنوع و توسعه این روشها صرفاً به تکنیکهای حل عددی باز می گردد و در چارچوب مدل تغییر قابل توجهی مشاهده نمی شود.

با توجه به انواع آلودگیهای منتشر شده توسط نیروگاههای تولید برق، در این تحقیق از مدل زیر برای برآورد استفاده می شود.

$$Min(C_t(Q_t w) E_t(Q_t))$$
$$s.t$$

$$\sum_{i=1}^{n} Q_i = Q_D + Q_L \qquad i = 1,2,\dots,n \qquad (۵)$$
$$Q_{ti}^{Min} \le Q_{ti} \le Q_{ti}^{Max} \quad i = 1,2,\dots,n \quad t = 1,2,\dots,m$$

در این مدل علایم بکار رفته به شرح زیر است.

$C_{ti}(Q_{ti})$ تابع هزینه کوتاه مدت تولید کنندگان در زمان مورد بررسی (t) بر حسب $(\ Rial/_h)$

Q_{ti}^{Max}: حداکثر توان عملی واحد i در زمان مورد بررسی (t) بر حسب (kwh)

Q_{ti}^{Min}: حداقل توان عملی واحد i در زمان مورد بررسی (t) بر حسب (kwh)

Q_t^D: مقدار مصرف که در زمان مورد بررسی (t) بر حسب (kwh)

Q_{ti}: سطح تولید واحد i در زمان مورد بررسی (t) بر حسب (kwh)

$E_{ti}^N(Q_{ti})$: میزان انتشار NO_x توسط واحد i در زمان t $(\ Ton/_h)$

$E_{ti}^S(Q_{ti})$: میزان انتشارذرات معلق (SPM) توسط واحد i در زمان t $(Ton/_h)$

$E_{ti}^C(Q_{ti})$: میزان انتشار دی اکسید کربن (CO_2) توسط واحد i در زمان t $(Ton/_h)$

بطوریکه:

$$C_t(Q_t, \mathrm{w}) = \sum_i C_{ti}(Q_{ti}, \mathrm{w}) \qquad (۶)$$

$$E_t(Q_t) = E_{ti}^N(Q_{ti}) + E_{ti}^S(Q_{ti}) + E_{ti}^C(Q_{ti}) \qquad (۷)$$
$$E_{ti}^N(Q_{ti}) = \left(\alpha_i^N Q_{ti}^2 + \beta_j^N Q_{ti} + \gamma_i^N\right)$$
$$E_{ti}^S(Q_{ti}) = \left(\alpha_i^S Q_{ti}^2 + \beta_i^S Q_{ti} + \gamma_i^S\right)$$
$$E_{ti}^C(Q_{ti}) = \left(\alpha_i^C Q_{ti}^2 + \beta_i^C Q_{ti} + \gamma_i^C\right)$$

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

در این رابطه α_i^{NSC} β_i^{NSC} γ_i^{NSC} ضرایب مربوط به توابع انتشار آلاینده‌های مختلف است. در این جا حداقل سازی هزینه بر اساس متغییر تولید در هر بازه زمانی انجام می شود. محاسبات نیز بر اساس توان عملی تولید واحدهای نیروگاهی خواهد بود. تولید عملی بیشترین توان قابل تولید مولد در محل نصب با در نظر گرفتن شرایط محیطی (ارتفاع از سطح دریا، دمای محیط و رطوبت نسبی) است(۱۳۸۹,ش م ت توانیر).

۵. اجرای مدل و ارائه نتایج

۵-۱. داده های مورد استفاده در اجرای مدل

در این پژوهش از داده های واقعی مربوط به سال ۱۳۹۱، برای مدل استخراج شده، مورد استفاده قرار گرفته است. داده‌های مورد استفاده شامل ۱۰۰ نمونه از سوخت مصرفی، میزان تولید الکتریسیته و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای به تفکیک می‌باشد.سوخت مصرفی نیروگاههای کشور شامل سه نوع سوخت گاز طبیعی، نفت کوره و گازوییل است. که در این میان گاز طبیعی ۷۴,۵ درصد، گازوییل ۸,۳ درصد و نفت کوره ۱۷,۲ درصد از کل سهم سوخت مصرف شده در کشور را بر عهده دارند. با توجه به اینکه عمده تولید برق با استفاده از گاز طبیعی صورت می گیرد، در این پژوهش نیز گاز طبیعی به عنوان سوخت مصرفی در نظر گرفته شده است که قیمت آن، ۷۰۰ ریال بر متر مکعب می‌باشد (ترازنامه انرژی کشور ۱۳۹۱).

