

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 حسین زاده کاشان^۳

محمد رضا امین ناصری^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۲۰

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 هر روز تولیدکنندگان انرژی با یکدیگر به رقابت می‌پردازند. در این بین بهای تمام‌شده تولید انرژی پارامتر تعیین‌کننده در تعیین استراتژی پیشنهاد قیمت توسط هر نیروگاه و میزان سود بخشی آن می‌باشد. از این رو 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 قابل توجه سوخت بر روی بهای تمام‌شده، سوخت مصرفی را به‌صورت جدا از سایر موارد مورد بررسی 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 به عنوان 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)^۱

در گذشته، لزوم سرمایه‌گذاری‌های کلان در زمینه تولید، انتقال و توزیع برق، وجود انحصار دولتی برای این صنعت را توجیه می‌نمود، به گونه‌ای 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 به منظور 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 به منظور ایجاد فضای مناسب به منظور رقابت نیروگاه‌ها با یکدیگر، بازار برق تحت عنوان بازار روز بعد^۲ شکل گرفته شد که در آن شرکت‌های تولید انرژی الکتریکی با یکدیگر بر سر فروش انرژی باقیمت پیشنهادی به رقابت می‌پردازند. (یوسفی . همکاران (۲۰۱۷)^۳)

در این بازار، در هر روز 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 انجام شده 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

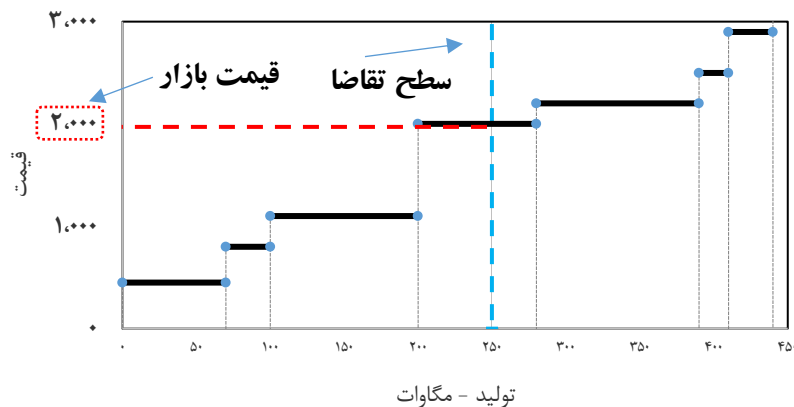
1 .Abedina et al. (2015)

2 .Day Ahead Market

3 .Yousefi et al (2017)

برآورد تابع بهای تمام شده تولید انرژی... ۱۳۷

منظور ابتدا تمامی پله‌های پیشنهادی^۱ تولیدکنندگان از کوچک به بزرگ مرتب شده 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 به گونه‌ای 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 هر روز تعیین می‌شود. (یوسفی و همکاران (۲۰۱۷)^۲)

لذا به‌منظور تعیین بهینه محدوده مجاز پیشنهاد قیمت از سوی نهاد قانون‌گذار و برنامه‌ریزی مناسب جهت توسعه تولید انرژی با فناوری مناسب، محاسبه دقیق بهای تمام‌شده تولید انرژی با فناوری‌های مختلف اهمیت می‌یابد. از این‌رو 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 داده شده است. سپس در بخش چهارم به معرفی مورد مطالعه و پیاده‌سازی مدل پیشنهادی بر روی آن پرداخته شده است و در نهایت جمع‌بندی نتایج در بخش پایانی ارائه شده 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 مورد توجه قرار گرفته است و مطالعات متعددی در خصوص محاسبه بهای تمام شده تولید انرژی انجام شده 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 به‌دست آمده، تابع هزینه تولید (برحسب ریال) X کیلووات ساعت

