پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران
سال هفتم، شماره ۲۷، تابستان ۱۳۹۷، صفحات ۱۵۷-۱۳۵

برآورد تابع بهای تمام‌شده تولید انرژی در واحدهای گازی نیروگاه سیکل ترکیبی اردبیل با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی

امید معتمدی سده[۱]
بختیار استادی[۲]
علی حسین‌زاده کاشان[۳]
محمدرضا امین ناصری[۴]

تاریخ پذیرش:۱۳۹۷/۰۶/۲۰ تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۱۸

چکیده

با مقررات زدایی از بازار و شکل‌گیری بازار روز بعد انرژی، باهدف کاهش هزینه‌های تولید و توزیع برق و رفع ناکارآمدی‌های صنعت برق انحصاری، تحدید ساختار در بازار برق ایران انجام گرفت که در آن در هرروز تولیدکنندگان انرژی با یکدیگر به رقابت می‌پردازند. دراین‌بین بهای تمام‌شده تولید انرژی پارامتر تعیین‌کننده در تعیین استراتژی پیشنهاد قیمت توسط هر نیروگاه و میزان سود بخشی آن می‌باشد. ازاین‌رو در این مقاله با در نظر گرفتن هزینه‌های سوخت مصرفی، استهلاک، تعمیرات، بهره‌برداری و سایر هزینه‌ها به‌عنوان عوامل تأثیرگذار بر روی بهای تمام‌شده تولید برق، تابع هزینه تولید برآورد شده است. در این مطالعه، نظر به سهم قابل‌توجه سوخت بر روی بهای تمام‌شده، سوخت مصرفی را به‌صورت جدا از سایر موارد موردبررسی قرار داده‌ایم و به‌جای سرشکن کردن هزینه سوخت در طول یک سال بر روی کل تولید، ابتدا تابع مصرف سوخت در سطوح مختلف تولید در دو حالت سوخت گاز و گازوئیل محاسبه شده و به دنبال آن هزینه سوخت مصرفی محاسبه گردیده است. مطابق با نتایج به‌دست‌آمده، از اجرای مدل پیشنهادی بر روی واحد گازی نیروگاه سیکل ترکیبی اردبیل، متوسط هزینه تولید هر کیلووات ساعت برق با سوخت گاز برابر با ۳۹۸ ریال و با سوخت گازوئیل برابر با ۵۰۰ ریال می‌باشد.

طبقه‌بندی JEL: C61, C63, D24

کلیدواژه‌ها: بهای تمام‌شده انرژی، الگوریتم‌های فرا ابتکاری، هوش مصنوعی، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم ازدحام ذرات

---

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس
omid.motamedi@modares.ac.ir
۲. استادیار دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس (نویسنده مسئول)
bostadi@modares.ac.ir
۳. استادیار دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس
a.kashan@modares.ac.ir
۴. استاد دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس
amin_nas@modares.ac.ir

۱. مقدمه

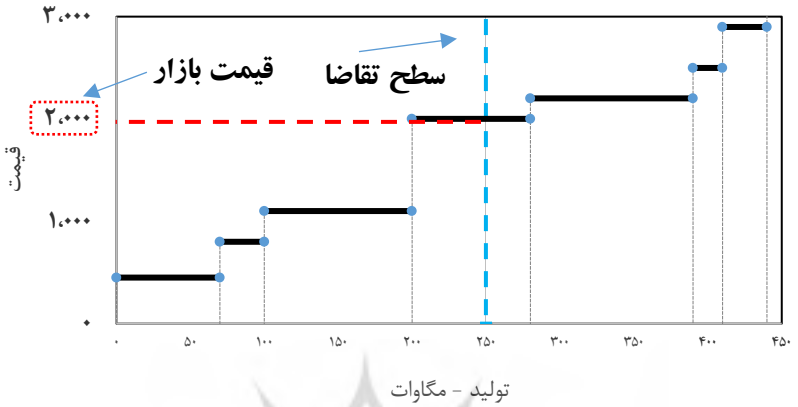
برق به‌عنوان صنعت زیربنایی در فرایند توسعه اقتصادی کشور و ایجاد زیرساخت‌های توسعه، نقشی ارزنده و اساسی دارد که بستر لازم را برای پویایی و رشد در زمینه‌های گوناگون اقتصادی، صنعتی، فرهنگی و اجتماعی فراهم می‌سازد. آبدینیا و همکاران (۲۰۱۵) [1]

درگذشته، لزوم سرمایه‌گذاری‌های کلان درزمینه تولید، انتقال و توزیع برق، وجود انحصار دولتی برای این صنعت را توجیه می‌نمود، به‌گونه‌ای که تا سال ۱۳۸۲ صنعت برق با ساختاری یکپارچه که وظیفه تولید، توزیع، انتقال و خدمات مشترکین را بر عهده داشته است به کار خود ادامه می‌دهد ولی در سال ۱۳۸۲ به‌منظور اجرای اصل ۴۴ در حوزه صنعت برق، باهدف رفع ناکارآمدی‌های صنعت برق انحصاری، کاهش تصدی‌گری دولتی و شفافیت هزینه‌ها تعدادی از نیروگاه‌های دولتی به بخش خصوصی واگذار گردید (۴۴ درصد از ظرفیت اسمی) و به‌منظور ایجاد فضای مناسب به‌منظور رقابت نیروگاه‌ها با یکدیگر، بازار برق تحت عنوان بازار روز بعد [2] شکل گرفته شد که در آن شرکت‌های تولید انرژی الکتریکی با یکدیگر بر سر فروش انرژی باقیمت پیشنهادی به رقابت می‌پردازند. (یوسفی . همکاران (۲۰۱۷) [3])

در این بازار، در هرروز میزان تقاضای ساعتی برای روز بعد توسط مدیریت شبکه اعلام می‌گردد. به دنبال آن، تمامی تولیدکنندگان انرژی، توان تولیدی خود در روز بعد را به همراه قیمت پیشنهادی خود در محدوده مجاز (حداکثر در ۱۰ پله)، تا ساعت ۱۰ صبح در سامانه مدیریت شبکه ثبت می‌نمایند. سپس طی محاسبات انجام‌شده در سامانه مدیریت شبکه، نتایج پیشنهاد قیمت (تولیدکنندگان برنده) در ساعت ۱۹ همان روز اعلام خواهد شد. مبنای محاسبات مدیریت شبکه تأمین تقاضای روز بعد با حداقل هزینه است که به این

1 .Abedina et al. (2015)
2 .Day Ahead Market
3 .Yousefi et al (2017)

منظور ابتدا تمامی پله‌های پیشنهادی[1] تولیدکنندگان از کوچک به بزرگ مرتب‌شده و تقاضای موردنیاز مطابق با شکل (۲)، از محل پایین‌ترین قیمت‌ها برآورده می‌شود. یوسفی و همکاران (۲۰۱۷)



شکل (۱): تعیین قیمت تسویه بازار در بازار روز فروش انرژی ایران

منبع: یوسفی و همکاران (۲۰۱۷)

با شکل‌گیری بازار روز بعد، وظیفه دولت از حوزه اجرا به حوزه قانون‌گذاری، نظارت و برنامه‌ریزی تغییر یافت به‌گونه‌ای که محدوده مجاز پیشنهاد قیمت توسط نهاد تنظیم‌کننده بازار به‌عنوان ابزار کنترلی قیمت تعیین می‌شود و قیمت تسویه بازار بر اساس رقابت میان تولیدکنندگان در هرروز تعیین می‌شود. (یوسفی و همکاران (۲۰۱۷)[2])

لذا به‌منظور تعیین بهینه محدوده مجاز پیشنهاد قیمت از سوی نهاد قانون‌گذار و برنامه‌ریزی مناسب جهت توسعه تولید انرژی با فنّاوری مناسب، محاسبه دقیق بهای تمام‌شده تولید انرژی با فنّاوری‌های مختلف اهمیت میابد. ازاین‌رو وجود یک روش و الگوی جامع که بتواند قیمت واقعی تولید انرژی را همراه با جزئیات آن محاسبه و تحلیل نماید، از مهم‌ترین ابزارهای تحلیلی در اقتصاد انرژی است.