نکته حایز اهمیت این‌است که تابع انتشار آلاینده‌ها و تابع هزینه کوتاه‌مدت برق مبتنی بر ویژگی‌های تکنولوژیک و ذاتی واحد حرارتی است. به عبارت دیگر تابع تولید با توجه به ویژگی فنی نیروگاه استخراج می‌شود. (Wood et al,۱۹۹۶). بنابراین زمان تولید اثر قابل توجهی بر تغییر ساختار عمومی تولید نخواهد داشت. در این بین شرایط محیطی می‌تواند بازده نیروگاه را کمی تحت تاثیر قرار دهد و از این طریق بر تابع هزینه کوتاه مدت و تابع انتشار آلاینده‌ها اثر گذارد. علی رغم این تأثیرات اندک که در مطالعات مرتبط نادیده گرفته می‌شود، در این پژوهش تلاش شده است میزان تأثیرات آب و هوایی

کاهش یابد، لذا داده های مورد نیاز یه‌صورت یکنواخت از کل سال جمع‌آوری شده است. مقادیر تقاضای مورد بررسی نیز مربوط به روزهای حداکثر و حداقل بار در ۴ فصل سال است. علت انتخاب این روزها نیز امکان مشاهده نوسانات واقعی تقاضا در روزهای مورد اشاره است. بنابراین می‌توان در مقادیر مختلف تقاضا که دو طرف طیف را شامل می‌شود، مدل را اجرا کرد. بر این اساس نتایج مدل در حالت‌های مختلف و مقادیر متفاوت تقاضا استخراج شده است. بازار مورد مطالعه نیز شرکت برق منطقه ای اصفهان، شامل استانهای اصفهان و چهارمحال و بختیاری می‌باشد و به دلیل اینکه بیش از ۸۶ درصد از ظرفیت تولید و حدود ۹۰ درصد از سهم انرژی تولید شده در منطقه در اختیار سه نیروگاه اصفهان، جنوب و منتظری است، این سه نیروگاه مورد بررسی قرار می‌گیرند. تمامی داده‌های تحقیق توسط شرکت برق منطقه‌ای استان اصفهان، دفتر فنی تولید و بازار برق تهیه شده است. بخشی از داده‌ها نیز از مرکز مدیریت شبکه برق ایران بدست آمده است.

۵-۲. برآورد توابع هزینه و انتشار

به منظور برآورد تابع هزینه‌ها از داده‌های مربوط به مصرف سوخت (در زمان استفاده از گاز طبیعی) و مقدار تولید متناظر استفاده شده است. در خصوص توابع انتشار نیز با توجه به داده‌های در دسترس از مقدار تولید و میزان انتشار هر آلاینده استفاده می‌شود. در این برآورد روش حداقل مربعات معمولی[1] (OLS) انتخاب شده و برای این منظور نرم افزار ایویوز ۷[2] به کار برده شده است. برای ارزیابی تصریح انجام شده در مدل برآوردی، از آزمون رمزی (RESET) استفاده شده است. همچنین جهت برآورد صحیح توابع هزینه، آزمون‌های مربوط به فروض کلاسیک انجام شده است (پیوست). بر اساس نتایج حاصل تمامی ضرایب معنی دار بوده و از آنجا که آماره دوربین واتسون آنها نزدیک به ۲ می‌باشد دارای خود همبستگی نیستند. آزمون وایت و ضریب لاگرانژ نیز نشان دهنده این است که واریانس ناهمسانی وجود ندارد. نتایج حاصل در جداول۱و۲و۳ ارائه شده است:

1. Ordinary Least Squares
2. Eviews 7

جدول۱. ضرایب توابع هزینه

	ضرایب متغیرها						
نیروگاه‌ها	Q_1^2	Q_2^2	Q_3^2	Q_1	Q_2	Q_3	مقدار ثابت
منتظری	۰/۱۴۰۰۱۸	–	–	۲۰۸۵/۶۴۹	–	–	۱۳۰۸۰۵۵۴/۴۹
اصفهان	–	۰/۶۸۱۵۷۶	–	–	۱۴۰۷/۸۴۱	–	۲۳۹۵۳۳۶۸/۳۵
جنوب	–	–	۰/۹۴۵۷۵۵	–	–	۱۸۳۰/۸۷۷	۱۶۰۴۵۳۹۳/۱۵
کل	۰/۱۴۰۰۱۸	۰/۶۸۱۵۷۶	۰/۹۴۵۷۵۵	۲۰۸۵/۶۴۹	۱۴۰۷/۸۴۱	۱۸۳۰/۸۷۷	۵۳۰۷۹۳۹۵/۱۸۴۲

منبع: یافته‌های تحقیق

جدول ۲. ضرایب توابع انتشار به تفکیک نیروگاه و آلاینده

نیروگاه‌ها و آلاینده	ناکس (NOX)		
ضرایب	γ	β	α
منتظری	۱۹۵/۷۸	۰/۴۹	۰/۰۰۰۱۴۵
اصفهان	-۵۳/۵۳	۱/۱۲۳	-۰/۰۰۰۳
جنوب	۲۰/۳۰۶	۰/۵۷۳	۰/۰۰۰۵
نیروگاه‌ها و آلاینده	دی اکسید کربن ($CO2$)		
ضرایب	γ	β	α
منتظری	۷۹۱۷۱/۴۵	۳۷۶/۲۱	۰/۰۹۳
اصفهان	-۶۶۴۱۶۵/۲	۲۴۴۲/۶۱۴	-۱/۳۷۶
جنوب	۳۶۶۷۰۴/۷	-۵۲۲/۷۴۴۷	۰/۹۲۸
نیروگاه‌ها و آلاینده	ذرات (SPM)		
ضرایب	γ	β	α
منتظری	۳۴/۰۲۲	۰/۰۱۴	۰/۰۰۰۰۱۹
اصفهان	۱۰/۲۲۴	۰/۰۱۷	۰/۰۰۰۰۵۵
جنوب	۲/۵۲۴	۰/۰۶۵	۰/۰۰۰۰۰۸۷