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

برآورد تابع بهای تمام شده تولید انرژی... ۱۳۹

انرژی برای واحد گازی با سوخت گاز به صورت $X + ۸,۸ + ۵,۷$ و با سوخت گازوئیل به صورت $X + ۱۷,۶ + ۵,۷$ می باشد (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 تمام شده برق برای توربین گاز با بویلر بازیافت ۳۲۶ ریال بر کیلووات ساعت و برای ژنراتور گازسوز ۳۵۶ ریال بر کیلووات ساعت محاسبه شده 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 به دست آمده از مدل آن‌ها هزینه تمام شده 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 می باشد. این در حالی است که در سناریو دیگری با احتساب هزینه‌های مربوط به آلاینده‌گی محیط‌زیست و در نظر گرفتن قیمت جهانی سوخت، بهای تمام شده هر کیلووات ساعت انرژی در نیروگاه‌های بخار، گاز و سیکل ترکیبی، به ترتیب برابر با ۲۴۳,۵، ۲۸۱ و ۱۶۴ ریال بر کیلووات ساعت برآورد شده است. اکرامی و صادقی (۱۳۸۷)

نصیرزاده و بیهودی زاده (۱۳۸۸) با به کارگیری روش‌های حسابداری، به بررسی و محاسبه بهای تمام شده 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 انجام شده در سال‌های ۸۲ تا ۸۴ به تفکیک گروه هزینه برای واحد گازی و بلوک سیکل ترکیبی ارائه شده 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 فناوری سیکل ترکیبی برابر با ۳۱۴,۷۶ ریال و با استفاده از فناوری گاز ۳۳۶,۲۵ ریال می‌باشد.

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 گرفتن 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 پیش‌بینی شده 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)

برآورد تابع بهای تمام شده تولید انرژی... ۱۴۱

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

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

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

نویسندگان	توضیحات	گاز	بخار	سیکل ترکیبی
برق منطقه‌ای فارس (۷۹)	سوخت گاز	$5,7x+8,8^*$		
	سوخت گازوئیل	$5,7x+17^*$		
سازمان بهره‌وری انرژی ایران (۸۶)		356^*		326^*
اکرامی و صادقی (۸۷)	بدون در نظر گرفتن جریمه آلودگی	$38,33^*$	$42,6^*$	$53,1^*$
	با در نظر گرفتن جریمه آلودگی	64^*	$87,8^*$	$63,3^*$
	با در نظر گرفتن قیمت سوخت جهانی و جریمه آلودگی	281^*	243^*	164^*
شجاعی و همکاران (۹۲)	بررسی نیروگاه شهید رجایی	336^*		314^*
مطهری و همکاران (۹۳)	با در نظر گرفتن سوخت گاز	1956^*		
	با در نظر گرفتن سوخت گازوئیل	4411^*		
محمودی و همکاران (۹۴)	استفاده از مدل هم‌ترازی هزینه	1956^*		
اسدی و همکاران (۹۵)	با در نظر گرفتن قیمت صادراتی سوخت	$8,3^{**}$	$10,7^{**}$	$6,5^{**}$
	با در نظر گرفتن قیمت فعلی سوخت	$4,9^{**}$	$7,8^{**}$	$3,6^{**}$
آقایاری و همکاران (۹۶)	نیروگاه‌های با مقیاس بزرگ	$3,01^{**}$	$2,24^{**}$	$2,19^{**}$
	نیروگاه‌های با مقیاس کوچک	$5,21^*$	$4,15^*$	

* اعداد برحسب ریال بر کیلووات ساعت می‌باشد.

** اعداد برحسب سنت بر کیلووات ساعت می‌باشد.

منبع: یافته‌های پژوهش

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

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

ا- در این مطالعه به جای اعلام متوسط بهای تمام شده 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 مورد بررسی به صورت غیرخطی می‌باشد.

ب- با در نظر گرفتن مصرف داخلی نیروگاه به عنوان بخشی از مصارف، به جای تولید ناخالص، بهای تمام شده تولید خالص که بیانگر میزان کیلووات ساعت قابل فروش می‌باشد، محاسبه شده است.