نظر به اهمیت پارامتر بهای تمام‌شده تولید انرژی و سهم واحدهای گازی از ظرفیت تولید کل کشور، هدف اصلی این تحقیق تعیین تابع بهای تمام‌شده تولید انرژی در یک واحد

1 .Biding Steps
2 .Yousefi et al. (2017)

گازی از نیروگاه سیکل ترکیبی اردبیل[۱]، با ظرفیت اسمی ۹۶۰ مگاوات به ازای سطوح مختلف تولید می‌باشد. پرسش‌های اصلی در این مطالعه عبارت‌اند از:

اول: پارامترهای تأثیرگذار بر روی بهای تمام‌شده انرژی کدام‌اند؟

دوم: سهم هر یک از پارامترهای هزینه بر روی بهای تمام شده به چه میزان است؟

سوم: تابع هزینه تولید انرژی در نیروگاه مورد بررسی به چه صورت می‌باشد؟

در ادامه مقاله بعد از بیان ادبیات موضوع و مطالعات صورت گرفته در این حوزه در بخش دوم، مدل پیشنهادی به همراه توضیحات مقدماتی روش‌های شبیه‌سازی تبرید، الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات به‌عنوان روش‌های برآورد پارامترهای مدل پیشنهادی در بخش سوم توضیح داده‌شده است. سپس در بخش چهارم به معرفی موردمطالعه و پیاده‌سازی مدل پیشنهادی بر روی آن پرداخته‌شده است و درنهایت جمع‌بندی نتایج در بخش پایانی ارائه‌شده است.

۲. ادبیات موضوع

نظر به نقش محوری بهای تمام‌شده در قیمت‌گذاری کالا و خدمات و به دنبال آن، محاسبه سود ناشی از فعالیت اقتصادی، مطالعات متعددی در راستای محاسبه بهای تمام‌شده در صنایع مختلف صورت گرفته است که صنعت برق نیز از این موضوع مستثنی نمی‌باشد.

در صنعت برق با قانون زدایی از بازار و توجه بخش خصوصی به سرمایه‌گذاری در این حوزه، محاسبه بهای تمام‌شده تولید انرژی بیش‌ازپیش موردتوجه قرارگرفته است و مطالعات متعددی در خصوص محاسبه بهای تمام شده تولید انرژی انجام‌شده است.

قدیمی‌ترین مطالعه بهای تمام‌شده انرژی انجام‌شده در داخل کشور مربوط به سال ۱۳۷۹ تحت عنوان "قیمت تمام‌شده یک کیلووات ساعت انرژی در نیروگاه فارس و کازرون" می‌باشد که در آن هزینه تولید یک واحد انرژی با استفاده از یک تابع خطی بر اساس میزان مصرف سوخت به تفکیک دو حالت سوخت گاز و گازوئیل برآورد شده است که مطابق با نتایج به‌دست‌آمده، تابع هزینه تولید (برحسب ریال) X کیلووات ساعت

۱. نیروگاه اردبیل به صورت سیکل ترکیبی می باشد که در حال حاضر فقط بخش گاز آن راه اندازی شده است.

انرژی برای واحد گازی با سوخت گاز به‌صورت X ۸٫۸ + ۵٫۷ و با سوخت گازوئیل به‌صورت X ۱۷٫۶ + ۵٫۷ می‌باشد(لاجوردی و محدث (۱۳۸۷)).

به دنبال آن در سال ۱۳۸۶ سازمان بهره‌وری انرژی ایران (سابا) با استفاده از روش هم‌ترازی هزینه‌ها و با در نظر گرفتن پارامترهای هزینه‌های سرمایه‌گذاری، هزینه‌های تعمیر و نگهداری و سوخت مصرفی، متوسط هزینه تولید هر کیلووات ساعت انرژی با استفاده از نیروگاه‌های CHP با ظرفیت بالای یک مگاوات را برآورد نموده است که مطابق با نتایج این مطالعه، متوسط بهای تمام‌شده برق برای توربین گاز با بویلر بازیافت ۳۲۶ ریال بر کیلووات ساعت و برای ژنراتور گازسوز ۳۵۶ ریال بر کیلووات ساعت محاسبه‌شده است. (سازمان بهره‌وری انرژی ایران (۱۳۸۶))

در پژوهش اکرامی و صادقی (۱۳۸۷)، به برآورد هزینه تولید برق در نیروگاه‌های فسیلی کشور در سناریوهای متفاوت پرداخته‌اند که مطابق با نتایج به‌دست‌آمده از مدل آن‌ها هزینه تمام‌شده تولید یک کیلووات ساعت انرژی الکتریکی در نیروگاه‌های بخار، گاز و سیکل ترکیبی با در نظر گرفتن شرایط جاری، به ترتیب برابر با ۴۲٫۶، ۳۸٫۲ و ۵۳٫۱ ریال بر کیلووات ساعت می‌باشد. این در حالی است که در سناریو دیگری با احتساب هزینه‌های مربوط به آلایندگی محیط‌زیست و در نظر گرفتن قیمت جهانی سوخت، بهای تمام‌شده هر کیلووات ساعت انرژی در نیروگاه‌های بخار، گاز و سیکل ترکیبی، به ترتیب برابر با ۲۴۳٫۵ ، ۲۸۱ و ۱۶۴ریال بر کیلووات ساعت برآورد شده است. اکارمی و صادقی (۱۳۸۷)

نصیرزاده و بیهودی زاده (۱۳۸۸) با به‌کارگیری روش‌های حسابداری، به بررسی و محاسبه بهای تمام‌شده تولید برق در واحدهای گازی و سیکل ترکیبی نیروگاه شریعتی مشهد پرداختند. در این مطالعه، هزینه‌های شناسایی تولید به شش گروه، شامل هزینه‌های سوخت، استهلاک تأسیسات تولید، تعمیرات، واحد پشتیبانی فنی، بهره‌برداری و متفرقه تقسیم شده است و هزینه‌های انجام‌شده در سال‌های ۸۲ تا ۸۴ به تفکیک گروه هزینه برای واحد گازی و بلوک سیکل ترکیبی ارائه‌شده است.