منبع: یافته‌های تحقیق

جدول۳. ضرایب تابع انتشار کل

	ضرایب متغیرها						
آلاینده‌ها	Q_1^2	Q_2^2	Q_3^2	Q_1	Q_2	Q_3	مقدار ثابت
NO_X	۰/۰۰۰۱۴۵	-۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۵	۴۹۰	۱/۱۲۳	۰/۵۷۳	۱۶۲/۵۵۶
CO_2	۰/۰۹۳	-۱/۳۷۶	۰/۹۲۸	۳۷۶/۲۱	۲۴۴۲/۶۱۴	-۵۲۲/۷۴۴۷	۲۱۸۲۸۹/۰۵
SPM	۰/۰۰۰۰۱۹	۰/۰۰۰۰۵۵	۰/۰۰۰۰۰۸۷	۰/۰۱۴	۰/۰۱۷	۰/۰۶۵	۴۶/۷۷
انتشار کل	۰/۰۹۳۱۶۴	-۱/۳۷۶۲۴۵	۰/۹۲۸۵۰۸۷	۳۷۶/۷۱۴	۲۴۴۳/۷۵۴	-۵۲۲/۱۰۶۷	۲۱۸۰۷۹/۷۲۴

منبع: یافته‌های تحقیق

۵-۳. محدودیت‌های مسئله

در مدل‌های توزیع اقتصادی و زیست محیطی، از محدودیت‌های مختلفی استفاده می‌شود که مشخص‌ترین و مهمترین محدودیت‌های مورد توجه در این مدل‌ها محدودیت تعادلی و فنی تولید محسوب می‌شود. بر این اساس محدودیت‌ها نیز در تحقیق حاضر مدل‌سازی شده‌اند.

۵-۳-۱. محدودیت تعادلی

برابری عرضه خالص و تقاضا مهمترین قید در مدل‌های توزیع اقتصادی و زیست محیطی محسوب می‌شود. به منظور تعیین عرضه خالص، تلفات خطوط انتقال با فرض توزیع یکنواخت در نظر گرفته می‌شود. تلفات خطوط انتقال نیروگاههای استان اصفهان ۷ درصد از کل تولید برق توسط این نیروگاهها می‌باشد. (وزارت نیرو - شرکت مدیریت شبکه برق ایران-معاونت راهبری-۱۳۹۱). مقدار عرضه و تقاضا نیز بر اساس توان قابل تولید و تقاضا در روزهای مشخص در نظر گرفته شده است. روزهای مورد نظر این تحقیق، روزهای حداقل و حداکثر تقاضا در چهار فصل سال است. این نکته مجددا یادآوری می‌شود که تغییر روزهای مورد اشاره کلیت و ساختار مدل را تغییر نخواهد داد و مبنای انتخاب روزهای مورد اشاره نیز این است که نوسان تقاضا به خوبی به تصویر کشیده خواهد شد. بنابراین می‌توان نتایج قابل اعتمادی استخراج نمود.

۵-۳-۲. محدودیت حداقل و حداکثر ظرفیت تولید

محدودیت فنی تولید به دلیل ایجاد شرایط واقعی اهمیت می‌یابد. بر این اساس نیروگاه‌ها با توجه به تکنولوژی و شرایط بازار برق ایران در یک محدوده مشخص قابلیت تولید دارند. در مدل‌سازی این تحقیق بر اساس اطلاعات دریافتی از شرکت برق منطقه‌ای اصفهان حداقل و حداکثر تولید مد نظر قرار گرفته است.

جدول٤. حداقل و حداکثر ظرفیت تولید

نیروگاه	حداقل ظرفیت تولید (MW/h)	حداکثر ظرفیت تولید (MW/h)
منتظری	۱۱۲۰	۱۵۹۰
اصفهان	۴۰۰	۸۳۰
جنوب	۰	۷۵۰

منبع: شرکت برق منطقه‌ای استان اصفهان، مدیریت تولید

لازم به ذکر است که مدل دارای سه متغیر شامل مقادیر تولید نیروگاه‌های موجود در شبکه برق مورد نظر می‌باشد. بر این اساس نتیجه‌ی اجرای مدل تعیین مقادیر تولید بهینه اقتصادی و زیست‌محیطی توام برای واحدهای موجود در شبکه خواهد بود. محدودیت‌های مدل شامل محدودیت تعادلی و محدودیت فنی (حداکثر و حداقل تولید) است؛ که هر دو محدودیت خطی هستند. تابع هدف مسئله نیز که یک تابع **۳** متغیره می‌باشد. که بر اساس ضرایب تابع هدف و روش بهینه‌سازی که استفاده از مدل اپسیلون محدودیت است، شرایط مورد نظر برقرار می‌باشد.