ج- به کارگیری 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 تمام شده تولید بر روی یک نیروگاه خصوصی بعد از واگذاری آن به بخش خصوصی می‌باشد.

۳. مدل پیشنهادی

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

اولین گام در تعیین بهای تمام شده تولید، شناسایی مصارف هزینه می‌باشد. در مقاله نصیرزاده و بیهودی زاده، شش گروه هزینه به عنوان هزینه‌های تولید انرژی شناسایی شده است که از این بین، 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

برآورد تابع بهای تمام شده تولید انرژی... ۱۴۳

یکدیگر ادغام شده و در یک سرفصل تحت عنوان هزینه بهره‌برداری برابر با مبلغ قرارداد بهره‌برداری از نیروگاه قابل بررسی می‌باشد.

از این رو در این مطالعه، جهت تعیین بهای تمام شده تولید پنج گروه هزینه با نام‌های، هزینه سوخت ($f(x)$)، استهلاک (f_1)، تعمیرات (f_2)، بهره‌برداری (f_3) و سایر هزینه‌ها (f_4) (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)^۱

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

$$Cost = a + f(x) \quad (1)$$

که در آن a برابر با قسمت ثابت هزینه و مقدار آن از معادله (۲) محاسبه می‌شود و $f(x)$ به عنوان 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.

$$a = \frac{f_1}{T} + \frac{f_2}{T} + \frac{f_3}{33000T} + \frac{f_4}{T} \quad (2)$$

در معادله (۲)، پارامتر f_2 بیانگر هزینه تعمیرات جاری و اساسی در یک دوره ۳۳۰۰۰ ساعت کارکرد ژنراتور می‌باشد و پارامترهای f_1 ، f_2 و f_4 به ترتیب بیانگر متوسط هزینه‌های استهلاک، بهره‌برداری و سایر هزینه‌ها (به غیر از سوخت) در یک سال می‌باشند و مقدار T برابر با متوسط کیلووات ساعت انرژی تولید شده در یک سال است که با میانگین گیری

1. Ian (2018)

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

مقادیر تولید شده در سال‌های اخیر قابل محاسبه می‌باشد و t بیانگر متوسط کیلووات ساعت تولیدی در هر ساعت است.

برای محاسبه تابع $f(x)$ از روی داده‌های 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)^۱

مدل هزینه لئوتیف^۲

$$f(x) = p\beta_0 X \quad (۳)$$

مدل هزینه مربعی^۳

$$f(x) = p(\beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2) \quad (۴)$$

مدل هزینه مکعبی^۴

$$f(x) = p(\beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \beta_3 X^3) \quad (۵)$$

مدل هزینه ترنس لگاریتم^۵

$$f(x) = e^{p(\beta_0 + \beta_1 \ln x + \beta_2 \ln^2 x)} \quad (۶)$$

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

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

۳-۱. الگوریتم شبیه‌سازی تبرید^۶

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

برآورد تابع بهای تمام شده تولید انرژی... ۱۴۵

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)^۱ به منظور برآورد پارامترهای تابع هزینه با استفاده از این الگوریتم، مراحل ذیل تکرار می‌شوند.

مرحله ۱: t را برابر با صفر قرار داده و به صورت تصادفی یک جواب اولیه برای پارامترهای مدل ایجاد نموده (به صورت 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 به صورت \bar{y} نمایش می‌دهیم. مرحله ۲: در این مرحله میزان برازندگی جواب با استفاده از محاسبه معذور خطا از معادله (۷) محاسبه می‌شود.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{h=1}^n |f(x_h) - \hat{y}| \quad (7)$$

مرحله ۳: مقدار T_0 را برابر با یک عدد بزرگ قرار داده.