شجاعی و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از آمار موجود در خصوص هزینه‌های مرتبط با نیروگاه سیکل ترکیبی و بخاری شهید رجایی، هزینه یک کیلووات ساعت برق تولیدی در این نیروگاه را محاسبه نموده‌اند. در این خصوص هزینه‌های مرتبط با تولید برق نیروگاه شهید رجایی قزوین در بخش‌های ساخت، سوخت، و تعمیر و نگهداری ارائه گردیده است. که مطابق با نتایج ارائه‌شده هزینه تولید هر کیلووات ساعت انرژی با استفاده از فنّاوری سیکل ترکیبی برابر با ۳۱۴,۷۶ ریال و با استفاده از فنّاوری گاز ۳۳۶,۲۵ ریال می باشد.

مطهری و همکاران (۱۳۹۳) با به‌کارگیری روش هم‌ترازی هزینه‌ها، بهای تمام‌شده تولید برق در نیروگاه‌های متفاوت را در سناریوهای متعدد هزینه سوخت با یکدیگر مقایسه نمودند که مطابق با نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق با در نظر گرفتنِ هزینه ۷۰۰ ریالی برای سوخت گاز (هر مترمکعب) و هزینه ۳۵۰۰ ریالی برای سوخت گازوئیل (به ازای هر لیتر) بهای تولید با سوخت گاز و گازوئیل به ترتیب برابر با ۱۹۵۶ و ۴۴۱۱ ریال بر کیلووات ساعت برآورد شده است.

از سوی دیگر مطابق با گزارش ارائه‌شده توسط معاونت برنامه‌ریزی و امور اقتصادی وزارت نیرو بهای تمام‌شده تولید و انتقال انرژی در سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۳ به ترتیب برابر با ۴۱۳، ۵۱۶، ۶۸۰ و ۸۵۶ ریال بر کیلووات ساعت می‌باشد که با احتساب قانون هدفمندی یارانه‌ها پیش‌بینی‌شده است این رقم در سال ۱۳۹۶ برابر با ۱۴۷۹ ریال بر کیلووات ساعت برسد.

اسدی و همکاران (۱۳۹۵)، با استفاده از مدل هم‌ترازی هزینه‌ها و در نظر گرفتن چهار سناریو مختلف (سوخت به قیمت فعلی و قیمت صادراتی و احتساب و عدم احتساب پارامترهای زیست‌محیطی در هر حالت) به بررسی قیمت تمام‌شده تولید انرژی در نیروگاه‌های مختلف پرداخته‌اند که مطابق با نتایج به‌دست‌آمده از مطالعه آن‌ها، بهای تمام‌شده تولید انرژی با استفاده از نیروگاه گازی در شرایط فعلی برابر با ۸,۳ سنت به ازای هر کیلووات ساعت می‌باشد. اسدی و همکاران (۱۳۹۵)

آقایاری و همکاران (۱۳۹۶) با تقسیم نیروگاه‌های گازی، بخار و سیکل ترکیبی به دو گروه کوچک و بزرگ، بهای تمام‌شده در هر یک از نیروگاه‌ها را محاسبه و با یکدیگر مقایسه نموده‌اند. مطابق با نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه، بهای تمام‌شده در نیروگاه یکسان، با تغییر ظرفیت تولید، بعضاً تا دو برابر افزایش میابد.

در جدول (۱) خلاصه مطالعات صورت گرفته بر روی بهای تمام‌شده تولید انرژی به همراه نتایج آن‌ها آورده شده است.

جدول (۱): خلاصه مطالعات صورت گرفته بر روی بهای تمام‌شده انرژی

نویسندگان	توضیحات	گاز	بخار	سیکل ترکیبی
برق منطقه‌ای فارس (۷۹)	سوخت گاز	۵,۷x+۸,۸*		
	سوخت گازوئیل	۵,۷x+۱۷*		
سازمان بهره‌وری انرژی ایران (۸۶)		۳۵۶*		۳۲۶*
اکرامی و صادقی (۸۷)	بدون در نظر گرفتن جریمه آلودگی	۳۸,۳۳*	۴۲,۶*	۵۳,۱*
	با در نظر گرفتن جریمه آلودگی	۶۴*	۸۷,۸*	۶۳,۳*
	با در نظر گرفتن قیمت سوخت جهانی و جریمه آلودگی	۲۸۱*	۲۴۳*	۱۶۴*
شجاعی و همکاران (۹۲)	بررسی نیروگاه شهید رجایی	۳۳۶*		۳۱۴*
مطهری و همکاران (۹۳)	با در نظر گرفتن سوخت گاز	۱۹۵۶*		
	با در نظر گرفتن سوخت گازوئیل	۴۴۱۱*		
محمودی و همکاران (۹۴)	استفاده از مدل هم‌ترازی هزینه	۱۹۵۶*		
اسدی و همکاران (۹۵)	با در نظر گرفتن قیمت صادراتی سوخت	۸,۳**	۱۰,۷**	۶,۵**
	با در نظر گرفتن قیمت فعلی سوخت	۴,۹**	۷,۸**	۳,۶**
آقایاری و همکاران (۹۶)	نیروگاه‌های با مقیاس بزرگ	۳,۰۲**	۲,۲۴**	۲,۱۹**
	نیروگاه‌های با مقیاس کوچک	۵,۲۱**	۴,۱۵**	

* اعداد برحسب ریال بر کیلووات ساعت می‌باشد.

** اعداد برحسب سنت بر کیلووات ساعت می‌باشد.

منبع: یافته های پژوهش

مطابق با مطالعات صورت گرفته در این حوزه، به‌طورکلی سه روش حسابداری، هم‌ترازی هزینه‌ها و برآورد تابع هزینه در سطوح مختلف تولید برای تعیین بهای تمام‌شده

تولید برق قابل‌استفاده است. در این بین برآورد تابع هزینه تولید، نظر به ارائه هزینه تولید متفاوت در سطوح مختلف تولید از دقت بالاتری برخوردار است. ازاین‌رو در این مطالعه با در نظر گرفتن توابع هزینه متفاوت، بهترین تابع هزینه تولید برق در نیروگاه سیکل ترکیبی اردبیل ارائه‌شده است. ازجمله نوآوری‌های مقاله موجود، می‌توان موارد ذیل را اشاره نمود:

أ- در این مطالعه به‌جای اعلام متوسط بهای تمام‌شده به صورت یک عدد ثابت برای تمامی سطوح تولید، تابع هزینه تولید برای نیروگاه گازی به دست آورده شده است که برخلاف مطالعات جاری، تابع موردبررسی به‌صورت غیرخطی می‌باشد.

ب- با در نظر گرفتن مصرف داخلی نیروگاه به‌عنوان بخشی از مصارف، به‌جای تولید ناخالص، بهای تمام‌شده تولید خالص که بیانگر میزان کیلووات ساعت قابل‌فروش می‌باشد، محاسبه‌شده است.

ج-به‌کارگیری چهار نوع تابع هزینه و سه الگوریتم فراابتکاری جهت برآورد پارامترهای توابع هزینه منجر به افزایش دقت مدل در برآورد هزینه شده است.

د- این مطالعه اولین مورد مطالعاتی بهای تمام‌شده تولید بر روی یک نیروگاه خصوصی بعد از واگذاری آن به بخش خصوصی می‌باشد.