٥-٤. نتایج اجرای مدل

در این بخش مسئله توزیع اقتصادی و زیست محیطی بار، با توجه به برآوردهای بخش قبل، با استفاده از نرم افزار GAMS حل می‌شود. نتایج حاصل از این بهینه‌سازی‌ها و شرایط واقعی بازار در جدول۵ آورده شده است. این جدول شامل میزان تولید هر کدام از این سه نیروگاه برای تأمین تقاضای مورد نیاز، در حالت اقتصادی صرف و زیست محیطی صرف و همچنین میزان هزینه کل و انتشار کل در این حالت‌ها می‌باشد. افزون بر این، تمامی آنچه در واقعیت اتفاق افتاده، میزان تولید واقعی و هزینه و انتشار متحمل شده در شرایط واقعی نیز جهت انجام مقایسه بیان شده است.

جدول ۵. مقایسه نتایج واقعی بازار با بهینه اقتصادی و زیست محیطی بار

هزینه کل (ریال)	انتشار کل (کیلوگرم)	نیروگاه جنوب (Mwh)	نیروگاه اصفهان (Mwh)	نیروگاه منتظری (Mwh)	تقاضا (Mwh)	
۴۰۱۵۱۹۹۵۷,۳	۱۱۶۱۱۷۴/۱۹۵	۲۵۵	۳۹۲	۱۳۹۳	۲۰۴۰	تولید واقعی
۳۹۴۷۷۶۰۲۳/۷	۱۲۶۴۴۳۰/۴۱۲	۲۵۵	۶۶۵	۱۱۲۰	۲۰۴۰	بهینه اقتصادی
۴۰۳۸۸۰۹۷۷/۷	۱۰۵۷۵۸۰/۵۴۶	۵۲۰	۴۰۰	۱۱۲۰	۲۰۴۰	بهینه زیست محیطی
۳۳۲۲۳۵۹۸۲/۳	۱۱۰۰۵۶۸/۷۴۶	۵۴	۳۹۶	۱۲۱۰	۱۶۶۰	تولید واقعی
۳۲۹۱۰۸۰۲۳	۱۰۹۲۸۵۹/۱۱۲	۹۶	۴۴۴	۱۱۲۰	۱۶۶۰	بهینه اقتصادی
۳۲۹۳۵۷۵۲۰/۵	۱۰۲۳۱۱۱/۱۱	۱۴۰	۴۰۰	۱۱۲۰	۱۶۶۰	بهینه زیست محیطی
۳۷۴۷۱۱۹۶۹/۴	۱۱۷۶۸۹۴/۶۹	۱۲۲	۳۹۷	۱۳۷۱	۱۸۹۰	تولید واقعی
۳۶۷۷۶۲۸۲۱/۷	۱۲۰۶۳۷۸/۴۹۱	۱۹۳	۵۷۷	۱۱۲۰	۱۸۹۰	بهینه اقتصادی
۳۷۱۸۵۷۴۱۶	۱۰۱۱۹۴۰/۶۴	۳۷۰	۴۰۰	۱۱۲۰	۱۸۹۰	بهینه زیست محیطی
۳۶۸۷۱۴۲۲۳/۴	۱۲۰۱۳۶۵/۸۶۴	۷۳	۳۹۹	۱۳۷۹	۱۸۵۱	تولید واقعی
۳۶۰۹۷۲۵۹۲/۰۱	۱۱۸۹۹۴۱/۱۸۸	۱۷۶	۵۵۵	۱۱۲۰	۱۸۵۱	بهینه اقتصادی
۳۶۴۰۸۸۱۵۴/۶	۱۰۰۶۹۱۸/۳۰۲	۳۳۱	۴۰۰	۱۱۲۰	۱۸۵۱	بهینه زیست محیطی
۳۲۲۳۳۸۰۸۰,۸	۱۱۲۱۳۹۴,۹۷۶	۰	۷۳۹	۱۲۰۰	۱۵۹۷	تولید واقعی
۳۱۹۱۰۴۰۵۹,۲	۱۰۵۵۳۴۱,۳۷۱	۷۰	۴۰۷	۱۱۲۰	۱۵۹۷	بهینه اقتصادی
۳۱۹۱۱۰۷۸۶,۱	۱۰۴۳۳۱۰,۱۹	۷۷	۴۰۰	۱۱۲۰	۱۵۹۷	بهینه زیست محیطی
۴۴۹۷۳۶۴۲۹/۶	۱۱۷۳۸۷۸/۳۴	۶۹۶	۳۹۷	۱۱۴۳	۲۲۳۶	تولید واقعی
۴۳۲۰۳۷۳۵۶/۷	۱۳۴۱۶۷۷/۹۲۶	۳۱۰	۷۴۱	۱۱۸۵	۲۲۳۶	بهینه اقتصادی
۴۴۵۰۴۹۴۲۲/۱	۱۱۶۸۱۱۲/۱۵۲	۶۰۷	۴۰۰	۱۲۲۹	۲۲۳۶	بهینه زیست محیطی
۴۸۵۶۲۸۶۴۴/۱	۱۳۷۷۳۷۲/۸۰۹	۷۲۱	۵۳۹	۱۱۷۶	۲۴۳۶	تولید واقعی
۴۷۰۷۹۴۵۶۲/۹	۱۴۴۴۰۳۹/۵۲۷	۳۳۲	۷۷۱	۱۳۳۲	۲۴۳۶	بهینه اقتصادی
۴۸۵۰۶۲۶۹۳/۳	۱۲۹۲۶۳۰/۰۲۵	۶۲۵	۴۰۰	۱۴۱۰	۲۴۳۶	بهینه زیست محیطی
۴۵۶۴۱۲۰۲۶/۸	۱۱۷۶۴۳۸/۹۳۴	۷۰۸	۳۷۷	۱۱۷۸	۲۲۶۳	تولید واقعی
۴۳۷۲۵۷۴۹۲	۱۳۵۵۴۲۹/۱۲۴	۳۱۳	۷۴۵	۱۲۰۵	۲۲۶۳	بهینه اقتصادی
۴۶۰۴۰۵۰۰۰	۱۱۵۴۵۲۶/۵۷۸	۶۱۰	۴۰۰	۱۲۵۳	۲۲۶۳	بهینه زیست محیطی