مرحله ۴: در صورتی که شرط توقف الگوریتم ($T_t=0$) 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^t را برای پارامترهای جدید تعیین کرده. در صورتی که 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 به گونه‌ای که یک عدد به صورت تصادفی بین صفر تا یک ایجاد می‌شود و در صورتی که آن عدد از مقدار

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

$e^{\frac{\Delta MSE}{k_b T}}$ کوچک تر باشد، جواب جدید پذیرفته می شود و در غیر این صورت جواب قبلی پذیرفته می شود.

مرحله ۷: مقدار T_t را با استفاده از فرمول $T_t = aT_{t-1}$ که در آن a یک عدد تصادفی بین $[0, 96-0, 85]$ است به روزرسانی کرده و به مرحله ۴ رفته.

۳-۲. الگوریتم ژنتیک^۱

حساب تکاملی^۲، 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 مورد بررسی قرار گرفت تا اینکه الگوریتم ژنتیک توسط جان هولند در سال ۱۹۷۵ در دانشگاه میشیگان، ارائه شد. زنگک (۲۰۱۱)^۳

این الگوریتم کار خود را با k جواب قابل قبول که به عنوان جمعیت اولیه شناخته می شود شروع می کند و سپس با استفاده از یک تابع برازندگی^۴ میزان مطلوبیت هر جواب محاسبه می گردد و بعد از آن از بین جواب های موجود دو جواب با بیشترین مطلوبیت به عنوان والد انتخاب می گردد که بر اثر امیرش جواب های والد، فرزندان جدید ایجاد می گردند که با افزودن فرزندان به جمعیت قبلی، جمعیت جدید به دست می آید. زنگک و همکاران (۲۰۱۱)

به منظور استفاده از الگوریتم ژنتیک جهت برآورد پارامتر توابع فوق، مراحل ذیل انجام می شود.

مرحله ۱: ابتدا جمعیت اولیه از جواب ها به صورت تصادفی ساخته می شود به گونه ای که هر جواب به صورت یک بردار نمایش داده می شود 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

برآورد تابع بهای تمام شده تولید انرژی... ۱۴۷

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

مرحله ۳: در این مرحله میزان برازندگی هر جواب با استفاده از محاسبه مجدد خطا از فرمول ذیل محاسبه می شود.

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

در صورتی که شرط توقف الگوریتم مبنی بر تعداد نسل تولید شده برقرار باشد، الگوریتم متوقف شده و جواب با کمترین میزان MAE به عنوان جواب بهینه انتخاب شده و در غیر این صورت به مرحله بعدی رفته.

مرحله ۴: با استفاده از چرخه رولت والدها به گونه ای انتخاب می شوند که جواب ها با میزان MAE کمتر شانس بیشتری داشته باشند.

مرحله ۵: با استفاده از فرایندهای انتخاب^۱، آمیزش^۲ و جهش^۳ نسل بعدی را ایجاد کرده و به مرحله ۲ رفته. در این مرحله در فرایندهای انتخاب، جواب ها بدون تغییر به نسل بعدی منتقل می شوند، در فرایند آمیزش بردارهای مربوط به والدها از یک نقطه شکسته شده و با یکدیگر تعویض می شوند و در فرایند جهش یکی از درایه های بردار جواب با یک عدد تصادفی جایگزین می شود.

۳-۳. الگوریتم ازدحام ذرات^۴

الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتمی برای حل مسائل دشوار بهینه سازی 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) به صورت تصادفی ایجاد می‌شود. جواب‌ها به گونه‌ای که هر جواب به صورت 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 به صورت \bar{y} نمایش می‌دهیم. مرحله ۳: در این مرحله میزان برازندگی هر جواب با استفاده از محاسبه مجذور خطا از فرمول ذیل محاسبه می‌شود.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{h=1}^n \frac{|f(x_h) - \hat{y}|}{f(x_h)} \quad (9)$$

مرحله ۴: در صورتی که شرط توقف الگوریتم مبنی بر تعداد جواب تولیدشده برقرار باشد، الگوریتم متوقف شده و جواب با کمترین میزان MAE به عنوان جواب بهینه انتخاب شده و در غیر این صورت به مرحله بعدی رفته.