۳. مدل پیشنهادی

نظر به اهمیت موضوع بهای تمام‌شده تولید انرژی و تأثیر آن در تعیین سطوح مجاز قیمت برای بازار برق، در این مطالعه با به‌کارگیری الگوریتم‌های فرا ابتکاری، پارامترهای توابع هزینه لئوتنیف، مربعی، مکعبی و ترنس لگاریتم برآورد شده و بهترین آن‌ها به‌عنوان مدلی برای تعیین بهای تمام‌شده تولید در سطوح مختلف تولید پیشنهاد گردیده است.

اولین گام در تعیین بهای تمام‌شده تولید، شناسایی مصارف هزینه می‌باشد. در مقاله نصیرزاده و بیهودی زاده، شش گروه هزینه به‌عنوان هزینه‌های تولید انرژی شناسایی‌شده است که ازاین‌بین، نظر به نوع قرارداد بهره‌برداری منعقد شده با شرکت آرمان نیرو در نیروگاه سیکل ترکیبی اردبیل، دو گروه هزینه واحد پشتیبانی فنی و هزینه بهره‌برداری با

یکدیگر ادغام‌شده و در یک سرفصل تحت عنوان هزینه بهره‌برداری برابر با مبلغ قرارداد بهره‌برداری از نیروگاه قابل‌بررسی می‌باشد.

ازاین‌رو در این مطالعه، جهت تعیین بهای تمام‌شده تولید پنج گروه هزینه با نام‌های، هزینه سوخت($f(x)$)، استهلاک ($f_۱$)، تعمیرات($f_۲$) ، بهره‌برداری ($f_۳$)و سایر هزینه‌ها($f_۴$) (مانند هزینه‌های بیمه نیروگاه، هزینه استفاده از تجهیزات شبکه انتقال، مشاور، حقوق دستمزد کارکنان مالک و .....) در نظر گرفته شده است.

مطابق با مطالعه انجام شده توسط ایان (۲۰۱۸) بیش از ۷۰ درصد از هزینه‌های تولید در نیروگاه‌های حرارتی مربوط به هزینه سوخت می‌باشد، ۱۰ درصد از هزینه‌ها مشمول هزینه‌های بهره‌برداری و ۲۰ درصد آن شامل سایر هزینه‌ها بوده است. ایان (۲۰۱۸)[1]

لذا نظر به وابستگی مستقیم سوخت مصرفی با میزان تولید، تأثیر سوخت مصرفی بر بهای تمام‌شده تولید برق به‌صورت یک تابع غیرخطی در نظر گرفته‌شده و تأثیر سایر پارامترهای هزینه بر روی بهای تمام‌شده، با سرشکن کردن کل هزینه در یک دوره زمانی بر متوسط تولید آن دوره در مدل به‌صورت معادله (۱) لحاظ شده است.

$$Cost = a + f(x) \qquad (۱)$$

که در آن a برابر با قسمت ثابت هزینه و مقدارآن از معادله (۲) محاسبه می‌شود و $f(x)$ به‌عنوان بخش متغیر هزینه می‌باشد که به کیلووات تولیدی در هر ساعت وابسته است و با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری در ادامه برآورد خواهد شد.

$$a = \frac{f_۱}{T} + \frac{f_۲}{T} + \frac{f_۳}{۳۳۰۰T} + \frac{f_۴}{T} \qquad (۲)$$

در معادله (۲)، پارامتر $f_۲$ بیانگر هزینه تعمیرات جاری و اساسی در یک دوره ۳۳۰۰۰[2] ساعت کارکرد ژنراتور می‌باشد و پارامترهای $f_۱$، $f_۳$ و $f_۴$ به ترتیب بیانگر متوسط هزینه‌های استهلاک، بهره‌برداری و سایر هزینه‌ها (به‌غیراز سوخت) در یک سال می‌باشند و مقدار T برابر با متوسط کیلووات ساعت انرژی تولیدشده در یک سال است که با میانگین‌گیری

1 .Ian (2018)

۲.مطابق با دستورالعمل کارخانه سازنده، تعمیرات اساسی در دوره های ۳۳۰۰۰ ساعت کارکرد انجام می‌گردد.

مقادیر تولیدشده در سال‌های اخیر قابل‌محاسبه می‌باشد و t بیانگر متوسط کیلووات ساعت تولیدی در هر ساعت است.

برای محاسبه تابع f(x) از روی‌داده‌های تاریخی مربوط به میزان تولید ساعتی و سوخت مصرفی در هر ساعت می‌توان توابع متفاوتی را برای سوخت مصرفی برآورد نمود که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از: نوربرتو و همکاران (۲۰۱۱)[1]

مدل هزینه لئوتنیف[2]

$$f(x) = p\beta_0 X \qquad (۳)$$

مدل هزینه مربعی[3]

$$f(x)=p(\ .+\ _1X+\ _2X^2) \qquad (۴)$$

مدل هزینه مکعبی[4]

$$f(x)=p(\ .+\ _1X+\ _2X^2+\ _3X^3) \qquad (۵)$$

مدل هزینه ترنس لگاریتم[5]

$$f(x)=e^{p(\beta_0+\beta_1 Ln^X+\beta_1 Ln^{X^2})} \qquad (۶)$$

که در آن‌ها، P بیانگر هزینه سوخت، X بیانگر کیلووات تولید و بتا پارامترهای مدل می باشد.

به‌منظور برآورد پارامترهای هر یک از مدل‌های فوق از سه الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، ژنتیک و ازدحام ذرات به شرح ذیل استفاده‌شده است.

۳-۱. الگوریتم شبیه‌سازی تبرید[6]

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

1. Norberto et. al (2011)
2. Leontief Cost Function
3 .Quadratic Cost Function
4 .Cubic Cost Function
5. Translog Cost Function
6. simulated annealing

این الگوریتم برگرفته از رفتار یک جسم داغ در فرایند سرد کردن آن تا زمان رسیدن به حالت انرژی پایه می‌باشد و در سال ۱۹۸۳ کرک پاتریک، از آن برای حل مسائل بهینه‌سازی استفاده نمود. شیه و همکاران (۲۰۱۱)[1]

به‌منظور برآورد پارامترهای تابع هزینه با استفاده از این الگوریتم، مراحل ذیل تکرار می شوند.

مرحله ۱: t را برابر با صفر قرار داده و به‌صورت تصادفی یک جواب اولیه برای پارامترهای مدل ایجاد نموده (به‌صورت یک بردار که طول آن با تعداد پارامترها برابر می‌باشد). سپس پارامترهای برآورد شده را درون مدل قرار داده و به ازای مقادیر مختلف x از داده‌های تاریخی، مقدار $f(x)$ محاسبه می‌شود که این مقدار را به‌صورت $\bar{y}$ نمایش می‌دهیم.

مرحله ۲: در این مرحله میزان برازندگی جواب با استفاده از محاسبه مجذور خطا از معادله (۷) محاسبه می‌شود.

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{h=1}^{n}\frac{|f(x_h)-y|}{f(x_h)} \qquad (۷)$$

مرحله ۳: مقدار $T0$ را برابر با یک عدد بزرگ قرار داده.

مرحله ۴: درصورتی‌که شرط توقف الگوریتم (T_t=۰) برقرار بود الگوریتم متوقف شود و در غیر این صورت به مرحله بعدی رفته.

مرحله ۵: یک واحد به مقدار t اضافه کرده.