منبع: یافته‌های تحقیق

پیش از تجدید ساختار، مسئولیت انتخاب نیروگاههایی که باید در مدار قرار گیرند بر عهده برنامه‌ریز مرکزی بوده است. در این روند به دلیل انتخاب نیروگاههایی که هزینه نهایی پایین‌تری دارند، تخصیص بهینه انجام شده و کارایی تضمین می‌شد. اما پس از تجدید ساختار و تشکیل بازار برق، اینکه کارایی تضمین می‌شود یا خیر، سوالی است که همواره مطرح بوده است. در بازار دیگر هزینه نهایی پایین‌تر دلیل وارد شدن در مدار نیست، بلکه پیشنهاداتی که نیروگاه‌ها برای

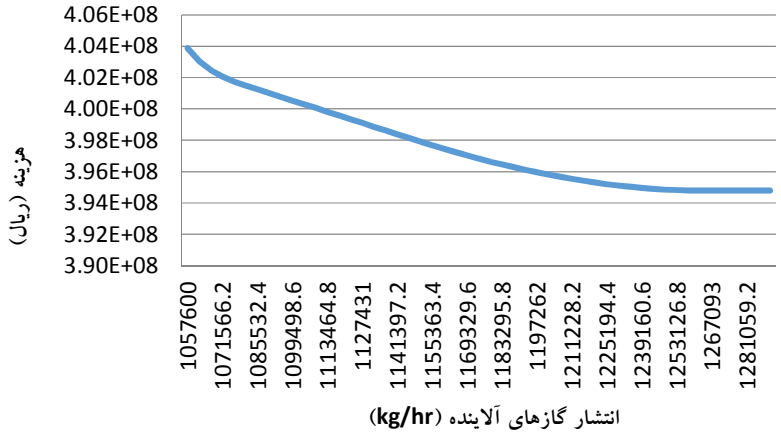
قیمت و مقدار تولید خود ارائه می‌دهند، تعیین‌کننده انتخاب آنها می‌باشد. جهت بررسی کارایی، در این مقاله توزیع اقتصادی و توزیع زیست محیطی انجام شد و نتایج حاصل در جدول ۵ ارائه شده است. این نتایج حاکی از آن است که مقادیر تولید واقعی و درنتیجه لیست نیروگاه‌هایی که باید در مدار قرار گیرند، در شرایط فعلی بازار با شرایط ایده‌آل اقتصادی و زیست محیطی تفاوت دارد.

۵-۵. توزیع اقتصادی- زیست محیطی بار

در این بخش مدل ارائه شده در بخش ۴.۳ با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ε – محدودیت ، اجرا شده و مجموعه جواب پارتو بدست می‌آید. مدل در سطوح مختلف تقاضا قابل اجرا خواهد بود لیکن همان‌گونه که پیش از این نیز اشاره شد تلاش می‌گردد نتایج بر اساس مقادیر مختلف تقاضا که بتواند طیف مقادیر ممکن را پوشش دهد اجرا می‌شود. در نمودار ۱ منحنی بی‌تفاوتی[1] (مجموعه جواب پارتو) حاصل از ۵۰ تکرار ε، برای مقدار تقاضای ۲۰۴۰ مگاوات ساعت ارائه شده است. همانگونه که قبلا نیز اشاره شد، مهمترین مزیت این روش امکان دستیابی به مجموعه جواب بهینه پارتو و ایجاد انعطاف لازم می‌باشد. بدیهی است از نقطه‌نظر سرعت اجرای مدل، الگوریتم‌های ابتکاری می‌توانند مزیت‌های بیشتری را فراهم کند، لیکن استخراج نتایجی که بتواند در سیاست‌گذاری و تحلیل شرایط کمک کند، در این مدل فراهم است.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

۱. در اینجا با تغییر هزینه و انتشار آلاینده‌ها، میزان تولید ثابت می‌ماند.