مرحله ۵: برای آمین ذره بهترین جواب آن ذره (جواب با کمترین میزان خطا) در طول جواب‌ها را به عنوان P_{best}^i در نظر گرفته و برای تمامی ذرات، بهترین مقدار P_{best}^i را از بین تمامی ذرات به عنوان g_{best} برای کل ذرات به روزرسانی نموده.

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

$$P_i^{j+1} = P_i^j + V_i^{j+1} \quad (10)$$

برآورد تابع بهای تمام شده تولید انرژی... ۱۴۹

که در آن P_i^{j+1} ام بیانگر محل i امین ذره در مرحله بعد (مرحله $j+1$ ام) می باشد و P_i^j بیانگر محل فعلی i امین ذره است و V_i^{j+1} بیانگر بردار جابه جایی است که از معادله (۱۱) محاسبه می شود.

$$V_i^{j+1} = V_i^j + r\alpha[P_{best,i}^j - P_i^j] + s\beta[g_{best}^j - P_i^j] \quad (11)$$

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

۴. پیاده سازی مدل

به منظور برآورد پارامترهای تابع بهای تمام شده تولید با استفاده از مدل های ارائه شده در بخش قبل، نیروگاه سیکل ترکیبی اردبیل شامل ۶ واحد گازی مدل ۷۹۴،۲ طرح آنسالدو، هر یک با ظرفیت اسمی ۱۶۰ مگاوات و جمعاً به ظرفیت اسمی ۹۶۰ مگاوات مورد بررسی قرار گرفته است. اولین واحد این نیروگاه در سال ۱۳۸۶ به بهره برداری رسیده است و مطابق با آمارهای ماهیانه ارائه شده، با متوسط راندمان ۳۰ درصد و ضریب مصرف داخلی ۰،۷ و ۰،۹ درصد در حالت سوخت گاز و گازوئیل بهره برداری می شود.

داده های در اختیار عبارت اند از هزینه استهلاک سالانه که در این مطالعه مقدار متوسط ریالی آن بر متوسط تولید هر سال تقسیم شده و عدد حاصله به عنوان میزان تأثیر گذاری این هزینه بر تولید هر کیلووات ساعت انرژی در مدل لحاظ شده است.

هزینه بهره برداری که طی قرارداد بهره برداری با بهره بردار نیروگاه ابتدای هر سال تعیین می شود و همانند استهلاک در مدل پیشنهادی لحاظ شده است.

هزینه تعمیرات که طی دوره های ۲۰۰۰، ۴۰۰۰، ۸۰۰۰ و ۳۳۰۰۰ ساعته به صورت اورهال انجام می پذیرد 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 هزینه های بیمه نیروگاه، هزینه استفاده از تجهیزات شبکه انتقال، مشاور، حقوق دستمزد کارکنان مالک و که در طول سال انجام می شود و همانند هزینه استهلاک و بهره برداری در مدل لحاظ شده اند.

۱۵۰ پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران، سال هفتم، شماره ۲۷، تابستان ۱۳۹۷