مرحله ۶: با استفاده از فرمول $p_t = p_{t-1} + \Delta p$ مقادیر جدید برای پارامترهای مدل تعیین کرده و مقدار MAE[2] را برای پارامترهای جدید تعیین کرده. درصورتی‌که مقدار MAE_t از مقدار MAE_{t-1} کوچک‌تر باشد، جواب جدیدی جایگزین جواب قبلی می‌شود، در غیر این صورت به شکل تصادفی جایگزینی انجام می‌شود به‌گونه‌ای که یک عدد به‌صورت تصادفی بین صفر تا یک ایجاد می‌شود و درصورتی‌که آن عدد از مقدار

1. Shieh et. al (2011)
2 .Mean Absolute error

$e^{\frac{\Delta MSE}{k_b T}}$ کوچک‌تر باشد، جواب جدید پذیرفته می‌شود و در غیر این صورت جواب قبلی پذیرفته می‌شود.

مرحله ۷: مقدار T_t را با استفاده از فرمول $T_t=aT_{t-1}$ که در آن a یک عدد تصادفی بین [۰,۸۵-۰,۹۶] است به‌روزرسانی کرده و به مرحله ۴ رفته.

۳-۲. الگوریتم ژنتیک[1]

حساب تکاملی[2]، برای اولین بار در سال ۱۹۶۰ توسط آقای ریچنبرگ ارائه شد که تحقیق وی در مورد استراتژی تکامل بود.بعدها نظریه او توسط محققان زیادی موردبررسی قرار گرفت تا اینکه الگوریتم ژنتیک توسط جان هولند در سال ۱۹۷۵ در دانشگاه میشیگان، ارائه شد. زنگ (۲۰۱۱)[3]

این الگوریتم کار خود را با k جواب قابل‌قبول که به‌عنوان جمعیت اولیه شناخته می‌شود شروع می‌کند و سپس با استفاده از یک تابع برازندگی[4] میزان مطلوبیت هر جواب محاسبه می‌گردد و بعدازآن از بین جواب‌های موجود دو جواب با بیشترین مطلوبیت به‌عنوان والد انتخاب می‌گردد که براثر امیرش جواب‌های والد، فرزندان جدید ایجاد می گردند که با افزودن فرزندان به جمعیت قبلی، جمعیت جدید به دست می‌آید. زنگ و همکاران (۲۰۱۱)

به‌منظور استفاده از الگوریتم ژنتیک جهت برآورد پارامتر توابع فوق، مراحل ذیل انجام می‌شود.

مرحله ۱: ابتدا جمعیت اولیه از جواب‌ها به‌صورت تصادفی ساخته می‌شود به‌گونه‌ای که هر جواب به‌صورت یک بردار نمایش داده می‌شود که طول آن برابر با تعداد پارامترهایی است که باید برآورد شود.

---

1 .Genetic Algorithm
2 .Evolutionary
3 .Zeng et. al (2011)
4 .Fitness Function

مرحله ۲: پارامترهای برآورد شده درون مدل قرار داده می‌شود و به ازای مقادیر مختلف X از داده‌های تاریخی، مقدار f(x) محاسبه می‌شود که این مقدار را به‌صورت $\bar{y}$ نمایش می دهیم.

مرحله ۳: در این مرحله میزان برازندگی هر جواب با استفاده از محاسبه مجذور خطا از فرمول ذیل محاسبه می‌شود.

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{h=1}^{n}\frac{|f(x_h)-y|}{f(x_h)} \qquad (۸)$$

درصورتی‌که شرط توقف الگوریتم مبنی بر تعداد نسل تولیدشده برقرار باشد، الگوریتم متوقف‌شده و جواب با کمترین میزان MAE به‌عنوان جواب بهینه انتخاب‌شده و در غیر این صورت به مرحله بعدی رفته.

مرحله ۴: با استفاده از چرخه رولت والدها به‌گونه‌ای انتخاب می‌شوند که جواب‌ها با میزان MAE کمتر شانس بیشتری داشته باشند.

مرحله ۵: با استفاده از فرایندهای انتخاب[1]، آمیزش[2] و جهش[3] نسل بعدی را ایجاد کرده و به مرحله ۲ رفته. در این مرحله در فرایندهای انتخاب، جواب‌ها بدون تغییر به نسل بعدی منتقل می‌شوند، در فرایند آمیزش بردارهای مربوط به والدها از یک نقطه شکسته شده و با یکدیگر تعویض می‌شوند و در فرایند جهش یکی از درایه‌های بردار جواب با یک عدد تصادفی جایگزین می‌شود.

۳-۳. الگوریتم ازدحام ذرات[4]

الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتمی برای حل مسائل دشوار بهینه‌سازی در فضای پیوسته و برگرفته از روابط پیچیده اجتماعی است، که توانایی تقلید از جوامع در فرایند آموزش را دارد.

1. Selection
2. Crossover
3. Mutation
4 .particle swarm optimization algorithm

اساس کار این روش بر مبنای نظریه‌ی ویلسون است که می‌گوید ،پرندگان در جست‌وجوی غذا از تجربیات قبلی خود و اکتشاف سایر پرندگان استفاده می‌کنند.یعنی پرندگان تجربیات خود را به اشتراک می‌گزارند. شیه و همکاران (۲۰۱۱)

فرایند برآورد پارامترهای مدل با این روش طی مراحل ذیل انجام می‌شود.

مرحله ۱: ابتدا تعداد n جواب (ذره) به‌صورت تصادفی ایجاد می‌شود. جواب‌ها به‌گونه‌ای که هر جواب به‌صورت یک بردار نمایش داده می‌شود که طول آن برابر با تعداد پارامترهایی است که باید برآورد شود.

مرحله ۲: پارامترهای برآورد شده درون مدل قرار داده می‌شود و به ازای مقادیر مختلف x از داده‌های تاریخی، مقدار $f(x)$ محاسبه می‌شود که این مقدار را به‌صورت $\bar{y}$ نمایش می دهیم.

مرحله ۳: در این مرحله میزان برازندگی هر جواب با استفاده از محاسبه مجذور خطا از فرمول ذیل محاسبه می‌شود.

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{h=1}^{n}\frac{|f(x_h)-y|}{f(x_h)} \qquad (۹)$$

مرحله ۴: درصورتی‌که شرط توقف الگوریتم مبنی بر تعداد جواب تولیدشده برقرار باشد، الگوریتم متوقف‌شده و جواب با کمترین میزان MAE به‌عنوان جواب بهینه انتخاب‌شده و در غیر این صورت به مرحله بعدی رفته.

مرحله ۵: برای iامین ذره بهترین جواب آن ذره (جواب با کمترین میزان خطا) در طول جواب‌ها را به‌عنوان P^{i}_{best} در نظر گرفته و برای تمامی ذرات، بهترین مقدار P^{i}_{best} را از بین تمامی ذرات به‌عنوان g_{best} برای کل ذرات به‌روزرسانی نموده.

مرحله ۶: محل ذرات را با استفاده از معادله (۱۰) به‌روزرسانی نموده و به مرحله ۲ رفته.

$$P^{j+1}{}_i = P^{j}{}_i + V_i^{j+1} \qquad (۱۰)$$

که در آن P^{j+1}_i ام بیانگر محل iامین ذره در مرحله بعد (مرحله j+1ام) می‌باشد و P^j_i بیانگر محل فعلی i امین ذره است و V^{j+1}_i بیانگر بردار جابه‌جایی است که از معادله (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$V_i^{j+1} = V_i^j + r\alpha[P_{best,i}^j - P_i^j] + s\beta[g_{best}^j - P_i^j] \qquad (۱۱)$$

که در آن s و r دو عدد ثابت بوده و α و β دو عدد تصادفی بین صفر و یک.

