مجله آموزش مهندسی ایران، شماره ۲۷، سال هفتم، ص. ۱۴۰-۱۲۱

برنامه بهینه اجرای راهکارهای مدیریت انرژی در کشور

سید محمد صادق زاده

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد

چکیده: بهینه سازی شبکه یکپارچه جریان انرژی از محل انرژی نهایی تا مصارف مفید و خدمات انرژی، انتخاب مناسب‌ترین فناوری‌ها و حامل‌های انرژی قابل جایگزین در کشور را امکان‌پذیر می‌سازد. هدف اصلی از ارائه این مقاله تدوین برنامه بلند مدت اجرای راهکارهای اقتصادی بهینه سازی مصرف انرژی در بخش‌های ساختمان و صنعت کشور است. برای این منظور، برآورد تقاضای مفید از جمله سرمایش، گرمایش، نیروی محرکه، هوای فشرده و مدلسازی تجهیزات انرژی بر فعال و غیر فعال بخش‌های ساختمان و صنعت صورت گرفته است.

بر اساس نتایج برنامه، بهترین سیستم سرمایش برای ماطق گازرسانی شده، سیستم‌های جذبی گازسوز و برای مناطق گاز رسانی نشده، کولر آبی با بر چسب رتبه A و B است. برای گرمایش استفاده از وسایل گازسوز به خصوص بخاری گازسوز در اولویت است. استفاده از سیستم‌های گرایش مرکزی گازی که دارای تقارن با سیستم گرمایش جذبی گاز سوز است، در اولویت دوم قرار دارد. عایقکاری دیواره‌ها در ساختمان‌های ساخته شده و ساخته نشده تا سه برابر شدن هزینه عایقکاری دارای توجیه اقتصادی است. استفاده از پنجره‌های دو جداره در ساختمان‌های ساخته نشده و دو جداره کردن پنجره‌های ساختمان‌های ساخته شده، استفاده از وسایل خانگی با بالاترین رتبه برچسب انرژی و استفاده از لامپ‌های کم مصرف و فلورسنت دارای توجیه کامل اقتصادی است. اجرای این راهکارها در بخش ساختمان، کاهش ۵۴درصدی هزینه‌های مصرف انرژی و کاهش ۱۵ درصدی هزینه‌های سرمایه گذاری به دلیل کاهش ظرفیت نصب تجهیزات گرمایشی و سرمایشی در اثر عایقکاری ساختمان را به دنبال دارد.

استفاده از اکونومایزر، تله‌های بخار، تنظیم کننده سوخت به هوا، پیش گرمکن هوا، بازیافت آب گرم اتلافی و تولید همزمان برق و بخار در فرایندهای صنعتی، برای تأمین بخار، جایگزینی موتورهای با راندمان بالا به جای موتورهای استاندارد و استفاده از درایوهای کنترل در کاربردهایی که الگوی بار تغییرات بسیاری دارد، استفاده از کمپرسورهای رفت و برگشتی برای دبی‌های کمتر از ۱۰۰۰ لیتر بر ثانیه و کمپرسورهای سانتریفوژبرای دبی‌های بیش از ۱۰۰۰ لیتر بر ثانیه و به کارگیری چیلرهای جذبی به خصوص از نوع گاز سوز شعله مستقیم از اولویت‌های اقتصادی برنامه بهینه سازی است. با اجرای برنامه بهینه سازی بخش صنعت، ۱۱/۸ درصد در مصرف سوخت صرفه جویی خاهد شد. این اقدامات به کاهش انتشار ۱۹۸ میلیون تن CO_2، ۳۷۰ هزار تن NOx و یک میلیون تن SO_2 از آلاینده‌های زیست محیطی منتج خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: مدلسازی، یکپارچه، شبکه مرجع انرژی، راهکارهای بهینه سازی مصرف انرژی و برنامه بلند مدت انرژی.

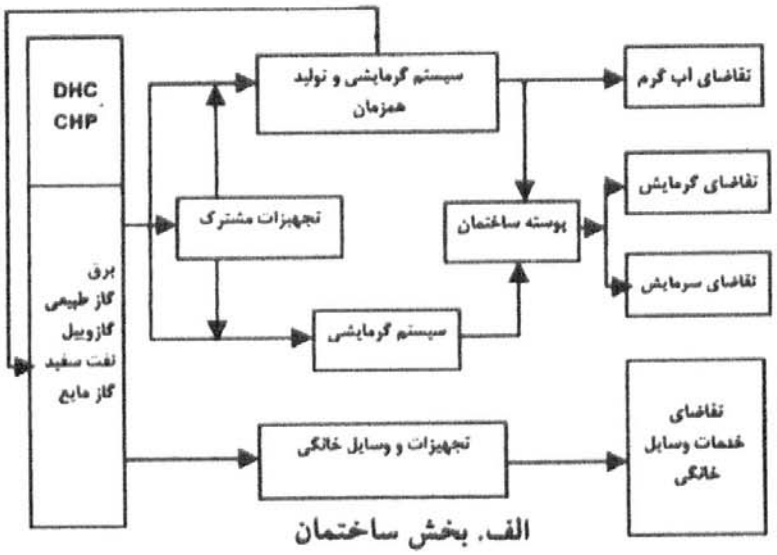
۱. مقدمه

بخش‌های ساختمان و صنعت با مصرف به ترتیب ۴۰ درصد و ۲۰ درصد از کل انرژی نهایی کشور جایگاه مهمی در اقتصاد انرژی کشور دارند [۵]. این دو بخش پتانسیل‌های گسترده‌ای برای صرفه جویی انرژی و مدیریت بار دارند که دستیابی به آنها از نظر گستردگی اقدامات و نیاز به سرمایه گذاری اولیه با مشکلات زیادی روبه روست. پاسخ به این سؤال ضروری است که اجرای کدام دسته از راهکارها از دید اقتصاد ملی دارای اولویت و برنامه زمانبندی اجرای آنها کدام است.