با انجام محاسبات فوق، میزان سهم هزینه‌های استهلاک، تعمیرات، بهره‌برداری و سایر هزینه‌ها (به‌غیر از هزینه سوخت) به ازای هر کیلووات ساعت تولید برابر با ۱۴۷,۵ ریال^۱ 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 جمع‌آوری شده 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_1	۰/۴۱۰۰۰	۰/۰۰۱۸۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۵۲۰۰۰
		δ_2		۰/۰۰۰۱۰	۰/۰۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰۰
		δ_3		۰/۰۰۴۵۰	۰/۰۰۰۰۰	۳/۳۰۰۰۰
		δ_4			۰/۰۰۰۰۵	
	ژنتیک	δ_1	۰/۳۶۰۰۰	۰/۰۰۱۴۰	۰/۰۲۴۰۰۰	۰/۷۲۰۰۰
		δ_2		۰/۰۰۰۰۴	۲/۳۰۰۰۰	۱/۶۰۰۰۰
		δ_3		۰/۰۰۳۸۰	۰/۱۱۰۰/۰	۲/۰۰۰۰۰
		δ_4			۰/۰۰۰۰۰	
	ازدحام ذرات	δ_1	۰/۳۷۰۰۰	۰/۰۱۷۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۵۲۰۰۰
		δ_2		۰/۰۰۰۱۷	۰/۰۰۰۰۰	۱/۱۰۰۰۰
		δ_3		۰/۰۰۳۹۰	۰/۰۰۰۰۱	۲/۲۰۰۰۰
		δ_4			۰/۰۰۰۰۴	
گازوئیل	شبیه‌سازی تبرید	δ_1	۰/۳۷۰۰۰	۰/۰۰۱۹۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۵۴۰۰۰
		δ_2		۰/۰۰۰۱۲	۰/۰۱۳۰۰	۱/۳۰۰۰۰
		δ_3		۰/۰۰۳۷۰	-/۰۰۰۱۱	۲/۰۰۰۰۰

۱. نظر به خصوصی بودن نیروگاه و محرمانه بودن اطلاعات (به علت انتخاب پیمانکاران تعمیرات و بهره‌برداری با استفاده از مناقصه در فضای کاملاً رقابتی) از آوردن مقادیر هزینه به تفصیل خودداری شده است.

برآورد تابع بهای تمام شده تولید انرژی... ۱۵۱

سوخت	الگوریتم	پارامتر	لئوتنیف	مربعی	مکعبی	ترنس لگاریتم
	گاز	δ_4			۰/۰۰۰۰۴	
		δ_1	۰/۳۹۰۰۰	۰/۰۰۱۳۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۵۳۰۰۰
		δ_2		۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۱۳۰۰	۱/۲۰۰۰۰
		δ_3		۰/۰۰۳۹۰	۰/۰۰۰۱۱	۲/۹۰۰۰۰
	گازوئیل	δ_4			۰/۰۰۰۰۳	
		δ_1	۰/۰۳۵۰۰	۰/۰۰۲۰۰	۰/۰۱۴۰۰	۰/۵۰۰۰۰
		δ_2		۰/۰۰۰۱۶	۰/۰۰۰۰۰	۱/۱۰۰۰۰
		δ_3		۰/۰۰۳۵۰	۰/۰۱۶۰۰	۱/۳۰۰۰۰
		δ_4			۰/۰۰۰۰۰	

منبع: یافته های پژوهش

خطای حاصل از برآورد هزینه بر اساس مدل های هزینه مختلف و به کارگیری الگوریتم های فرا ابتکاری ارائه شده مطابق با جدول (۳) است.

جدول (۳): خطای حاصل از پیاده سازی مدل های برآورد هزینه

نوع سوخت	الگوریتم	لئوتنیف	مربعی	مکعبی	ترنس لگاریتم
گاز	شبیه سازی تبرید	٪۴۰	٪۲۰	٪۳۰	٪۱۸
	ژنتیک	٪۱۷	٪۲۰	٪۱۵	٪۱۹
	ازدحام ذرات	٪۲۳	٪۲۷	٪۱۹	٪۱۷
گازوئیل	شبیه سازی 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 مدل های فوق، در دو حالت گاز و گازوئیل مدل هزینه مکعبی با کمترین مقدار خطا همراه بوده است که از این بین برای حالت گازی الگوریتم ژنتیک و برای حالت گازوئیل الگوریتم ازدحام ذرات بهترین برآورد پارامتر را به همراه داشته اند.

از این رو میزان سوخت مصرفی در تولید X کیلووات انرژی در صورتی که سوخت مصرفی گاز باشد از معادله (۱۲) و در صورتی که سوخت مصرفی گازوئیل باشد از معادله (۱۳) حاصل می‌شود.

$$f(x) = 0.24 + 2/3X + 0.11X^2 + 0.00000081X^3 \quad (12)$$

$$f(x) = 0.14 + 0.16X^2 - 0.0000001X^3 \quad (13)$$

معادلات فوق بیانگر میزان سوخت مصرفی برای انرژی تولید شده ناخالص می‌باشد در حالی که قسمتی از انرژی تولید شده به صورت مصرف داخلی استفاده می‌شود و به عنوان محصول نهایی قابل فروش نیست (به عبارت دیگر به ازای مصرف داخلی، هیچ گونه 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 مورد بررسی، 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.

$$f(x) = 0.25 + 2.32X + 0.1119X^2 + 0.00000081X^3 \quad (14)$$

$$f(x) = 0.14 + 0.163X^2 - 0.000000109X^3 \quad (15)$$

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

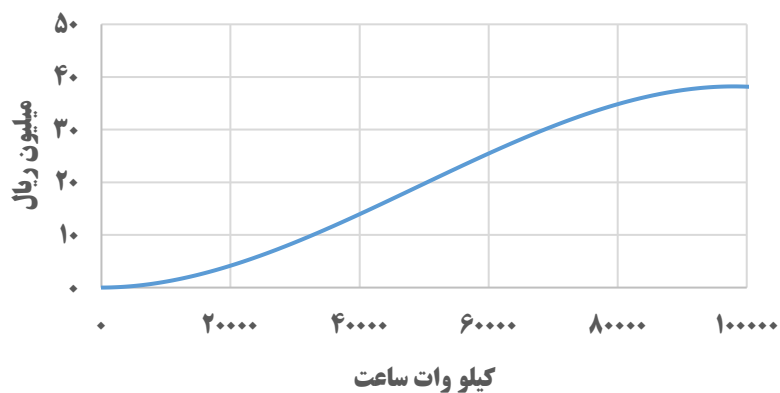
$$C(x) = 147/5 X + P(0.25 + 2.32X + 0.1119X^2 + 0.00000081X^3) \quad (16)$$

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

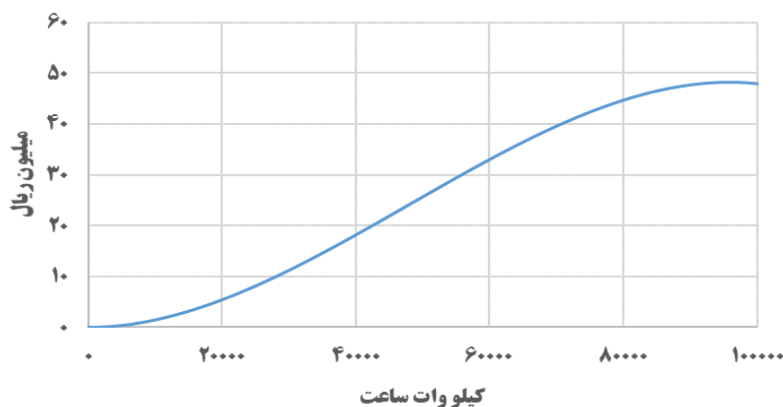
$$C(x) = 147/5 X + P(0.14 + 0.163X^2 - 0.000000109X^3) \quad (17)$$

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

برآورد تابع بهای تمام‌شده تولید انرژی... ۱۵۳



شکل (۲) تابع هزینه تولید X کیلووات ساعت انرژی با سوخت گاز
منبع: یافته‌های پژوهش



شکل (۳) تابع هزینه تولید X کیلووات ساعت انرژی با سوخت گازوئیل
منبع: یافته‌های 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.

$$c(x) = +147,5p \left(\frac{0,25}{x} + 2,32 + 0,119x - 0,000000081x^2 \right) \quad (18)$$

$$c(x) = +147,5p \left(\frac{0,14}{x} + 0,0163x - 0,000000109x^2 \right) \quad (19)$$

نظر به تابع هزینه تولید هر کیلووات ساعت انرژی در هر سطح تولید، به منظور محاسبه متوسط هزینه تولید هر کیلووات ساعت انرژی با انتگرال گیری 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 حاصل شده 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 می باشد.

۵. نتیجه گیری

نظر به اهمیت برق به عنوان یک کالای مصرفی در عموم صنایع، قیمت عرضه آن تأثیر بسزایی بر بهای تمام شده 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 تنظیم کننده بازار، کنترل مستقیم قیمت خرید آن از تولیدکنندگان خارج از اختیار دولت می باشد و دولت با تعیین بازه های مجاز پیشنهاد قیمت در حراج روزانه به کنترل آن می پردازد.

لذا به منظور تعیین بهینه محدوده قیمت از سوی نهاد تنظیم کننده بازار و ارائه پیشنهاد قیمت بهینه از سوی تولیدکنندگان انرژی در حراج روزانه، اندازه گیری بهای تمام شده تولید انرژی امری ضروری است. بدین منظور در این مطالعه با در نظر گرفتن هزینه های سوخت مصرفی، استهلاک، تعمیرات، بهره برداری و سایر هزینه ها به عنوان عوامل تأثیرگذار بر روی بهای تمام شده تولید انرژی، پارامترهای توابع هزینه به صورت لئوتیف، مربعی، مکعبی و ترنس لگاریتم با استفاده از الگوریتم های هوش مصنوعی به تفکیک سوخت گاز و گازوئیل برای نیروگاه سیکل ترکیبی اردبیل برآورده شده است.

برآورد تابع بهای تمام شده تولید انرژی... ۱۵۵

مطابق با اندازه گیری خطای هر یک از مدل‌ها، نهایتاً تابع متوسط هزینه تولید انرژی با

سوخت گاز به صورت $(\frac{0,25}{x} + 2,32 + 0,0119x - 0,000000081x^2) + 147,5p$ و با

سوخت گازوئیل به صورت $(\frac{0,14}{x} + 0,00163x - 0,000000109x^2) + 147,5p$ حاصل

شده است.

با محاسبه میانگین هزینه در سطوح مختلف تولید، بهای تمام شده 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 ارائه شده توسط سازمان بهره‌وری انرژی ایران (۱۳۸۶)، اکرامی و صادقی (۱۳۸۷) و شجاعی و همکاران (۱۳۹۲) تطابق دارد، با این تفاوت که در مطالعه جاری، به جای ارائه یک عدد به عنوان هزینه تولید کلی، با استفاده از تابع هزینه، هزینه تولید در سطوح مختلف تولید با دقت بالاتری قابل اندازه گیری می‌باشد.

۶. منابع

الف) فارسی

لاجوردی، حسن و محدث، نسرین (۱۳۸۷). محاسبه قیمت تمام شده یک کیلووات ساعت برق در سال ۱۳۸۷. مرکز توسعه فناوری نیرو (متن) شرکت توانیر، صص ۲۱-۴۱.
قره پتیان، گنورگ و صلائی نادری، مهدی (۱۳۸۶). بررسی فنی و اقتصادی تکنولوژیهای مولد مقیاس کوچک قابل استفاده در ایران. سازمان بهره‌وری 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 ۴۳-۵۱.

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

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

مطهری، علی اکبر، احمدیان، مجید، عابدی، زهرا و غفارزاده، حمیدرضا (۱۳۹۳). ارزیابی اقتصادی بهره‌گیری از نیروگاههای بادی در ایران با در نظر 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 ۱-۲۷.

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

برآورد تابع بهای تمام شده تولید انرژی... ۱۵۷

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