٤. پیاده‌سازی مدل

به‌منظور برآورد پارامترهای تابع بهای تمام‌شده تولید با استفاده از مدل‌های ارائه‌شده در بخش قبل، نیروگاه سیکل ترکیبی اردبیل شامل ۶ واحد گازی مدل V۹۴,۲ طرح آنسالدو، هر یک با ظرفیت اسمی ۱۶۰ مگاوات و جمعاً به ظرفیت اسمی ۹۶۰ مگاوات موردبررسی قرارگرفته است. اولین واحد این نیروگاه در سال ۱۳۸۶ به بهره‌برداری رسیده است و مطابق با آمارهای ماهیانه ارائه‌شده، با متوسط راندمان ۳۰ درصد و ضریب مصرف داخلی ۰,۷ و ۰,۹ درصد در حالت سوخت گاز و گازوئیل بهره‌برداری می‌شود.

داده‌های در اختیار عبارت‌اند از هزینه استهلاک سالانه که در این مطالعه مقدار متوسط ریالی آن بر متوسط تولید هرسال تقسیم‌شده و عدد حاصله به‌عنوان میزان تأثیرگذاری این هزینه بر تولید هر کیلووات ساعت انرژی در مدل لحاظ شده است.

هزینه بهره‌برداری که طی قرارداد بهره‌برداری با بهره‌بردار نیروگاه ابتدای هرسال تعیین می‌شود و همانند استهلاک در مدل پیشنهادی لحاظ شده است.

هزینه تعمیرات که طی دوره‌های ۲۰۰۰، ۴۰۰۰، ۸۰۰۰ و ۳۳۰۰۰ ساعته به‌صورت اورهال انجام می‌پذیرد لذا با در نظر گرفتن متوسط توان تولید در طول ۳۳۰۰۰ ساعت متوسط هزینه تعمیرات بر روی هر کیلووات ساعت تولید سرشکن خواهد شد.

سایر هزینه مانند هزینه‌های بیمه نیروگاه، هزینه استفاده از تجهیزات شبکه انتقال، مشاور، حقوق دستمزد کارکنان مالک و .... که در طول سال انجام می‌شود و همانند هزینه استهلاک و بهره‌برداری در مدل لحاظ شده‌اند.

با انجام محاسبات فوق، میزان سهم هزینه‌های استهلاک، تعمیرات، بهره‌برداری و سایر هزینه‌ها (به‌غیراز هزینه سوخت) به ازای هر کیلووات ساعت تولید برابر با ۱۴۷,۵ ریال[1] برآورد شده است.

از سوی دیگر به‌منظور تعیین تأثیر سوخت مصرفی بر بهای تمام‌شده تولید، اطلاعات تولید ساعتی، میزان سوخت مصرفی و نوع سوخت مصرفی در هر ساعت جمع‌آوری‌شده است و با استفاده از الگوریتم‌های شبیه‌سازی تبرید، ژنتیک و ازدحام ذرات پارامترهای تابع هزینه برای هر یک از مدل‌های لئوتنیف، مربعی، مکعبی و ترنس لگاریتم برای دو حالت سوخت گاز و گازوئیل برآورد شده است که نتایج آن به شرح جدول (۲) می‌باشد.

جدول (۲): پارامترهای مدل‌های برآورد هزینه

سوخت	الگوریتم	پارامتر	لئوتنیف	مربعی	مکعبی	ترنس لگاریتم
گاز	شبیه‌سازی تبرید	δ	۰/۴۱۰۰۰	۰/۰۰۱۸۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۵۲۰۰۰
		δ		۰/۰۰۰۱۰	۰/۰۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰۰
		δ		۰/۰۰۴۵۰	۰/۰۰۰۰۰	۳/۳۰۰۰۰
		δ			۰/۰۰۰۰۵	
	ژنتیک	δ	۰/۳۶۰۰۰	۰/۰۰۱۴۰	۰/۲۴۰۰۰	۰/۷۲۰۰۰
		δ		۰/۰۰۰۰۴	۲/۳۰۰۰۰	۱/۶۰۰۰۰
		δ		۰/۰۰۳۸۰	۰۱۱۰۰/۰	۲/۰۰۰۰۰
		δ			۰/۰۰۰۰۰	
	ازدحام ذرات	δ	۰/۳۷۰۰۰	۰/۰۱۷۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۵۲۰۰۰
		δ		۰/۰۰۰۱۷	۰/۰۰۰۰۰	۱/۱۰۰۰۰
		δ		۰/۰۰۳۹۰	۰/۰۰۰۰۱	۲/۲۰۰۰۰
		δ			۰/۰۰۰۰۴	
گازوئیل	شبیه‌سازی تبرید	δ	۰/۳۷۰۰۰	۰/۰۰۱۹۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۵۴۰۰۰
		δ		۰/۰۰۰۱۲	۰/۰۱۳۰۰	۱/۳۰۰۰۰
		δ		۰/۰۰۳۷۰	۰-/۰۰۰۱۱	۲/۰۰۰۰۰

۱. نظر به خصوصی بودن نیروگاه و محرمانه بودن اطلاعات (به علت انتخاب پیمانکاران تعمیرات و بهره برداری با استفاده از مناقصه در فضای کاملا رقابتی) از آوردن مقادیر هزینه به تفسیل خود داری شده است.

سوخت	الگوریتم	پارامتر	لئوتنیف	مربعی	مکعبی	ترنس لگاریتم
		δ			۰/۰۰۰۰۴	
	ژنتیک	δ	۰/۳۹۰۰۰	۰/۰۰۱۳۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۵۳۰۰۰
		δ		۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۱۳۰۰	۱/۲۰۰۰۰
		δ		۰/۰۰۳۹۰	۰/۰۰۰۱۱	۲/۹۰۰۰۰
		δ			۰/۰۰۰۰۳	
	ازدحام ذرات	δ	۰/۰۳۵۰۰	۰/۰۰۲۰۰	۰/۰۱۴۰۰	۰/۵۰۰۰۰
		δ		۰/۰۰۰۱۶	۰/۰۰۰۰۰	۱/۱۰۰۰۰
		δ		۰/۰۰۳۵۰	۰/۰۱۶۰۰	۱/۳۰۰۰۰
		δ			۰/۰۰۰۰۰	

منبع: یافته های پژوهش

خطـای حاصـل از بـرآورد هزینـه بـر اسـاس مـدل‌های هزینـه مختلـف و بـه‌کارگیری الگوریتم‌های فرا ابتکاری ارائه‌شده مطابق با جدول (۳) است.