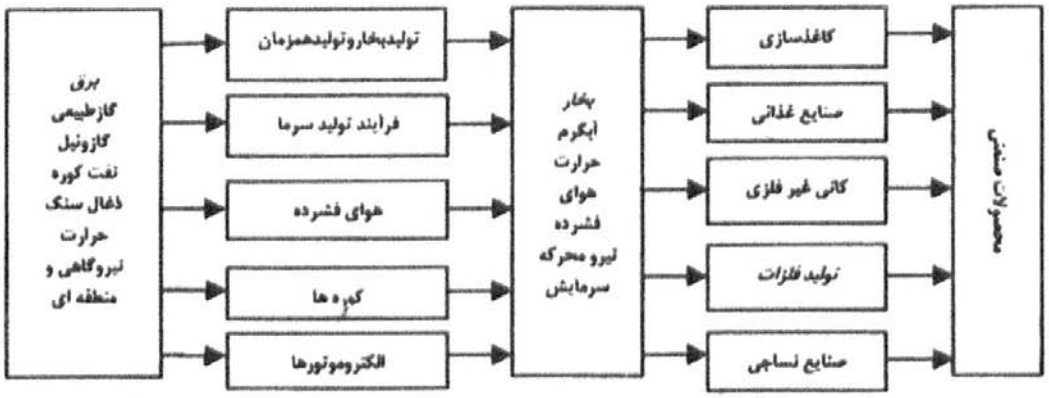
برای پاسخ به این سؤال ابتدا شبکه انرژی ساختمان و صنعت کشور در بخش دوم تدوین شده است. سپس مشخصات فنی و اقتصادی تجهیزات انرژی‌بر و پوسته ساختمان به ترتیب در بخش‌های دوم و سوم و چهارم مقاله آمده است. در بخش پنجم مقاله به برآورد تقاضای مفید و خدمات انرژی بخش ساختمان برای یک دوره ۲۵ ساله پرداخته می‌شود. بخش ششم نتایج برنامه بهینه ارائه می‌شود که با اعمال این نتایج بر روی یک ساختمان نمونه در بخش هفتم درستی نتایج بررسی می‌شود. به دلیل پرهیز از طولانی شدن مقاله، از ارائه محاسبات تقاضا و مشخصات فناوری‌های بخش صنعت پرهیز شده است و تنها در بخش هشتم درباره نتایج بهینه سازی بخش صنعت بحث می‌شود. در خاتمه، اولویت‌ها و سیاست‌های برنامه نتیجه گیری شده است.

۲. شبکه جریان انرژی

شمای کلی یکپارچه انرژی بخش ساختمان و صنعت کشور در شکل ۱ نشان داده شده است. مطابق قسمت الف شکل ۱، پوسته ساختمان یکی از بخش‌های شبکه را تشکیل می‌دهد که شامل مدل چهار نوع جداره، سه نوع کف، سقف و پنجره و مدل نفوذ هواست. بخش‌های سرمایش و گرمایش شبکه ساختمان به تفکیک اقلیم و ناحیه بندی روستایی و شهری و نوع ساختمان‌های موجود در آنها مدل شده است. بخش تجهیزات مشترک شامل فن کویل و بخش تجهیزات انرژی بر شامل یخچال و فریزر، ماشین لباسشویی و تجهیزات روشنایی در شبکه انرژی آمده است



الف. بخش ساختمان



ب. بخش صنعت

شکل ۱. ساختار شبکه جریان انرژی بخش‌های ساختمان و صنعت کشور

جریان انرژی در صنعت صرف تبدیل انرژی برای تأمین نیروی محرکه، سرمایش، بخار و هوای فشرده می‌شود که در هر فرایند صنعتی به اقتضای تولید محصول خاص آن صنعت استفاده می‌شود. بر این اساس، مدل انرژی بخش صنعت به دو بخش مجزا تفکیک می‌شود. قسمت ب شکل ۱ به طور شماتیک جریان انرژی بخش صنعت و مراحل مدلسازی را نشان می‌دهد.

۳. مشخصات فنی و اقتصادی تجهیزات انرژی‌بر

یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر بهینه سازی شبکه جریان انرژی، بازده وسایل و تجهیزات انرژی بر است. از آنجاکه خروجی این تجهیزات معمولاً از جنس خدمات است و نمی‌توان آن را بر حسب واحد انرژی بیان کرد، تعیین بازده به صورت متداول غیر ممکن است. در تدوین استاندارد برچسب مصرف انرژی این تجهیزات از شاخص مصرف انرژی بر یک واحد خدمات انرژی بهره گرفته می‌شود و تجهیزات با رتبه‌های مختلف بر اساس این شاخص با یکدیگر مقایسه می‌شوند [۱۰ و ۱۲]. بر اساس این شاخص، بازده نسبی مطابق رابطه (۱) در این مطالعه معرفی می‌شود:

$$\eta_{relative} = I_A/I \qquad (۱)$$

که در آن I_A شاخص برچسب مصرف انرژی بالاترین رتبه در استاندارد بر چسب مصرف انرژی؛ یعنی رتبه A و I شاخص مصرف انرژی است. در سیستم‌های روشنایی هر وات از نظر تئوری معادل ۶۸۰ لومن شار روشنایی است که بر اساس آن بازده لامپ از رابطه $\eta_{lamp}=Lm/W/۶۸۰$ قابل ارزیاب است. بدین ترتیب، در لامپ‌ها به جای استفاده از مفهوم قرارداد بازده نسبی از بازده واقعی استفاده می‌شود.

برای درج هزینه سرمایه‌گذاری بر واحد ظرفیت ارائه خدمات تجهیزات، رابطه (۲) پیشنهاد می‌شود:

$$InvCost = PP/(ECapa.\nu_{relative}) \qquad (۲)$$

که در آن PP قیمت خرید تجهیزات بر حسب واحد پولی، ECapa ظرفیت مصرف انرژی سالیانه تجهیزات بر حسب واحد انرژی در سال، $\eta_{relative}$ بازده نسبی تجهیزات نسبت به بهترین رتبه مصرف انرژی در استاندارد مصرف انرژی و InvCost هزینه سرمایه‌گذاری بر حسب واحد پولی بر ظرفیت ارائه خدمات بر حسب واحد انرژی در سال است. گفتنی است که

در مدلسازی انرژی منطقاً هزینه سرمایه گذاری نسبت به ظرفیت جریان انرژی خروجی یا ظرفیت ارائه خدمات یک عملیات انرژی سنجیده و کمتر بر حسب ظرفیت جریان انرژی ورودی تعیین می‌شود. بر این اساس، در مخرج رابطه (۲) ظرفیت مصرف انرژی سالیانه تجهیزات در بازده مصرف انرژی آن صرف شده است تا ظرفیت انرژی خروجی تعیین شود. مجموعه مشخصات فنی اقتصادی تجهیزات مدلسازی شده در مطالعه مطابق اطلاعات مراجع [۲، ۳، ۹، ۱۰، و ۱۲] در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. مشخصات فنی - اقتصادی تجهیزات انرژی‌بر بخش ساختمان کشور

وسایل و تجهیزات انرژی‌بر	شاخص مصرف انرژی	بازده نسبی (درصد)	سرمایه گذاری (هزار ریال)	ظرفیت خدمات	ظرفیت مصرف انرژی	کارکرد سالیانه (درصد)	عمر اقتصادی
ماشین لباسشویی رتبه A	۰/۱۹kWh/kg	۱۰۰	۴۰۰۰	۵ کیلوگرم	۰/۹۵kW	۳/۶	۲۵ سال
ماشین لباسشویی رتبه C	۰/۲۷	۷۰	۳۶۰۰		۱/۳۵		
ماشین لباسشویی رتبه E	۰/۳۵	۵۴	۳۰۰۰		۱/۷۵		
ماشین لباسشویی رتبه G	۰/۳۹	۴۹	۲۹۰۰		۱/۹۵		
یخچال و فریزر رتبه A	۵۵*	۱/۰	۲۸۰۰	۱۱ فوت	۱۵۰W	۰/۲	۱۵ سال
یخچال و فریزر رتبه C	۹۰	۰/۶۱	۲۴۰۰			۰/۳۴	
یخچال و فریزر رتبه E	۱۱۰	۰/۵۰	۲۲۰۰			۰/۴۲	
یخچال و فریزر رتبه G	۱۴۰	۰/۳۹	۲۰۰۰			۰/۵۳	
کولر گازی رتبه A	۰/۳۳#	۱۰۰	۱۷۰۰۰	۱۸۰۰۰ Btu/hr	۱/۷۶kW	۱۶/۴	۱۵ سال
کولر گازی رتبه C	۰/۳۸	۸۷	۱۵۰۰۰		۲		
کولر گازی رتبه E	۰/۴۵	۷۳	۱۴۰۰۰		۲/۴		
کولر گازی رتبه G	۰/۵۶	۵۹	۱۲۰۰۰		۲/۹		
کولر آبی رتبهA	۰/۰۱۵۴#	۱۰۰	۲۰۰۰	۳۵۰۰ Cfm	۲۵۰W	۱۶/۴	۱۰ سال
کولر آبی رتبه C	۰/۰۱۷۲	۸۹	۱۶۰۰		۲۸۰		
کولر آبی رتبه E	۰/۰۲۳۸	۶۵	۱۴۵۰		۳۸۰		
کولر آبی رتبه G	۰/۰۳۸۵	۴۰	۱۳۷۰		۶۱۵		

ادامه جدول ۱

لامپ رشته‌ای	۱۲Lm/WAAA	۱۲/۷	۲/۵	۱۲۰۰Lm	۱۰۰W		۱۰۰۰hr
فلورسنت	۶۰	۸/۸	۴۵	۱۸۰۰	۳۲	۳۳	۸۰۰۰
کم مصرف	۶۰	۸/۸	۳۰	۱۰۰۰	۱۸		۸۰۰۰
سرمایش مرکزی	-	۷۵	۸۷۰۰ بر تن تبرید	۵ تن تبرید	۱۵۱۲۰ Kcal/hr	۲۵	۲۰
پکیج سرمایش	-	۸۵	۳۵۰۰۰	۱۲۸۵۲ Kcal/hr	۱۵۱۲۰ Kcal/hr	۲۵	۲۰
آبگرمکن گازی دیواری	-	۷۲	۱۵۰۰	۱۰۰ لیتر	۳۷۸۰ Kcal/hr	۵۰	۱۵
آبگرمکن گازی مخزن‌دار	-	۵۷	۲۰۰۰	۱۰۰ لیتر	۳۷۸۵ Kcal/hr	۵۰	۱۰
بخاری گازی	-	۷۰	۲۱۰	۱۳۶۵۰ Kcal/hr	۱۹۵۰۰ Kcal/hr	۲۵	۱۰
گرمایش مرکزی گازسوز	-	۸۵	۴۸۰۰	۲۰۴۰۰ Kcal/hr	۲۴۰۰۰ Kcal/hr	۵۰	۲۰
آبگرمکن نفتی	-	۵۵	۷۰۰	۱۰۰ لیتر	۳۷۸۰ Kcal/hr	۱۰۰	۱۵
بخاری نفتی	-	۶۵	۲۰۰	۲۶۰۰ Kcal/hr	۴۰۰۰ Kcal/hr	۲۵	۱۰
پکیج گازسوز	-	۸۵	۴۵۰۰	۱۷۰۰۰ Kcal/hr	۲۰۰۰۰ Kcal/hr	۵۰	۲۰
آبگرمکن ذخیره‌ای برقی	-	۷۸	۱۵۰۰	۱۲۰ لیتر	۳کیلووات	۱۰۰	۱۰
بخاری برقی	-	۹۵	۴۰۰	۲۵۷۰ Kcal/hr	۳کیلووات	۲۵	۱۵
گرمایش مرکزی گازوییلی	-	۸۵	۴۸۰۰	۲۰۴۰۰ Kcal/hr	۲۴۰۰۰ Kcal/hr	۵۰	۲۰

ادامه جدول ۱

ژنراتور با موتور گازسوز	-	سرمایه ۵۴ برق ۳۷	۶/۴ /kw میلیون ریال	۱۳۰kW	۳۵M۳/hr	۹۰	۱۵
میکروتوربین	-	سرمایه ۱۱ برق ۲۵	۱۰/۴ /kw میلیون ریال	۹۰۰kW	۲۲۰M۳/hr	۹۰	۱۰

* مصرف انرژی سالانه بر مصرف استاندارد سالانه بر حسب درصد #1/EER

بازده واقعی

۴. مشخصات پوسته ساختمان

مقادیر متوسط اتلاف حرارتی دیواره‌ها ۳۵ درصد، کف‌ها ۷/۵ درصد، سقف‌ها ۷/۵ درصد و پنجره‌ها ۵۰ درصد در شرایط فعلی کشور منظور شده است. برای محاسبه هزینه سرمایه گذاری پوسته ساختمان فرضیاتی در نظر گرفته شده است. تلفات حرارتی جداره‌ها در تابستان ۷ درصد کمتر از تلفات در زمستان است [۱۱]. دراین مطالعه، مدل تلفات ساختمان در تمام فصول سال یکسان فرض شده است. محاسبات بر اساس یک الگوی ساختمانی با مساحت ۷۵ متر مربع، سطح دیواره‌ها ۱۲۵ متر مربع، سطح پنجره‌ها ۱۰ متر مربع، سطح کف و سقف ۷۵ متر مربع انجام شده است. هزینه دیواره‌های عایق دار ۱/۳ برابر و هزینه عایقکاری دیواره‌های ساخته شده ۴۰ درصد هزینه دیوار معمولی در نظر گرفته شده است. هزینه ساخت پنجره دوجداره ۱/۵ برابر و هزینه دوجداره کردن پنجره‌های تک جداره ۵۰ درصد هزینه پنجره تک جداره منظور شده است. هزینه کف و سقف عایق دار ۱/۵ برابر و هزینه عایقکاری کف و سقف ساخته شده ۱/۴ برابر هزینه نوع بدون عایق منظور شده است.

سرمایه‌گذاری پوسته بر واحد ظرفیت انرژی بر حسب واحد پولی بر تن معادل نفت خام در سال از رابطه $C/Q.A*8760*93/47*10^{-15}$ محاسبه می‌شود که در آن C هزینه تمام شده بر حسب واحد پولی، Q بار حرارتی پوسته بر حسب کیلوکالری بر ساعت و A سهم انتقال حرارت برای پوسته بر حسب درصد است.

۵. برآورد تقاضای انرژی مفید و خدمات انرژی بخش ساختمان

در این بخش متغیرهای برونزای تقاضای بارگرمایش، بار سرمایشی و خدمات وسایل خانگی برآورد می‌شود. برای تأمین شرایط آسایش برای هر نفر دقیقه‌ای ۲۵ فوت مکعب هوای تازه با رطوبت ۵۰ درصد و دمای ۲۶ درجه سانتی گراد در تابستان و ۱۸ درجه سانتی گراد در زمستان نیاز است [۸ و ۱۱]. بار مورد نیاز برای تأمین این شرایط آسایش از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$Q_{heating} = ۱/۰۸fm(T_{out} - T_{in})\frac{P}{P_A} \qquad (۳)$$

که در آن T_{out} دمای هوای بیرون و T_{in} دمای آسایش داخل اتاق بر حسب فارنهایت، P_0 فشار بارومتری محل و P_A فشار استاندارد بر حسب بار است. تقاضای متوسط آب گرم برای یک نفر در روز بر اساس الگوی مصرفی استاندارد ASHRAE[1] روزانه ۷۵ لیتر است. بر آورد بارگرمایشی آب گرم مطابق رابطه (۴) است:

$$Q_{hotwater} = ۸/۳۳gph(T_{win} - T_{wout}) \qquad (۴)$$

که در آن T_{win} دمای آب مورد نیاز در ساختمان و T_{wout} دمای آب دریافتی ساختمان بر حسب فارنهایت و gph میزان آب گرم مورد نیاز بر حسب گالن در ساعت است. بارگرمایشی ناشی از گرمایش و آب گرم با توجه به جمعیت موجود در نواحی مختلف [۶] و شرایط آب و هوایی محاسبه شده است.

برای برآورد تقاضای خدمات تجهیزات انرژی بر طی سال‌های برنامه، رابطه (۵) پیشنهاد

---

۱. American Society of Heating Refrigerating and Air - Conditioning Engineers

می‌شود:

$$D = \sum_{i=A}^{LastGrade} No_i.ECapa_i.AUF_i.\eta_{relativei}.(1+IR)^n \quad (۵)$$

که در آن No تعداد تجهیزات انرژی بر مورد استفاده در سال پایه، ECapa ظرفیت مصرف انرژی تجهیزات بر حسب واحد انرژی در سال، AUF ضریب کارکرد سالیانه بر حسب درصد، $\eta_{relative}$ بازده نسبی تجهیزات نسبت به بهترین رتبه آن تجهیزات در استاندارد بر چسب مصرف انرژی بر حسب درصد، IR نرخ افزایش سالیانه تعداد تجهیزات بر حسب درصد، سال مورد بررسی به سال پایه، i=A,B, ..., LastGrad رتبه برچسب مصرف انرژی تجهیزات و D تقاضای کل خدمات تجهیزات انرژی‌بر در سال n ام بر حسب واحد انرژی است. جمع بندی نتایج برآورد تقاضا در جدول ۲ آمده است. با توجه به تعریف واقعی بازده برای انرژی و روشنایی در رابطه (۱) این تعریف به جای بازده نسبی استفاده شده است. بدین ترتیب، تقاضای انرژی روشنایی برآورد شده علاه بر تأمین نیازهای مدلسازی، خود دارای مفهوم فیزیکی است.

جدول ۲. برآورد تقاضای مفید و خدمات انرژی بخش ساختمان کشور ($Joule^{15}$ ۱۰)

سال	گرمایش	آب گرم	سرمایش	روشنایی	خدمات یخچال / فریزیر	خدمات ماشین لباسشویی
۱۳۸۸	۵۲۷/۷	۲۵۷/۸	۳۵۶/۲	۰/۰۰۳۹	۰/۰۱۳	۰/۰۱۰
۱۳۹۳	۵۷۴/۳	۲۸۰/۲	۳۸۲/۷	۰/۰۰۵۸	۰/۰۱۳۷	۰/۰۱۱۴
۱۳۹۸	۶۱۷/۷	۲۹۹/۴	۴۰۸/۷	۰/۰۰۸۳	۰/۰۱۴۴	۰/۰۱۳
۱۴۰۳	۶۵۹/۳	۳۲۲/۳	۴۴۱/۸	۰/۰۱۱۵	۰/۰۱۵۴	۰/۰۱۶
۱۴۱۳	۷۹۲/۳	۴۲۷/۹	۵۸۲/۳	۰/۰۱۵۵	۰/۰۱۷۲	۰/۰۲۱۵

۶. نتایج بخش ساختمان در برنامه بهینه

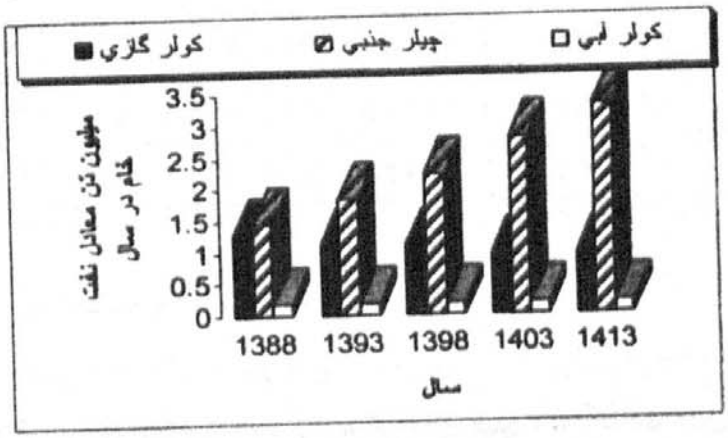
جریان انرژی[۱] بخش ساختمان کشور پس از تدوین شبکه انرژی مرجع، تعیین مشخصات فنی و اقتصادی و برآورد تقاضای برونزا در بخش‌های قبلی، به کمک مدل بهینه سازی جریان

---

۱. Energy Flow Optimization Model

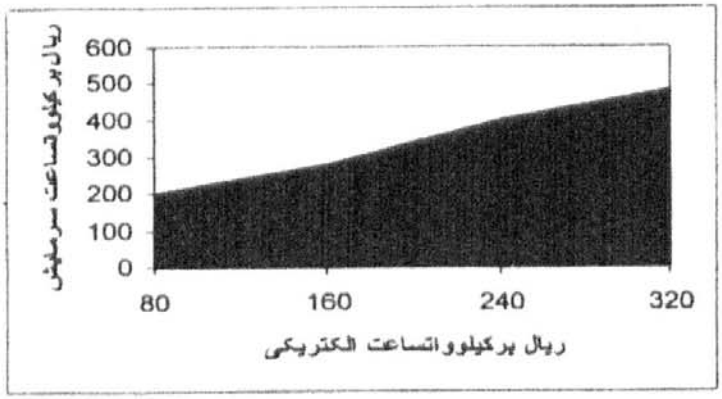
انرژی بهینه یابی شده است. در تعریف مسئله بهینه یابی کلیه محدودیت‌های فنی و اجتماعی فناوری‌های و حامل‌های انرژی که اولویت‌های اقتصادی را محدود می‌سازد، درج شده است. در ادامه مقاله برنامه پیشنهادی تأثیرات آن بررسی می‌شود.

برنامه بهینه به استفاده از سیستم مرکزی گازی برای تأمین گرمایش ساختمان‌های نواحی گازرسانی شده توصیه می‌کند. دلیل عمده استفاده از این نوع سیستم، تقارن آن با سیستم سرمایشی جذبی است که مطابق شکل ۲ به صورت گسترده در بخش سرمایش انتخاب شده است. در صورت عدم استفاده از سیستم گرمایش مرکزی، به کارگیری بخاری گازی و آبگرمکن دیواری برای تأمین گرمایش و آب گرم انتخاب شده است. برای نواحی گازرسانی شده بهترین گزینه برای گرمایش استفاده از سیستم مرکزی گازوییلی است. نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که اگر هزینه انتقال گاز به نواحی گازرسانی نشده باعث سه برابر شدن هزینه تمام شده گاز طبیعی شود، باز هم در نواحی گازرسانی نشده اولویت مصرف با گاز است. به عنوان یکی از مهم‌ترین نتایج برنامه جایگزینی فرآورده‌های نفتی و گاز طبیعی به وسیله برق هیچ گونه توجیه اقتصادی ندارد.

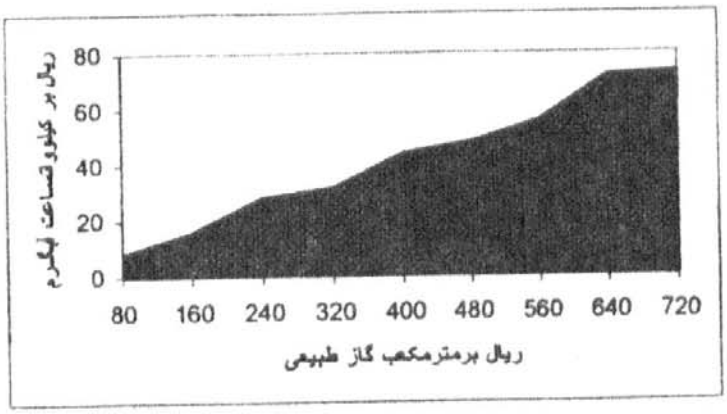


شکل ۲. الگوی پیشنهادی برنامه برای تأمین سرمایش

در شکل ۳ ناحیه اقتصادی تأمین سرمایش از سیستم تولید همزمان برق، حرارت و برودت به ازاء قیمت‌های مختلف برق نشان داده شده است. در این تحلیل حساسیت قیمت گاز طبیعی ۴۸۰ریال بر متر مکعب در نظر گرفته شده که محافظ کارانه است. همانگونه که مشاهده می‌شود، برای هزینه تمام شده برق در کشور؛ یعنی ۲۰۰ ریال بر کیلوات ساعت، نقطه سربه‌سر اقتصادی تولید همزمان برودت برابر ۳۲۰ ریال بر کیلوات ساعت سرمایشی است که در مقایسه با سایر روش‌های تأمین سرمایش اقتصادی است. اگر قیمت فعلی فروش برق به بخش خانگی ؛ یعنی ۱۰۰ ریال بر کیلووات ساعت در نظر گرفته شود، نقطه سربه سر اقتصادی تولید همزمان برودت برابر ۲۰۰ ریال بر کیلووات ساعت سرمایشی است. بدیهی است که این قیمت‌گذاری رفتار مصرف کنندگان را مغایر با منافع ملی کشور تنظیم می‌کند. ناحیه اقتصادی آب گرم سیستم تولید همزمان برق و حرارت در برابر قیمت گاز در شکل ۴ نشان داده شده است. نقطه سر به سر اقتصادی به ازاء قیمت فعلی فروش گاز به بخش خانگی، یعنی ۸۰ ریال بر متر مکعب و ۸ ریال بر کیلووات ساعت حرارتی است. از دیدگاه ملی، که هزینه تمام شده گاز حدود ۲۰۰ ریال بر متر مکعب فرض می‌شود، نقطه سربه سر اقتصادی برای آب گرم سیستم تولید همزمان برق و حرارت برابر ۱۷/۲ ریال بر کیلووات ساعت حرارتی است. شایان ذکر است که هزینه تمام شده حرارت این سیستم‌ها کمتر از ۹/۶ ریال بر کیلووات ساعت حرارتی برآورد می‌شود.

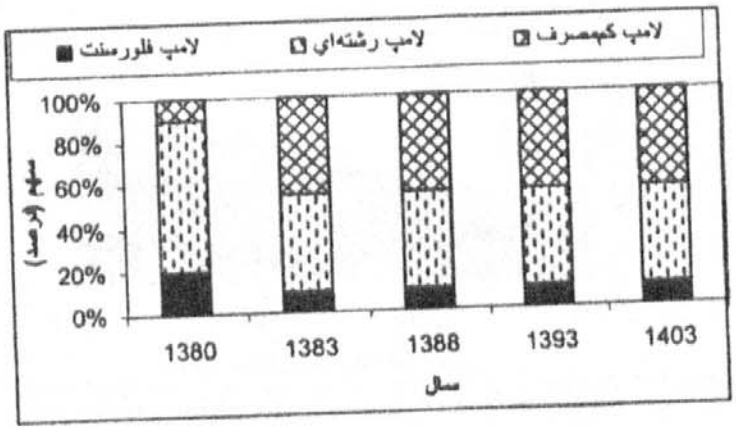


شکل ۳. ناحیه اقتصادی سرمایش سیستم همزمان



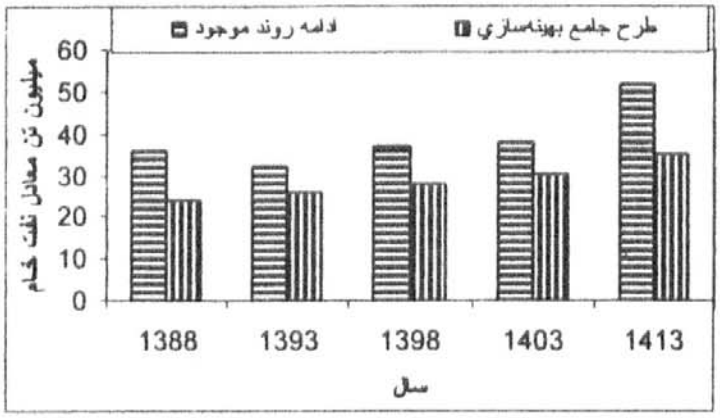
شکل ۴. ناحیه اقتصادی گرمایش سیستم تولید همزمان

مطابق نتایج شکل ۵ تأمین روشنایی ساختمان، لامپ کم مصرف انتخاب شده است. اگر برای استفاده از لامپ کم مصرف محدودیتی در نظر گرفته شود، استفاده از لامپ فلورسنت توصیه می‌شود. بدیهی است که در بعضی از کاربردها استفاده از لامپ‌ها رشته‌ای گریزناپذیر است. تحلیل حساسیت نتایج نشان می‌دهد که حتی با کاهش هزینه برق به یک سوم، همچنان استفاده از لامپ کم مصرف در اولویت قرار دارد.

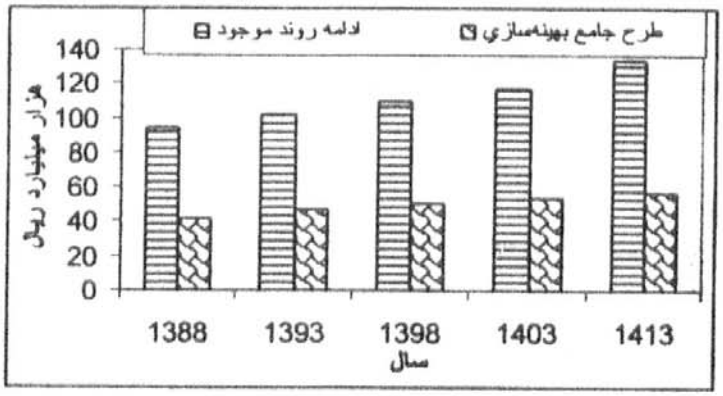


شکل ۵. سهم انواع لامپ در تأمین روشنایی ساختمان

نتایج کاهش مصرف انرژی در اثر اجرای برنامه بهینه در شکل ٦ آمده است. قسمت اعظم این کاهش به عایقکاری پوسته ساختمان‌ها مربوط است که باعث کاهش تلفات در حد ۵۰ درصد می‌شود. در شکل ۷ به مقایسه هزینه‌های شکل ٦ پرداخته شده است. اختلاف زیاد هزینه مصرف انرژی بخش ساختمان در دو سناریو علاوه بر آنکه حاصل کاهش مصرف انرژی است، متأثر از جایگزینی سوخت گاز طبیعی و چیلرهای جذبی به جای برق و چیلرهای تراکمی در مصارف سرمایشی و پایین بودن هزینه گاز طبیعی نسبت به برق است.



شکل ۶. مصرف انرژی سیستم گرمایشی و سرمایشی

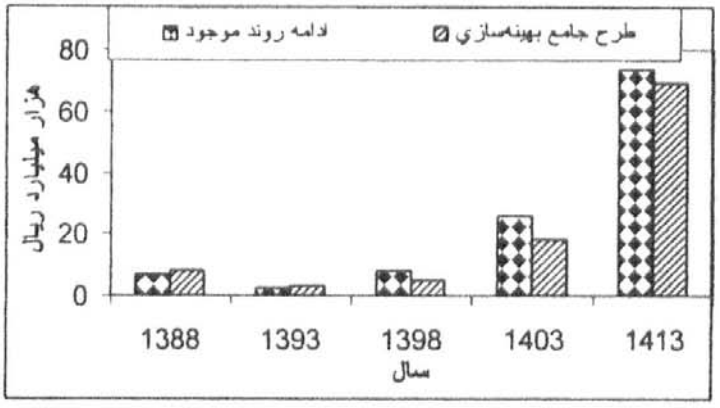


شکل ۷. هزینه‌های مصرف سوخت در دو سناریو

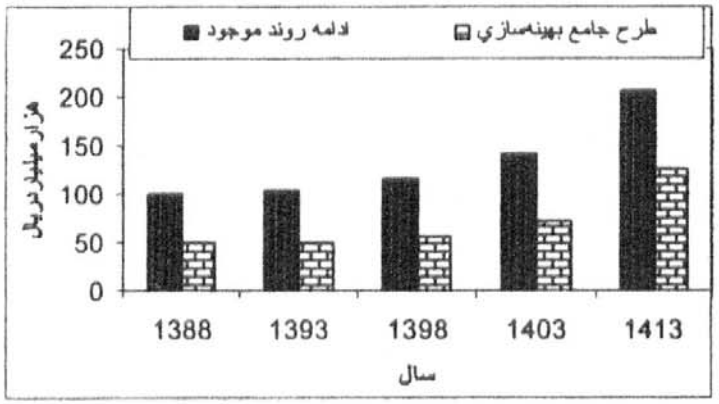
در شکل ۸ کاهش سرمایه‌گذاری مورد نیاز برای توسعه تجهیزات انرژی‌بر در برنامه بهینه نشان داده شده است. عایقکاری پوسته ساختمان نیمی از تلفات حرارتی را کاهش می‌دهد که سبب کاهش تقاضای گرمایش و سرمایش از ۴۰ میلیون تن معادل نفت خام در سال به ۲۰ میلیون تن معادل نفت خام در سال می‌شود. این امر کاهش ظرفیت تجهیزات سرمایشی و گرمایشی و هزینه‌های سرمایه‌گذاری را در پی خواهد داشت. این نتیجه به صوت یک مطالعه موردی در بخش ۷ بررسی شده است. در دو دوره اول مطالعه، سرمایه‌گذاری در برنامه بهینه بالاتر از ادامه روند فعلی است. دلیل این موضوع نیاز جذب گسترده سرمایه برای اصلاح سیستم غیر بهینه در سال‌های اول برنامه است. مطابق شکل ۹ حتی در دو دوره اول مجموع هزینه‌ها کاهش می‌یابد. مطابق نتایج جدول ۳ با قیمت‌های فعلی فروش انرژی استفاده از پایین‌ترین رتبه‌های کولر آبی در مناطق خشک کشور برای مصرف کنندگان مقرون به صرفه خواهد بود. در حالی که اگر انرژی بر اساس هزینه‌های تحمیل شده بر اقتصاد ملی قیمت گذاری شود، تنها استفاده از کولر آبی با رتبه A انتخاب خواهد شد.

جدول ۳. تأثیر قیمت‌گذاری انرژی بر رفتار مصرف‌کنندگان در انتخاب تجهیزات سرمایشی

قیمت گاز (m۳/ریال)	قیمت برق (kWh/ریال)	کولرآبی(رتبه‌انتخاب شده)	کولرگازی	چیلر جذبی
۸۰	۸۰	رتبه A تا E		----
	۱۶۰	رتبه A تا C		
	۳۲۰	رتبه A		
۲۴۰	۸۰	رتبه A تا E		----
	۱۶۰	رتبه A تا C		
	۳۲۰	رتبه A		
۴۰۰	۸۰	رتبه A تا E		----
	۱۶۰	رتبه A تا C		
	۳۲۰	رتبه A		



شکل ۸. هزینه‌های سرمایه‌گذاری در دو سناریو



شکل ۹. مقایسه هزینه‌های کل در دو سناریو

۷. مطالعه موردی بررسی نتایج برنامه بهینه

یکی از نتایج مهم طرح جامعه بهینه سازی مصرف انرژی در بخش ساختمان، کاهش همزمان هزینه‌های سرمایه گذاری و مصرف انرژی در این بخش است. برای بررسی موردی این

موضوع مطالعه‌ای درباره برج ۲۳ طبقه مسکونی یاس سفید با مساحت کل زیربنای ۱۱۵۴۰متر مربع به کمک نرم‌افزار کریر [1] صورت گرفته است[۴]. ظرفیت‌های گرمایشی و سرمایشی این ساختمان در طراحی با دیواره معمولی و پنجره تک جداره و طراحی با دیواره عایقکاری شده و پنجره دوجداره و هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای تجهیزات و پوسته در دو طراحی مطابق جدول ۴ است. این بررسی نشان می‌دهد که استفاده از پنجره دوجداره و عایقکاری دیواره باعث ۱۰ درصد کاهش سرمایه‌گذاری علاوه بر صرفه جویی در مصرف انرژی خواهد شد.

جدول ۴. هزینه‌های سرمایه‌گذاری ساختمان مسکونی یاس سفید

اجزاء ساختمانی	ظرفیت‌های طراحی		هزینه سرمایه گذاری (میلیون ریال)		
	معمولی	بهینه	معمولی	بهینه	تفاوت
دیوارها	۶۲۱۵ متر مربع		۳۴۸	۴۱۰	-۶۲
پنجره‌ها	۲۴۸۰ متر مربع		۲۴۸	۲۹۶	-۴۸
چیلر	۴۴۵/۷ تن تبرید	۳۸۰/۶ تن تبرید	۳۵۶۶	۳۰۴۴	+۵۲۲
بویلر	MBtu/h ۳/۳۵	MBtu/h ۳/۳۴	۱۵۰	۱۱۰	+۴۰
جمع کل			۴۳۱۲	۳۸۶۰	+۴۵۳

۸. برنامه بهینه بخش صنعت

شبکه مرجع بخش صنعت کشور در شکل ۲(ب) به کمک مدل بهینه سازی جریان انرژی بهینه‌یابی شده است. مقادیر برآورد تقاضا و پارامترهای فنی و اقتصادی استفاده شده در مدل به تفصیل در مرجع [۷] آمده است. بر اساس نتایج برنامه، در تأمین بهینه بخار واحدهای صنعتی، استفاده از اکونومایزر، تله‌های بخار، تنظیم کننده سوخت به هوا، پیش گرمکن هوا و بازیافت آب گرم اتلافی به نفع اقتصاد ملی و اقتصاد بنگاه است. هزینه‌های فرصت انرژی برای تحلیل ملی و قیمت‌های جاری فروش انرژی برای تحلیل بنگاه منظور شده است. استفاده از

---

۱. CARRIER

تولید همزمان برق و بخار در فرایندهای صنعتی از توصیه‌های مهم برنامه است. اجرای این اقدامات به کاهش ۱۱/۸ درصدی مصرف سوخت بخش صنعت منتج می‌شود.

در مدلسازی نیرو محرکه، الکتورموتورها به سه طبقه کمتر از ۳۰ کیلووات، بین ۳۰ تا ۲۰۰ کیلووات و بیش از ۲۰۰ کیلووات تقسیم شده است. امکان انتخاب الکتروموتورهای با راندامان بالا و موتورهای اساندارد در هر طبقه و همچنین، استفاده از درایورهای کنترل دور - توان[۱] و تنظیم کننده‌های ولتاژ - جریان[۲] الکترو موتورها لحاظ شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که جایگزینی موتورهای با راندمان بالا به جای موتورهای اساندارد و استفاده از درایوهای کنترل در کاربردهایی که الگوی بار تغییرات بسیاری دارد، هم از دید اقتصاد ملی و هم از دید اقتصاد بنگاه مقرون به صرفه است، به گونه‌ای که حتی با ۳ برابر شدن هزینه سرمایه گذاری، اولویت ملی آن همچنان حفظ می‌شود. در نتیجه اجرای برنامه بهینه متوسط مجموع هزینه‌های انرژی و سرمایه گذاری حدود ۱۰ درصد نسبت به ادامه روند موجود کاهش می‌یابد.

در بخش تأمین هوای فشرده ابتدا با توجه به محدوده ظرفیت کمپرسورهای موجود در صنایع، کمپرسورها در سه طبقه با ظرفیت‌های ۲۵۰ - ۲۵ لیتر بر ثانیه، ۱۰۰۰ - ۲۵۰ لیتر بر ثانیه و بیشتر از ۱۰۰۰ لیتر بر ثانیه تقسیم بندی و سپس در هر طبقه با توجه به شرایط عملکرد کمپرسورها، سه نوع کمپرسور رفت و برگشتی، مارپیچی گردشی و سانترفیوژ در نظر گرفته شده است. همچنین، حذف نشتی در شبکه توزیع هوای فشرده و استفاده از کنترل کننده موتور الکتریکی کمپرسورها مدل شده است. نتایج بهینه سازی نشان می‌دهد که استفاده از کمپرسورهای رفت و برگشتی برای دبی‌های کمتر از ۱۰۰۰ لیتر بر ثانیه کاملاً اقتصادی است، به گونه‌ای که حتی با ۱/۵ برابر شدن قیمت آنها همچنان این نتیجه برقرار است. استفاده از کمپرسورهای سانتریفوژ برای دبی‌های بیش از ۱۰۰۰ لیتر بر ثانیه کاملاً اقتصادی است، به گونه‌ای که حتی با ۲ برابر شدن قیمت فعلی آنها، همچنان استفاده از آنها اقتصادی است. همچنین، استفاده از کنترل کننده کمپرسورها و سرمایه گذاری برای حذف نشتی در سیستم

---

۱. Variable Speed Drive

۲. Voltage - Current Control

توزیع هوای فشرده از هر دو دیدگاه ملی بنگاه کاملاً مقرون به صرفه است، به‌گونه‌ای که حتی با ۴ برابر شدن هزینه این روش‌ها، همچنان استفاده از آنها از دید اقتصاد ملی مقرون به صرفه است. اجرای این اقدامات به طور متوسط ۳۰ درصد از هزینه‌های بخش برق می‌کاهد.

برای تأمین سرمایش بخش صنعت در انتخاب چیلرهای تراکمی و چیلرهای جذبی مدلسازی شده است. باتوجه به ظرفیت‌های تقاضای سرمایش و هزینه سرمایه‌گذاری این ظرفیت‌ها، چیلرهای تراکمی و جذبی به سه طبقه ۳۰ - ۱۰ تن تبرید، ۱۰۰ - ۳۰ تن تبرید و بیشتر از ۱۰۰ تن تبرید تقسیم شده‌اند. انرژی مصرفی چیلرهای جذبی به سه صورت گاز طبیعی، بخار و آب گرم قابل تأمین است. نتایج بهینه سازی مدل نشان می‌دهد که چیلرهای جذبی به خصوص از نوع گاز سوز شعله مستقیم دارای بالاترین اولویت اقتصادی است.

با اجرای برنامه پیشنهادی بهینه سازی تأمین سرمایش، تولید نیروی محرکه، تأمین بخار و هوای فشرده، سالیانه ۱۱/۸ درصد از هزینه‌های مصرف انرژی بخش صنعت کاسته می‌شود. این اقدامات به کاهش انتشار ۱۹۸ میلیون تن CO_2، ۳۷۰ هزار تن NOx و یک میلیون تن SO_2 از آلاینده‌های زیست محیطی منتج خواهد شد.

۹. نتیجه‌گیری

در این مطالعه مصارف مفید و خدمات انرژی بخش ساختمان و صنعت کشور به صورت شبکه یکپارچه انرژی مدلسازی و با ملاحظه محدودیت‌های فنی و اجتماعی بهینه یابی اقتصادی شده است. نتایج این مطالعه می‌تواند به عنوان مرجع سیاستگذاری، برنامه ریزی و تدوین قوانین و مقررات کارای انرژی در کشور مورد استفاده قرار گیرد. مهم‌ترین گزینه‌ها و نتایج به دست آمده را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

تامین سرمایش ساختمان‌ها با استفاده از سیستم‌های تبرید جذبی گاز سوز دارای اولویت اول است. برای مناطق گازرسانی نشده، کولر آبی با رتبه A و B در اقلیم خشک و کولر گازی در اقلیم مرطوب مناسب است. استفاده از سیستم گازسوز بهترین انتخاب برای گرمایش است. استفاده از گرمایش مرکزی گازی به دلیل تقارن با چیلر جذبی گاز سوز انتخاب برتر است. استفاده از بخاری گازسوز و آبگرمکن دیواری در اولویت بعدی قرار دارد. در هیچ حالتی جایگزینی برق به جای سایر حامل‌های انرژی پیشنهاد نمی‌شود. حتی با سه برابر شدن هزینه

تمام شده تولید و انتقال گاز طبیعی در کشور، باز هم سیستم‌های گاز سوز انتخاب می‌شود.

بدین ترتیب، گازرسانی به تمام نقاط کشور از ضرورت‌های اجتناب‌ناپذیر است. عایقکاری پوسته و دوجداره کردن پنجره‌های ساختمان‌های موجود و در حال ساخت حتی با دو برابر شدن هزینه آن، در اولویت قرار دارد. رعایت بالاترین رتبه استاندارد برچسب مصرف انرژی در استفاده از تجهیزات انرژی بر و به کارگیری لامپ‌های کم مصرف و فلورسنت برای روشنایی ساختمان‌ها دارای اولویت اقتصادی است. استفاده از میکروتوربین برای توسعه تولید پراکنده تنها در قیمت‌های برق فراتر از ۳۶۰ ریال بر کیلووات ساعت توجیه‌پذیر خواهد بود. کاهش ۵۴ درصدی مصرف سوخت و کاهش ۱۵ درصدی هزینه‌های سرمایه‌گذاری به دلیل کاهش ظرفیت نصب تجهیزات گرمایشی و سرمایشی از مهم‌ترین نتایج کلان برنامه بهینه در کشور است.

استفاده از اکونومایزر، تله‌های بخار، تنظیم کننده سوخت به هوا، پیش گرمکن هوا، بازیافت آب گرم اتلافی و تولید همزمان برق و بخار در فرایندهای صنعتی از توصیه‌های مهم برنامه برای تأمین بخار واحدهای صنعتی است. جایگزینی موتورهای با راندمان بالا به جای موتورهای استاندارد و استفاده از درایوهای کنترل در کاربردهایی که الگوی بار تغییرات بسیاری دارد، حتی با ۳ برابر شدن هزینه سرمایه‌گذاری همچنان اقتصادی است. استفاده از کمپرسورهای سانتریفوژ برای دبی‌های بیش از ۱۰۰۰ لیتر بر ثانیه و همچنین، به کارگیری چیلرهای جذبی به خصوص از نوع گاز سوز شعله مستقیم دارای بالاترین اولویت اقتصادی است. با اجرای برنامه پیشنهادی بهینه سازی تأمین سرمایش، نیروی محرکه، بخار و هوای فشرده در بخش صنعت کشور، ۱۱/۸ درصد در مصرف سوخت این بخش اقتصادی مهم صرفه جویی خواهد شد.

مراجع

1. [ASHRAE] ASHRAE HANDBOOK; 1995 Systems, 1993 Application, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc.

۲. [آبگرمکن برق] معیارها و مشخصات فنی مصرف انرژی و بر چسب انرژی آبگرمکن‌های

مخزن دار برق خانگی، استاندارد ملی ایران ۲-۱۵۶۳ مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، چاپ اول، شهریور ۱۳۸۳.
۳. [بخاری برقی] معیارها و مشخصات فنی مصرف انرژی و بر چسب انرژی بخاری‌های برقی خانگی و مشابه، استاندارد ملی ایران ۲- ۷۳۴۲، مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، چاپ اول، شهریور ۱۳۸۳.
۴. [برج سفید] بررسی نتایج مدل سازی انرژی در بخش ساختمان و مقایسه آن در برج مسکونی یاس سفید به کمک نرم‌افزار Carrier، دفتر بهینه سازی مصرف انرژی، گروه استاندارد و ساختمان، ۱۳۸۳.
۵. [ترازنامه] ترازنامه انرژی سال ۱۳۸۲، دفتر برنامه ریزی انرژی وزارت نیرو، ۱۳۸۳.
۶. [سالنامه آماری] سالنامه آماری کشور، مرکز آمار ایران، ۱۳۸۱.
۷. [صنعت] بهینه سازی مصرف انرژی در بخش صنعت کشور، زیر بخش‌های تولید سرمایش، نیرو محرکه، تأمین بخار و هوای فشرده، دفتر بهینه سازی مصرف انرژی وزارت نیرو، گزارش شماره ۲-۱۰۳-۱-۷/د=E، ۱۳۸۲.
۸. سید مجتبی طباطبایی، محاسبات تأسیسات ساختمانی، انتشارات روزبهان، چاپ نهم، ۱۳۸۲.
۹. لامپ معیارها و مشخصات فنی مصرف انرژی و بر چسب انرژی لامپ‌های الکترونیکی، استاندارد ملی ایران ۷۳۴۱، مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، چاپ اول، شهریور۱۳۸۳.
۱۰. لباسشویی معیارها و مشخصات فنی مصرف انرژی و بر چسب انرژی ماشین‌های لباسشویی برقی، استاندارد ملی ۲-۳۴۷۷، موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، چاپ اول شهریور ۱۳۸۳.
۱۱. ملک زاده، غلامرضا و محمد حسین کاشانی حصار، راهنمای طراحی سیستم تهویه مطبوع، انتشارات استاد، ۱۳۷۳.
۱۲. [یخچال] روش اندازه گیری مصرف انرژی و دستورالعمل بر چسب انرژی یخچال، فریزر و یخچال فریزرهای خانگی، استاندارد ملی ایران، موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، چاپ اول، ۱۳۸۴.