نمودار ۱. منحنی بی‌تفاوتی حداقل‌سازی همزمان هزینه و آلاینده‌های زیست محیطی

٦. جمع بندی و نتیجه‌گیری

مقایسه مقادیر تولید واقعی با مقدار تولید حاصل از بهینه اقتصادی اختلاف کمی بین واقعیت‌های رفتاری بازار با شرایط بهینه را نشان می‌دهد. بر این اساس متوسط اختلاف بین هزینه تولید برق در شرایط واقعی با هزینه تولید در شرایط بهینه کمتر از ۵ درصد است. این در حالی‌است که شرایط برای وضعیت زیست محیطی بسیار متفاوت بوده و اختلاف بین مقدار بهینه با مقدار عملکرد واقعی تا بیش از ۲۰ درصد هم قابل مشاهده است. با توجه به میزان تقاضا و سقف و کف تولید در بازار مورد بررسی این اختلاف نیز بسیار زیاد است. به عبارت دیگر با تعمیم شرایط بازار محلی به بازار کشور می‌توان انتظار داشت که انحراف از مقادیر بهینه در ابعاد بیشتر نیز قابل مشاهده باشد. از منظر اقتصادی پیش‌بینی این عملکرد دور از انتظار نیست؛ زیرا مادامی که در بازار برق کشور هزینه‌های زیست محیطی و محدودیت‌های ناشی از آن در مجموعه معادلات تصمیم‌گیری قرار نگیرد، امکان کنترل هزینه‌های زیست محیطی وجود نخواهد داشت. نکته قابل توجه در این است که تفاوت بین بهینه زیست محیطی با عملکرد واقعی نشان می‌دهد که مبحث کنترل آلاینده‌های زیست محیطی به هیچ عنوان در مجموعه گزینه‌های پیش‌روی بازار قرار نداشته است و بازار تمام

همت خود را بر کنترل اقتصادی و هزینه‌های تولیدی گمارده است. بدیهی است همان گونه که بازار هزینه‌های اقتصادی را کنترل می‌کند، در صورتی که بخش زیست محیطی نیز مد نظر قرار گیرد، بازیگران می‌توانند به اهداف مورد نظر در بخش زیست محیطی نیز دست یابند.

لذا مهمترین نتایج تحقیق به شرح ذیل قابل اشاره خواهد بود:

- وضعیت تولید واقعی با تولید بهینه اقتصادی و زیست محیطی متفاوت است.
- با توجه به اینکه در قوانین بازار برق ایران هزینه‌های زیست محیطی از تولیدکننده دریافت نمی‌شود، مشخص است که تولیدکنندگان بیش از آنکه مبانی زیست محیطی را مد نظر قرار دهند، بر کاهش هزینه تاکید دارند.
- عدم توجه به شاخص‌های زیست محیطی، عملا در بلند مدت مسیر سرمایه‌گذاری در صنعت برق را تغییر داده و به نوعی دخالت در قیمت‌های بازار به منظور ارسال سیگنال‌های تصمیم‌گیری در فضای اقتصادی است.
- نحوه در مدار قرار گرفتن نیروگاه‌ها با توجه به محدودیت‌های زیست محیطی و بدون لحاظ آنها متفاوت خواهد بود.
- مدل معرفی شده در این تحقیق امکان ارائه راهکارهای مناسب و توسعه اطلاعات کاربردی را فراهم می‌کند.
- روش مورد استفاده امکان استخراج منحنی‌های مبادله و بی‌تفاوتی را بوجود می‌آورد. این منحنی‌ها می‌تواند اطلاعات مناسبی را برای تصمیم‌گیران و مدیران تولید کند.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

منابع و مآخذ

- اخباری، م. (۱۳۷۳). مدل فازی توزیع بهینه بار در سیستم قدرت. *پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق*. دانشگاه صنعتی شریف.
- امینی، ا.، فلقی، ح.، رمضانی، م. (۱۳۹۱). توزیع بار بین نیروگاهها به منظور کاهش هم زمان هزینهٔ سوخت و آلاینده های زیست محیطی. *مهندسی و مدیریت انرژی*، ۳ (۱)،۲-۱۵.
- بی‌جامی، ا.، ابراهیمی، ا.، عسکری، ج. (۱۳۹۰). حل مسئله توزیع اقتصادی بار نا محدب با استفاده از الگوریتم ترکیبی جدید جهش قورباغه. *سیستم های هوشمند در مهندسی برق*،۲ (۳).
- ثقفی اصفهانی، م. (۱۳۷۱). *پخش بار اقتصادی نیروگاهها*. پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق (قدرت)، دانشگاه تربیت مدرس.
- جمشیدپور، ا. (۱۳۸۰). حل مسئله در مدار قرار گرفتن واحدهای حرارتی با استفاده از الگوریتم فازی تکاملی. *پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق (قدرت)*، دانشگاه صنعتی شریف.
- حمیدی، م. (۱۳۷۱). *اجرای برنامه توزیع اقتصادی بار با در نظر گرفتن آلودگی هوا به روش فازی*. پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق (قدرت)، دانشگاه تربیت مدرس.
- خاجیان، م. (۱۳۸۴). *پخش بار بهینه به روش پخش بار مبتنی بر تبادلات با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی*. پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق (قدرت)، دانشگاه صنعتی شریف.
- رفیعی، م. شایانفر، ح. (۱۳۸۳). پخش بار بهینه با رعایت قیود امنیت سیستم قدرت با استفاده از برنامه ریزی درجه دوم و روش سیمپلکس. *نهمین کنفرانس شبکه‌های توزیع نیروی برق*، دانشگاه زنجان.
- زنگنه، ع. (۱۳۹۰). *بهینه‌سازی چندهدفه و کاربرد آن در برنامه‌ریزی منابع تولید پراکنده*. تهران: دانشکده مهندسی برق دانشگاه تهران.
- سوری، ع. (۱۳۹۱). *اقتصادسنجی همراه با کاربرد Eviews7*. تهران: فرهنگ شناسی، ویراست چهارم.
- ترازنامه انرژی ایران (۱۳۹۱). *تراز نامه انرژی سال ۱۳۹۰*. دفتر برنامه ریزی کلان برق و انرژی.

- شرکت مادر تخصصی توانیر. (۱۳۹۱). *آمار تفصیلی صنعت برق ایران، تولید نیروی برق در سال ۹۱*. شرکت مادر تخصصی توانیر - دفتر فن آوری آمار و اطلاعات.
- شرکت ملی شبکه برق ایران. (۱۳۹۱). *سیستم دیسپاچینگ ملی معاونت راهبردی شبکه برق ایران- گزارشات مرکز کنترل*.
- عبداللهی، ا. (۱۳۸۸). *برنامه ریزی بهینه تولید نیروگاهها با در نظر گیری قیود امنیتی با استفاده از روش های ترکیبی و کلاسیک*. پایان نامه کارشناسی ارشد برق (قدرت). دانشگاه صنعتی شریف.
- فلقی، ح.، امینی، ا.، نجفی، ا. (۱۳۹۰). توزیع بهینهٔ اقتصادی بار با در نظر گرفتن محدودیتهای عملی نیروگاهها با استفاده از الگوریتم جهش قورباغهٔ بهبودیافته. *مدیریت انرژی*، ۱ (۱)، ۳۸-۴۸.
- قاسمی مرزبالی، ع.، سیدشنوا، ج.، بازیار، ر.، عابدی نیا، ا.، یوسفی، ع.، غلام علی تبار، ح. (۱۳۹۱). پخش بار اقتصادی مبتنی بر روش بهبود یافته ABC با اعمال محدودیت های غیر خطی. *کیفیت و بهره وری در صنعت برق ایران*، ۱ (۱).
- قاضیزاده، ص.، آریایی، ج.، جاویدی، ح. (۱۳۸۵). بازار برق ایران؛ تاریخچه، دلایل و ویژگیهای آن. *هیات تنظیم بازار برق ایران*.
- لئون، ک. (۱۳۷۰). *بهینه سازی و برنامه ریزی غیر خطی کاربردی*. ترجمه اسلام ناظمی، موسسه انتشارات بهینه.
- نیکلسون، و. (۲۰۰۲). *نظریه اقتصاد خرد (اصول اساسی و مباحث تکمیلی)*. ترجمه محمّد مهدی عسگری، تهران: دانشگاه امام صادق(ع)، جلد یکم.
- ولنبرگ، اف. (۱۳۷۱). *تولید، بهره برداری و کنترل در سیستم های قدرت*. ترجمه حسین سیفی، تهران: انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، چاپ اول.
- هوشمند، ر. پرستگاری، م. (۱۳۸۷). کاربرد الگوریتم PSO در پخش بار اقتصادی و پخش آلودگی برای توابع هزینه ناصاف باوجود تلفات خطوط انتقال و محدودیت‌های عملی سیستم. *مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران*. ۶ (۳).
- Abedinia, O., Amjady, N., Kiani, K., Shayanfar, H.A., & Ghasemi, A. (June 2012). Multiobjective environmental and economic dispatch using imperialist competitive algorithm. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE)*, 4(11), 63-70.

- Alfredo, S. (2009*). Evolutionary multi objective Environment Economic Dispatch: Stochastic vs deterministic Approaches.* Master thesis, Italy: university of del salento.
- Chen Po-Hung, & Chang Hong-Chan. (November 1995). Large-scale economic dispatch by genetic algorithm. *IEEE Transactions on Power System*, 10(4).
- Cheung, Chank H. (1990). *A unified approach to unit commitment and economic dispatch in power system control.* Durham thesis, Durham University.
- Dartey Manteaw, E., & Abungu Odero, N. (December 2012). Combined Economic and Emission Dispatch Solution Using ABC-PSO Hybrid Algorithm with Valve Point Loading Effect. *International Journal of Scientific and Research Publications,* 2(12), 2250-3153.
- Eberhart, R. C., & Kennedy J. (1995). A new optimizer using particle swarm theory. *Proceedings of the 6th. International Symposium on Micro Machine and Human Science*, Nagoya, Japan, 39-43.
- Ehrgott, M. (2005), *Multicriteria optimization*, Berlin: Springer.
- Gerald, F., & Lawrence, H. (1973). Economic dispatch using quadratic programming. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-92, 2015-2023.
- Hosam Youssef, K., & Khaled El-Naggar, M. (2000). Genetic based algorithm for security constrained power system economic dispatch. *Electric Power Systems Research*, 53(1), 47-51.
- Jacob Raglend, I., Veeravalli, S., Sailaja, K., Sudheera, B., & Kothari, D.P. (2010). Comparison of All techniques to solve combined economic emission dispatch problem with line flow constraints. *Electrical Power and Energy Systems*, 32(6), 592-598.
- Kalyanmoy Deb, (2001). *Multi- objective optimization using evolutionary algorithms*. Kanpur, India:Wiley- Blackwell.
- Kaur, A. (2011). *Analysis and comparison economic load dispatch using genetic algorithm and particle swarm optimization*. master thesis, Patiala: Thapar University.
- Kirschen, D. S., Strbac, G., & Knovel. (2004). *Fundamentals of power system economics*. Wiley Online Library.
- Krishnan, G. (July 2011). Study on Techniques for Combined Economic and Emission Dispatch. *Global Journal of researches in engineerng*, 11(5), 21-28.
- Kumar, A.I.S., Dhanushkodi, K., Kumar, J.J., & Paul, C.K.C. (2003). Particle Swarm Optimization Solution to Emission and Economic Dispatch Problem. *TENCON 2003. Conference on Convergent Technologies for the Asia-Pacific Region*, 1, 435 – 439.
- Mansur, E. T. (2008). Measuring welfare in restructured electricity markets. *The Review of Economics and Statistics*, 90(2), 369-386.
- Mas-Colell, A., Whinston, M. D., & d Green, J. R. (1995). *Microeconomic theory*, Oxford, Oxford University Press.
- Megahed, I., Abou-Taleb, N., & Iskandrani, M. (January1977). A modified method for solving the economic dispatching problem. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 96(1), 124-133.

- Mishra, P. M. (2012). *Solution to economic load dispatch using PSO*. Bachelor thesis, national institute of technology Rourkela.
- Orero, S. O., & Irving, M. R. (November 1996). Economic dispatch of generators with prohibited operating zones: a genetic algorithm approach. *IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib.* , 143(6).
- Palanichamy, C., & Sundar Babu, N. (2008). Analytical solution for combined economic and emissions dispatch. *Electric Power Systems Research*, 78(7), 1129-1137.
- Sarangi, S. (2009). *Particle optimization applied to economic load Dispatch problem*. Master thesis, national institute of technology Rourkela.
- Singla, D., & Sanjay, K. (June 2013). A Review on Combined Economic and Emission Dispatch using Evolutionary Methods. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 2(6), 2320-3765.
- Stoft, S. (2002). Power system economics: designing markets for electricity (Vol. 2): *IEEE press Piscataway*, NJ.
- Venkatesh, P., Gnanadass, R., & Prasad, P. N. (May 2003). Comparison and application of evolutionary programming techniques to combined economic emission dispatch with line flow constraints. *IEEE Transaction on power systems,* 18(2).
- Wang Xian, Li Yu- Zeng and Zhang Sho- Wa, (November 2002). A new neural network approach to economic emission load dispatch. *Proceedings of the First International Conference on Machine Leaning and Cybernetics*, Beijing, 4-5.
- Wolfram, C. D. (1999). Measuring duopoly power in the British electricity spot market. *American Economic Review*, 89(4), 805-826.
- Yokoyama R., Bae S.H., Morita T. and Sasaki H. (1988). Multiobjective optimal generation dispatch based on probability security criteria. *IEEE Transactions on Power Systems*, 3(1), 317-324.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

پیوست

نتایج آزمون مانایی متغیرهای مربوط به برآورد تابع هزینه و تابع انتشار

متغیرها	بدون روند و عرض از مبدا				روند و عرض از مبدا	
	در سطح		مرتبه اول		در سطح	
	ADF[1]	PP	ADF	PP	ADF	PP
F_1	-۰/۰۸	-۰/۸۶	-۱۰/۳۱	-۴۱/۴	-۶/۹۲	-۶/۸۷
F_2	-۰/۴	-۰/۸	-۹/۹	-۶۲	-۴/۳	-۸/۲
F_3	-۰/۶	-۰/۶	-۱۳/۱	-۱۳	-۳/۶	-۳/۵۸
Q_1	-۱/۰۱	-۱/۰۲	-۱۰/۱	-۴۲/۵	-۶/۹۵	-۶/۹۳
Q_2	-۰/۳	-۰/۷	-۱۰/۲	-۴۵	-۴/۱	-۸/۱
Q_3	-۰/۷۷	-۰/۶	-۱۱/۶۹	-۱۱/۸	-۳/۵۸	-۳/۵۲

منبع: یافته‌های تحقیق

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

۱ . مقدار بحرانی در سطح ۱ درصد ۲,۵- می باشد.