جدول (۳): خطای حاصل از پیاده‌سازی مدل‌های برآورد هزینه

نوع سوخت	الگوریتم	لئوتنیف	مربعی	مکعبی	ترنس لگاریتم
گاز	شبیه‌سازی تبرید	٪۴۰	٪۲۰	٪۳۰	٪۱۸
	ژنتیک	٪۱۷	٪۲۰	٪۱۵	٪۱۹
	ازدحام ذرات	٪۲۳	٪۲۷	٪۱۹	٪۱۷
گازوئیل	شبیه‌سازی تبرید	٪۳۲	٪۲۳	٪۲۵	٪۳۵
	ژنتیک	٪۳۷	٪۳۲	٪۲۵	٪۲۷
	ازدحام ذرات	٪۲۸	٪۲۱	٪۱۸	٪۲۲

منبع: یافته های پژوهش

متناسب با مقدار خطای هر یک از مدل‌های فوق، در دو حالت گاز و گازوئیل مـدل هزینـه مکعبی با کمترین مقدار خطا همراه بوده است که ازاین‌بین بـرای حالـت گـازی الگـوریتم ژنتیک و برای حالت گازوئیل الگوریتم ازدحام ذرات بهترین بـرآورد پـارامتر را بـه همـراه داشته‌اند.

ازاین‌رو میزان سوخت مصرفی در تولید x کیلووات انرژی درصورتی‌که سوخت مصرفی گاز باشد از معادله (۱۲) و درصورتی‌که سوخت مصرفی گازوئیل باشد از معادله (۱۳) حاصل می‌شود.

$$f(x)=۰/۲۴+ ۲/۳X+ ۰/۰۱۱X^{۲}+ ۰/۰۰۰۰۰۰۰۸X^{۳} \quad (۱۲)$$

$$f(x)=۰/۰۱۴+ ۰/۰۱۶X^{۲} ^{\circ} ۰/۰۰۰۰۰۰۱X^{۳} \quad (۱۳)$$

معادلات فوق بیانگر میزان سوخت مصرفی برای انرژی تولیدشده ناخالص می‌باشد درحالی‌که قسمتی از انرژی تولیدشده به‌صورت مصرف داخلی استفاده می‌شود و به‌عنوان محصول نهایی قابل فروش نیست (به‌عبارت‌دیگر به ازای مصرف داخلی، هیچ‌گونه درآمدی عاید نخواهد شد). از این رو نظر به ضریب مصرف ۰,۷ درصد در حالت تولید با سوخت گاز و ۰,۹ درصد در حالت تولید با سوخت گازوئیل برای نیروگاه موردبررسی، معادلات مربوط به حالت سوخت گاز (معادله (۱۲)) و گازوئیل (معادله (۱۳)) را به ترتیب بر عدد ۰,۹۹۳ و عدد ۰,۹۹۱ تقسیم نموده تا میزان سوخت مصرفی جهت تولید انرژی خالص مطابق با معادلات ذیل به دست آید.

$$f(x)=۰/۲۵+ ۲,۳۲X+ ۰/۰۱۱۱۹X^{۲}+ ۰/۰۰۰۰۰۰۸۱X^{۳} \quad (۱۴)$$

$$f(x)=۰/۰۱۴+ ۰/۰۱۶۳X^{۲} ^{\circ} ۰/۰۰۰۰۰۱۰۹X^{۳} \quad (۱۵)$$

نظر به معادلات به‌دست‌آمده برای مصرف سوخت و با در نظر گرفتن تمامی هزینه‌های معرفی‌شده در بخش قبل، تابع هزینه تولید x کیلووات ساعت انرژی در حالت سوخت مصرفی گاز از معادله (۱۶) محاسبه خواهد شد. (شکل (۲))

$$C(x)=۱۴۷/۵\,X + P(۰/۲۵ + ۲,۳۲X+ ۰/۰۱۱۱۹X^{۲}+ ۰/۰۰۰۰۰۰۸۱X^{۳}) \quad (۱۶)$$

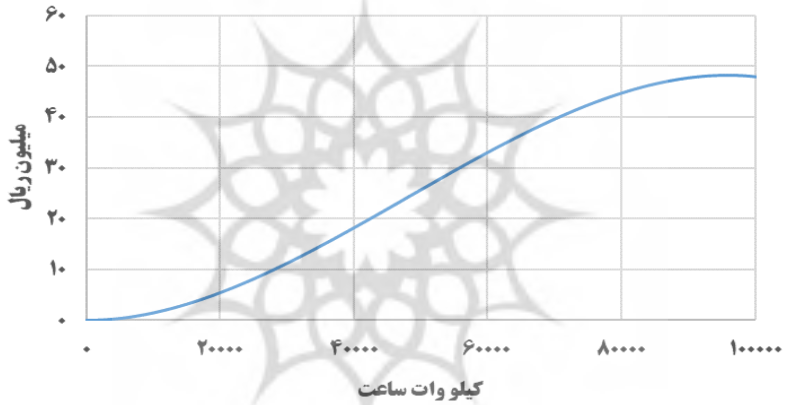
و در حالت سوخت مصرفی گازوئیل از معادله (۱۷) به دست می‌آید. (شکل (۳))

$$C(x)=۱۴۷/۵\,X + P\,(۰/۰۱۴ + ۰/۰۱۶۳X۲ ^{\circ} ۰/۰۰۰۰۰۱۰۹X\,۳) \quad (۱۷)$$

که در آن P بیانگر بهای واحد سوخت مصرفی (یک مترمربع گاز یا یک لیتر گازوئیل) می‌باشد.

شکل (۲) تابع هزینه تولید X کیلووات ساعت انرژی با سوخت گاز

منبع: یافته های پژوهش



شکل (۳) تابع هزینه تولید X کیلووات ساعت انرژی با سوخت گازوئیل

منبع: یافته های پژوهش

نظر به توابع هزینه تولید برای X کیلووات ساعت انرژی، به‌منظور محاسبه متوسط هزینه تولید هر کیلووات ساعت انرژی در سطوح مختلف تولید برای حالت گاز و گازوئیل، معادلات ۱۶ و ۱۷ را بر X تقسیم نموده تا هزینه تولید هر کیلووات ساعت انرژی در سطوح مختلف تولید برای حالت سوخت مصرفی گاز و گازوئیل مطابق با معادلات ۱۸ و ۱۹ حاصل شود.

$$c(x)=+۱۴۷,۵p(\frac{۰,۲۵}{x}+۲,۳۲+۰,۰۱۱۹x-۰,۰۰۰۰۰۰۸۱x^{۲}) \quad (۱۸)$$

$$c(x)=+۱۴۷,۵p(\frac{۰,۰۱۴}{x}+۰,۰۰۱۶۳x-۰,۰۰۰۰۰۰۱۰۹x^{۲}) \quad (۱۹)$$

نظر به تابع هزینه تولید هر کیلووات ساعت انرژی در هر سطح تولید، به‌منظور محاسبه متوسط هزینه تولید هر کیلووات ساعت انرژی با انتگرال‌گیری تابع هزینه و محاسبه سطح زیر نمودار و به دنبال آن تقسیم آن بر طول بازه، متوسط هزینه تولید در دو حالت استفاده از سوخت گاز و گازوئیل به دست میاید که مطابق با نتایج حاصل‌شده متوسط هزینه تولید انرژی در حالت استفاده از سوخت گاز برابر با ۳۹۸ ریال و در حالت استفاده از سوخت گازوئیل برابر با ۵۰۰ ریال می‌باشد.

۵.نتیجه‌گیری

نظر به اهمیت برق به‌عنوان یک کالای مصرفی در عموم صنایع، قیمت عرضه آن تأثیر بسزایی بر بهای تمام‌شده سایر کالاها و خدمات خواهد داشت. از سوی دیگر با مقررات زدایی از صنعت برق و تعیین قیمت آن از طریق حراج روزانه مطابق با دستورالعمل نهاد تنظیم‌کننده بازار، کنترل مستقیم قیمت خرید آن از تولیدکنندگان خارج از اختیار دولت می‌باشد و دولت با تعیین بازه‌های مجاز پیشنهاد قیمت در حراج روزانه به کنترل آن می پردازد.

لذا به‌منظور تعیین بهینه محدوده قیمت از سوی نهاد تنظیم‌کننده بازار و ارائه پیشنهاد قیمت بهینه از سوی تولیدکنندگان انرژی در حراج روزانه، اندازه‌گیری بهای تمام‌شده تولید انرژی امری ضروری است. بدین منظور در این مطالعه با در نظر گرفتن هزینه‌های سوخت مصرفی، استهلاک، تعمیرات، بهره‌برداری و سایر هزینه‌ها به‌عنوان عوامل تأثیرگذار بر روی بهای تمام‌شده تولید انرژی، پارامترهای توابع هزینه به‌صورت لئوتنیف، مربعی، مکعبی و ترنس لگاریتم با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی به تفکیک سوخت گاز و گازوئیل برای نیروگاه سیکل ترکیبی اردبیل برآورده شده است.

مطابق با اندازه‌گیری خطای هر یک از مدل‌ها، نهایتاً تابع متوسط هزینه تولید انرژی با سوخت گاز به صورت $+۱۴۷,۵p(\frac{۰,۲۵}{x}+۲,۳۲+۰,۰۱۱۹x-۰,۰۰۰۰۰۰۸۱x^{۲})$ و با سوخت گازوئیل به صورت $+۱۴۷,۵p(\frac{۰,۰۱۴}{x}+۰,۰۰۱۶۳x-۰,۰۰۰۰۰۱۰۹x^{۲})$ حاصل شده است.

با محاسبه میانگین هزینه در سطوح مختلف تولید، بهای تمام‌شده هر کیلووات ساعت انرژی با سوخت گاز برابر با ۳۹۸ ریال و با سوخت گازوئیل برابر با ۵۰۰ ریال حاصل خواهد شد که با نتایج حاصله از مطالعات ارائه‌شده توسط سازمان بهره‌وری انرژی ایران (۱۳۸۶)، اکرامی و صادقی (۱۳۸۷) و شجاعی و همکاران (۱۳۹۲) تطابق دارد، با این تفاوت که در مطالعه جاری، به‌جای ارائه یک عدد به‌عنوان هزینه تولید کلی، با استفاده از تابع هزینه، هزینه تولید در سطوح مختلف تولید با دقت بالاتری قابل‌اندازه‌گیری می‌باشد.

٦. منابع

الف) فارسی

لاجوردی، حسن و محدث، نسرین (۱۳۸۷). محاسبه قیمت تمام‌شده یک کیلووات ساعت برق در سال ۱۳۸۷. مرکز توسعه فناوری نیرو (متن) شرکت توانیر، صص ۲۱-۴۱.

قره پتیان، گئورگ و صلای نادری، مهدی (۱۳۸۶). بررسی فنی و اقتصادی تکنولوژیهای مولد مقیاس کوچک قابل استفاده در ایران.سازمان بهره وری انرژی ایران. تهران. شماره ۸. صص ۳۶-۴۹.

اکرامی، عطیه و صادقی مهدی (۱۳۸۷). ارزیابی اقتصادی توسعه نیروگاه‌های خورشیدی با توجه به ملاحظات زیست محیطی، *علوم و تکنولوژی محیط زیست*، دوره دهم .شماره ۲، صص ۵۱-۴۳.

نصیر زاده، فرزانه و بیهودی زاده، دانیال (۱۳۸۸). بهای تمام‌شده تولید برق در واحدهای گازی و سیکل ترکیبی نیروگاه شریعتی مشهد. *مجله دانش و توسعه*. سال شانزدم، شماره ۲۶، صص ۱۰۳-۸۶

شجاعی، معصومه، غازی، ساناز و بیرانوند، مهتاب (۱۳۹۲). انجام مطالعات اقتصادی و زیست‌محیطی نیروگاه-های فسیلی و هسته‌ای و ارائه گزینه بهینه. *اقتصاد مالی*، سال هفتم، شماره ۲۲، صص ۴۸-۲۷.

مطهری، علی اکبر، احمدیان، مجید، عابدی، زهرا و.غفارزاده، حمیدرضا (۱۳۹۳). ارزیابی اقتصادی بهره‌گیری از نیروگاههای بادی در ایران با درنظر گرفتن اثر سیاست آزادسازی قیمت انرژی، *پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران*، سال سوم، شماره ۱۰، صص ۲۰۰-۱۷۹.

دفتر تنظیم مقررات بازار آب و برق و خصوصی سازی. (۱۳۹۳). مروری بر وضعیت صنعت آب و برق از ابعاد قیمت تمام‌شده، نرخ فروش، منابع و مصارف، سرمایه گذاری. گزارش آماری دفتر تنظیم مقررات بازار آب و برق و خصوصی سازی.

اسدی، فریبا، کریم، محمد حسین و فشاری، مجید (۱۳۹۵). رقابت پذیری برق زمین گرمایی در مقایسه با روش‌های متداول تولید برق در ایران. *پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران*. سال پنجم، شماره ۱۸، صص ۲۷-۱.

آقایاری، جعفر، افتخاری، حسین و فردنیا، پرویز (۱۳۹۶). تحلیل اقتصادی و مقایسه هزینه همتراز شده تولید برق الکتریکی توسط فناوری گاز سوز. سی و دومین کنفرانس بین المللی برق تهران، ایران. صص ۱-۱۶.

ب) انگلیسی

Abednia, O., Amjady, N., Shafie-Khah, M. and CATALÃO, J. P. S. (2015). Electricity Price Forecast Using Combinatorial Neural Network Trained by a New Stochastic Search Method. *Energy Conversion and Management*, Vol. 105, pp. 642-654.

Yousefi, G.R., Kaviri, S.M., Latify, M.A. & Rahmati, I. (2017). Electricity Industry Restructuring in Iran. *Energy Policy*, Vol.108, pp. 212˚ 226

Ian, p. (2018). Cost Comparisons for Wind and Thermal Power Generation. *Energy Policy*. Vol.112, pp. 272-279

Fueyo, N., Sanz, Y., Rodrigues, M., Montañés, C. and Dopazo, C. (2011). The Use of Cost-Generation Curves for the Analysis of Wind Electricity Costs in Spain. *Applied Energy*, Vol. 88, pp. 733˚740

Shieh, H.L., Kuo, C.C., Chiang, C.M. (2011) Modified Particle Swarm Optimization Algorithm with Simulated Annealing Behavior and Its Numerical Verification. *Appl Math Comput*, Vol.218, pp. 4365˚4383

Zeng, X.J., Tao, J., Zhang, P., Pan, H., Wang, Y.Y. (2011). Reactive Power Optimization of Wind Farm Based on Improved Genetic Algorithm. In: 2nd International Conference on Advances in Energy Engineering, Vol.14. pp. 1362˚1367

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی