

تحلیل ریاضی سیاستگزاری بازیافت در نیروگاههای انرژی الکتریکی بر اساس کمینه سازی هزینه های اجتماعی و زیست محیطی

مرتضی محمدی اردهالی

گروه قدرت و مدیریت انرژی الکتریکی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیر کبیر (پلی تکنیک تهران)
امیر ادهم

کارشناسی ارشد مهندسی سیستمهای انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

واژه های کلیدی: بازیافت انرژی، نیروگاه، تحلیل ریاضی، هزینه های زیست محیطی، کمینه سازی

چکیده

ریاضی بازیافت توسعه یافته است. روابط بدست آمده ضمن تعیین نرخ بهینه بازیافت انرژی، سیاستگزاریهای مطلوب جهت دستیابی به این نرخ بهینه را بیان می کند. ابتدا با تحلیل جریان انرژی و با هدف کمینه سازی هزینه های اجتماعی و زیست محیطی نیروگاه، نرخ بهینه بازیافت انرژی بدست آمده و سپس با استفاده از نتایج مدل مذکور، سیاستگزاریهای قیمتی و غیر قیمتی به منظور افزایش بازیافت انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این مطالعه نشان می دهند که نرخ بهینه بازیافت تابعی از کل انرژی مصرفی، کل انرژی اتلافی، انرژی اتلافی غیر بازیافتی، انرژی بازیافت شده و نهایتاً میزان سرمایه گذاری در بازیافت نیروگاه دارد.

کامیابی و موفقیت جوامع در دستیابی به اهداف توسعه پایدار در گرو دسترسی به منابع انرژی ارزان، فراوان و پایداری است که پاسخگوی نیازهای حال و آینده باشد. در این راستا یکی از وظایف دولتها، سیاستگزاری بهینه در بخش انرژی بر اساس اقتصاد انرژی است که با در نظر گرفتن شرایط اجتماعی، متغیرهای اقتصادی و عوامل فنی شکل می گیرد. این در حالیست که توسعه مدل تحلیلی و حل همزمان معادلات فنی- اقتصادی در کنار ملاحظات اجتماعی امکان کیفی سازی سیاستها و تدوین استراتژیهای بهتر را فراهم می نماید. از آنجا که کارایی، کیفیت و عدم آلاینده گی، انرژی الکتریکی را بعنوان مطلوبترین حامل انرژی در بخش مصرف مطرح می سازد، سیاستهایی نظیر افزایش راندمان و بازیافت برای انرژی در بخش مصرف ضرورت ندارد و تنها در بخش تولید و نیروگاه اهمیت میابد. در این مطالعه با در نظر گرفتن مفاهیم اجتماعی، اهداف اقتصادی و محدودیتهای فنی مدل

علائم و اختصارات

E کل انرژی مصرفی نیروگاه در دوره زمانی مفروض
(Total energy consumed)

نرخ می‌شابه رشد خواهد کرد [1]. بخش عمده‌ای از پدیده تغییرات آب و هوایی مانند گرم شدن کره زمین در اثر گازهای گلخانه‌ای و بارش بارانهای اسیدی در ارتباط با صدور کربن و آلایندگی‌های وابسته به مصرف منابع هیدروکربنی می‌باشند. از سوی دیگر به دلیل طبیعت محدود منابع هیدروکربنی و روند صعودی مصرف، قیمت انرژیهای فسیلی رو به افزایش گذاشته است. با بروز مشکلات زیست محیطی ناشی از مصرف سوختهای فسیلی و افزایش قیمت آنها جوامع بشری در راه دستیابی به توسعه پایدار با چالش جدی مواجه شده‌اند. به نظر می‌رسد راه حل بخش قابل ملاحظه‌ای از این مشکلات در انرژی و راههای بکارگیری آن نهفته باشد. بنابراین در نبود منبع نامحدود انرژی که بتواند با بازدهی بالا جوابگوی نیازهای انرژی جوامع باشد، نیاز به استراتژیهای مدیریتی که تولید انرژی کافی از منابع فسیلی، تجدیدپذیر و بازیافتی را تأمین کند، محسوس است. سیاستگذاری صحیح در بخش انرژی علاوه بر کاهش پتانسیل تخریب محیط زیست، موجب افزایش بهره مندی از منابع می‌شود. در مدیریت انرژی، تجدیدپذیری منابع مفهومی کلیدی است، چراکه تأمین درصد کمی از نیازهای انرژی جوامع از منابع غیر فسیلی و تجدیدپذیر، پایداری منابع پایان‌پذیر را در پی داشته و مواجهه با بحران انرژی را به تأخیر می‌اندازد. در حال حاضر عدم توانایی تکنولوژیهای موجود در بکارگیری پربازده انرژیهای نو و حتی انرژیهای فسیلی برای تأمین نیازهای انرژی جوامع محسوس است. اما در کنار سیاستهایی نظیر افزایش راندمان، بازیافت انرژیهای اتلافی به عنوان یکی از منابع غیر معمول تأمین انرژی مورد توجه قرار گرفته است. فرایندهای بازیافت با بازگرداندن انرژی به چرخه‌های صنعتی و اجتماعی، علاوه بر جلوگیری از اتلاف آنها به محیط زیست، تقاضای سوختهای فسیلی را نیز کاهش می‌دهد. در کنار اهداف زیست محیطی، منافع اقتصادی قابل ملاحظه‌ای در بازیافت انرژی وجود دارد که بدیهی‌ترین آنها سود اقتصادی ناشی از کاهش هزینه‌های انرژی برای مصرف کنندگان و دولتها می‌باشد. خصوصاً در مورد کشورهایی که جزء صادر کنندگان انرژی به حساب می‌-

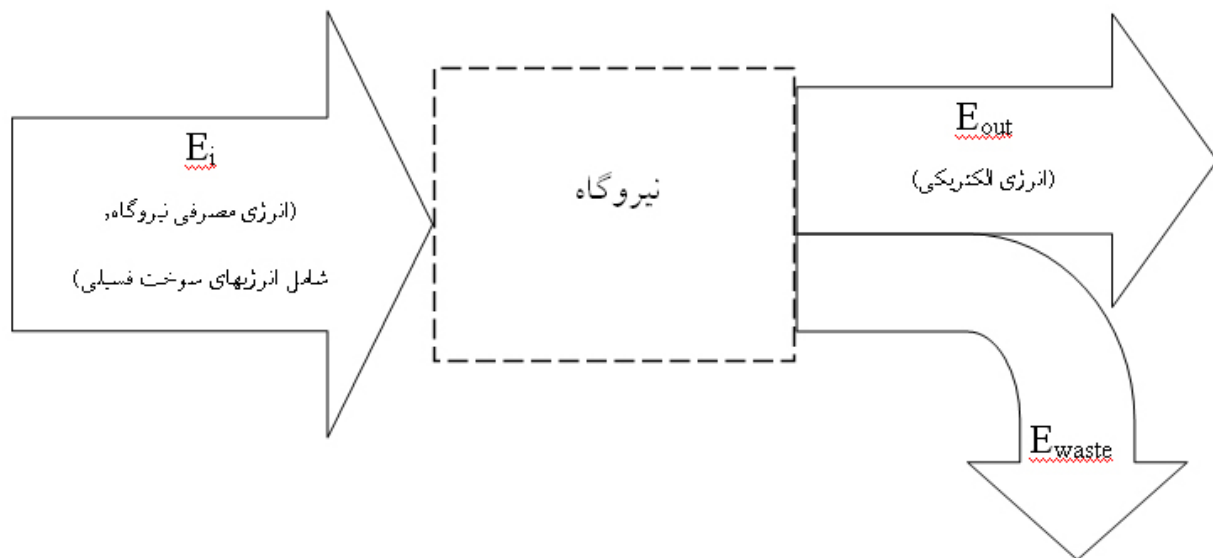
F	انرژی سوخت فسیلی ورودی به نیروگاه در دوره زمانی مفروض (Fossil fuel energy)
R	انرژی بازیافت شده در نیروگاه در دوره زمانی مفروض (Recycled energy)
T	کل انرژی اتلافی نیروگاه در دوره زمانی مفروض (Total waste energy)
TD	کل انرژی اتلافی غیر بازیافتی در نیروگاه در دوره زمانی مفروض (Waste disposed energy)
TR	کل انرژی اتلافی قابل بازیافت نیروگاه در دوره زمانی مفروض (Waste recycled energy)
r	نرخ بازیافت انرژی (Recycling energy ratio)
λ	ضریب لاگرانژ (Lagurangian multiplier)
F'	ضریب حساسیت بازیافت
η	کارایی نیروگاه (Power plant efficiency)
C _s	هزینه اجتماعی تولید انرژی الکتریکی (Social cost of electricity production)
C _p	هزینه اقتصادی تولید انرژی الکتریکی (Economic cost of electricity production)
C _{Env}	هزینه زیست محیطی تولید انرژی الکتریکی (Environ.tal cost of elec. production)
C _R	هزینه اقتصادی بازیافت انرژی (Economic cost of recycling)
C _D	هزینه انرژی اتلافی (Cost of waste disposal)
i	نیروگاه i
out	جریان خروجی
waste	اتلافات

مقدمه

در حال حاضر سوختهای فسیلی منبع اصلی تأمین نیازهای انرژی بشر محسوب می‌شوند. طبق تخمینهای آژانس بین المللی انرژی با فرض ادامه روند مصرف کنونی، تا سال ۲۰۱۰ تقاضای انرژی جهان نسبت به سال ۱۹۹۳ بیش از ۴۶٪ رشد خواهد داشت. در طی همین دوره میزان صدور کربن با

کربن سالیانه به میزان ۱/۴ میلیارد تن در جهان، بزرگترین پتانسیل در کاهش صدور کربن و بازیافت انرژی را دارا می-باشد [1]. بدیهی است با بکارگیری روشها و تکنولوژیهای گوناگون و نیز صرف هزینه های بالایی توان بخش قابل توجهی از انرژی اتلافی را بازیافت نمود. اما واقعاً سطح بهینه بازیافت چه میزان است؟ در این مطالعه با هدف کمینه سازی هزینه های اجتماعی، به نقش بازیافت انرژی در نیروگاه پرداخته خواهد شد و نرخ بهینه آن با توسعه مدل ریاضی بدست خواهد آمد.

آیند، هزینه های فرصت صادرات نیز به آن افزوده می شود. از مهمترین فوائد بکارگیری انرژی الکتریکی بازدهی و کارایی بسیار بالای آن است. به دلیل وجود پتانسیل بالا در بخش تولید انرژی الکتریکی و عدم وجود انگیزه و امکان بازیافت در بخش مصرف، این مسئله در نیروگاه اهمیت خاصی پیدا می کند. آمارها نشان می دهد که در حال حاضر بیش از ۷۵٪ کل سوخت ورودی به بخش نیروگاهی از سوخته های فسیلی تأمین می شود [1]. طبق گزارش آژانس بین المللی انرژی بخش نیروگاهی با ظرفیت کاهش صدور



شکل (۱): شماتیک جریان انرژی در نیروگاه

به توصیف رابطه انرژی، محیط زیست و توسعه پایدار پرداختند. همچنین کاربرد تحلیل انرژی در محاسبه هزینه های زیست محیطی و روش مالیات انرژی توسط Szargut et al. [5,6] بعنوان روشی نوین مطرح شده است. در سال ۲۰۰۳ Oliveira et al. [7] هزینه های اجتماعی تولید انرژی را بصورت مجموع هزینه های زیست محیطی و هزینه های تولید انرژی تعریف نمودند. تحلیل هزینه های زیست محیطی و اجتماعی مصرف سوخته های فسیلی و نیز دسته بندی این هزینه ها توسط Regatschnig et al. [8] انجام شده است. در ادامه توسعه مدل های انرژی و با هدف دستیابی به مدل بهینه انرژیهای تجدیدپذیر Iniyar

پس از اولین بحران انرژی، اهمیت انرژی در اقتصاد برای سیاستگذاران آشکار شد. پس از آن مطالعات گوناگونی برای توصیف روابط میان سیاستگذاری در بخش انرژی و اثرات آن بر اقتصاد انجام شد. برخی از مدل های عمومی کاربردی در مطالعات انرژی توسط Bhattacharyya [2] بررسی و فهرست شده است. همچنین Hogan [3] نیز در سال ۲۰۰۲ چارچوب روش شناختی در مدلسازیهای انرژی برای مطالعات سیاستگذاری را ارائه نمود. در سالهای اخیر موضوعات زیست محیطی اهمیت ویژه ای پیدا کرده است و نتیجتاً مدل های انرژی در حوزه های زیست محیطی نیز وارد شده اند. به دنبال این موضوع، Dincer and Rosen [4]

مدل‌سازی

به منظور دستیابی به اهداف مطالعه، استنتاج منطقی از رفتارهای بشری قید اجتماعی را بدست می‌دهد که چارچوب کلی مدل توسط آن بیان میشود: قابل توجه است که جوامع امروزی نیاز به بیشینه کردن تولید انرژی دارند و بصورت همزمان ضروریست که هزینه‌های اجتماعی، آلودگیهای زیست محیطی و فرسایش منابع طبیعی ناشی از تولید انرژی کمینه شود.

بخش نیروگاهی بصورت بنگاه اقتصادی متشکل از n نیروگاه مولد در داخل یک حجم کنترل بسته در نظر گرفته شده است. جریان ورودی به حجم کنترل شامل انرژیهای سوخت فسیلی میشود و انرژی الکتریکی و اتلافات، جریانهای خروجی از آن را تشکیل می‌دهند (شکل (۱)). به این ترتیب طبق قانون اول ترمودینامیک، قیود فنی بر روی مرزهای ورودی و خروجی این حجم کنترل قابل توسعه است. برای نیروگاه مفروض در شکل (۱) انرژی ورودی به نیروگاه برابر با مجموع انرژی الکتریکی خروجی و اتلافات میباشد:

$$E = E_{out} + E_{Waste}$$

کارایی نیروگاه مذکور با نسبت انرژی الکتریکی خروجی به انرژی ورودی تعریف می‌گردد:

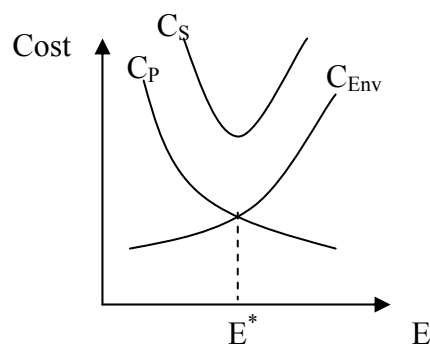
$$\eta = \frac{E_{out}}{E}$$

هزینه تولید انرژی الکتریکی (C_p) تابعی از انرژی مصرفی E است، بدین صورت که با کاهش (E) و با فرض ثابت بودن انرژی الکتریکی خروجی از نیروگاه (E_{out})، نیاز به راندمان (η) بیشتری می‌باشد. بنابراین تکنولوژی بکار گرفته شده برای افزایش راندمان نیروگاه نیز در سطح بالاتری بوده و سرمایه‌گذاری بیشتری را می‌طلبد و این موضوع باعث افزایش هزینه تولید انرژی الکتریکی (C_p) می‌گردد. از سوی دیگر هزینه زیست محیطی (C_{Env}) تابعی از میزان صدور کربن ناشی از تولید انرژی الکتریکی مبتنی بر انرژی سوخت فسیلی مصرفی نیروگاه (E) می‌باشد [7]:

$$C_{Env} = f(E)$$

[9] and Sumanthy ضمن بکارگیری جریان انرژی، تابع هزینه انرژی را کمینه سازی نمودند. مدل اقتصادی بازیافت زباله های جامد، با در نظر گرفتن جریان مواد بوسیله Masui et al. [10] توسعه داده شد. نهایتاً Fratzscher et al. [11] کاربرد اتروپی در تحلیل بازیافت انرژیهای اتلافی را متذکر شدند.

هدف این مطالعه دستیابی به نرخ بهینه بازیافت انرژی در نیروگاه با توسعه مدل ریاضی و بکارگیری مفاهیم اجتماعی، شاخصهای اقتصادی و محدودیتهای فنی است. در بخش بعدی ضمن تحلیل جریان انرژی و با هدف کمینه سازی هزینه‌های اجتماعی و زیست محیطی نیروگاه، معادلات مربوط به سیاستگذاری بهینه بازیافت توسعه یافته و سپس با استفاده از نتایج مدل ریاضی، سیاستگذاریهای غیر قیمتی^۱ به منظور افزایش بازیافت انرژی مورد بررسی قرار میگیرد. بدیهی است نرخ بهینه بدست آمده در جهت تدوین استانداردها و آیین نامه‌های مربوطه برای اعمال سیاستگذاریها قابل بکارگیری خواهد بود. در بخش نهایی به سیاستگذاریهای قیمتی در جهت ایجاد شرایط اقتصادی معقول و مطلوب برای توسعه بازیافت پرداخته شده است.



شکل (۲): شماتیک رفتار توابع هزینه.

^۱ سیاستگذاریهای بازیافت به دو بخش عمده قیمتی و غیر قیمتی تقسیم می‌شوند. تدوین مقررات، آیین نامه‌ها و استانداردها، کمک به افزایش آگاهی و اطلاعات بخشهای مرتبط و اعطای تسهیلات به آن بخشها تحت عنوان سیاستهای غیر قیمتی قرار می‌گیرند. همچنین سیاستگذاریهایی که مستقیماً قیمت سوخت مصرفی را تغییر می‌دهند، مانند حذف سوبسیدها و یا برقراری مالیات بر حسب محتوای کربن سوختها از جمله روشهای قیمتی محسوب می‌گردند.

با ملاحظه اهداف سیاستگذاری جهت نیل به توسعه پایدار و از آنجا که بار انرژی الکتریکی ثابت فرض می‌شود، زیربخش نیروگاهی باید بدون اینکه در تولید انرژی الکتریکی (E_{Out}) تغییر قابل ملاحظه‌ای روی دهد به کاهش F_i کمک نمایند که با استفاده از سه روش قابل دستیابی است:

- کاهش مقدار انرژی مصرفی (E_i)
- افزایش راندمان (η_i)
- افزایش نرخ بازیافت (r_i)

اما E_i با انرژی الکتریکی تولید شده در نیروگاه دارای رابطه مستقیم است و لذا کاهش آن موجب کاهش در تولید انرژی الکتریکی خروجی از نیروگاه خواهد شد. از طرفی راندمان هر نیروگاه نیز جزئی از تکنولوژی بکار رفته در نیروگاه بوده و بدون ایجاد تغییرات بنیادین در تکنولوژیهای بکار رفته، امکان بهبود عمده در راندمان وجود ندارد. بنابراین تنها انتخاب منطقی، انتخاب راه سوم و یا افزایش نرخ بازیافت r_i است.

با بکارگیری اصول ریاضی، کمینه کردن هزینه‌های اجتماعی و زیست محیطی C_S از طریق ارضا نمودن قیود (۱) و (۲) میسر می‌گردد. با قرار دادن معادله (۱) در تابع هزینه C_S و بازنویسی معادلات:

$$C_S = f\left(\sum_{i=1}^n (F_i (1 + R_i / F_i))\right)$$

$$C_S = f\left(\sum_{i=1}^n (F_i (1 + r_i E_i / F_i))\right) \quad (3)$$

تابع بدست آمده جهت بهینه‌سازی باید به همراه محدودیت‌های ذکر شده در معادلات به فرم لاگرانژ بازنویسی شوند:

$$\text{Min}_{F,R} f\left(\sum_{i=1}^n (F_i (1 + r_i E_i / F_i))\right) + (\lambda_1) \times \left[\sum_{i=1}^n (E_i - F_i - R_i)\right] + (\lambda_2) \times \left[T - TD - \sum_{i=1}^n r_i E_i\right] \quad (4)$$

جهت تعیین نرخ بهینه بازیافت و کمیته‌سازی معادله (۴) شاخص حساسیت بازیافت بصورت زیر تعریف میشود:

هزینه اجتماعی برای تولید انرژی الکتریکی (C_S) برابر با مجموع هزینه‌های تولید انرژی الکتریکی (C_P) و هزینه زیست محیطی حاصل از آن (C_{Env}) می‌باشد:

$$C_S = C_P(E) + C_{Env}(E)$$

$$\Rightarrow C_S = f(E)$$

و با فرض n نیروگاه در بخش نیروگاهی:

$$C_S = f\left(\sum_{i=1}^n E_i\right)$$

همچنین با توجه به شکل (۲) و تشریح رفتار هزینه‌های تولید و هزینه‌های زیست محیطی، می‌توان نوشت:

$$\frac{\partial^2 C_S}{\partial E_i^2} \geq 0$$

تابع C_S دارای کمینه بوده و این کمینه که با E^* نشان داده شده است بیانگر نقطه بهینه هزینه‌های اجتماعی تولید انرژی الکتریکی و یا نقطه بهینه بازیافت انرژی می‌باشد. با هدف دستیابی به این نرخ بهینه به ادامه توسعه مدل پرداخته می‌شود. کل انرژی ورودی در نیروگاه برابر با مجموع انرژی فسیلی و بازیافتی است:

$$\sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n (F_i + R_i) \quad (1)$$

با تعریف بازیافت انرژی r_i برای هر نیروگاه معادله (۱) قابل بازنویسی به فرم زیر است:

$$r_i = \frac{R_i}{E_i}$$

$$\sum_{i=1}^n F_i = \sum_{i=1}^n (E_i - R_i) = \sum_{i=1}^n [E_i (1 - r_i)]$$

در صورتیکه بخش قابل بازیافت انرژی اتلافی از طریق بازیافت به نیروگاه بازگشت داده شوند، مطابق شکل (۲) و با استفاده از قانون بقای انرژی می‌توان نوشت:

$$\sum_{i=1}^n TR_i = \sum_{i=1}^n R_i = \sum_{i=1}^n (r_i E_i)$$

$$\sum_{i=1}^n T = \sum_{i=1}^n (TD_i + TR_i) = \sum_{i=1}^n (TD_i + r_i E_i) \quad (2)$$

که F_i^* سطح بهینه انرژی فسیلی مورد استفاده برای هر نیروگاه در پی‌ریود زمانی مفروض می‌باشد. با استفاده از معادلات (۷) و (۸):

$$T_i - TD_i - r_i \left[\sum_{i=1}^n (F_i + R_i) \right] = 0 \quad (9)$$

با جاگذاری از معادله (۹)

$$T_i - TD_i - r_i \left[\sum_{i=1}^n (F_i E_i + R_i) \right] = 0$$

به این ترتیب نرخ بازیاخت بهینه F_i^* برای هر نیروگاه i بدست می‌آید:

$$(10)$$

در صورتیکه راندمان نیروگاه i برابر با η_i فرض شود، آنگاه میزان کل اتلافات نیروگاه (TD_i) بصورت زیر قابل محاسبه است:

$$T_i = E_i - \eta_i E_i = (1 - \eta_i) E_i$$

با جاگذاری مقدار T_i در معادله (۱۰) و بازنویسی مجدد معادله:

$$r_i^* = ((1 - \eta_i) E_i - TD) / \left(\sum_{i=1}^n (F_i E_i + R_i) \right) > 0 \quad (11)$$

با توجه به نتایج فوق، دستیابی به نرخ بهینه بازیاخت میسر می‌گردد. معادله (۱۰) بیان میکند که این نرخ بهینه تابعی از انرژی اتلافی نیروگاه، انرژی غیربازیاختی (TD_i)، اثر مدیریت انرژی بر روی جریان انرژی نیروگاه (F_i)، انرژی مصرفی نیروگاه (E_i) و کل انرژی بازیاخت شده در نیروگاه (R_i) است. با مشتق‌گیری از معادله (۱۰) و (۱۱) نسبت به متغیرهای فوق‌الذکر معادلات (۱۲) تا (۱۷) بصورت زیر بدست می‌آیند:

$$\partial r_i^* / \partial E_i = -F_i' (T_i - TD_i) / (F_i E_i + R_i)^2 < 0 \quad (12)$$

$$\partial r_i^* / \partial F_i' = -E_i (T_i - TD_i) / (F_i E_i + R_i)^2 < 0 \quad (13)$$

$$\partial r_i^* / \partial \eta_i = -E_i / (F_i E_i + R_i)^2 < 0 \quad (14)$$

$$F_i' = \frac{\partial F_i}{\partial R_i}$$

شاخص F_i' دارای مفهومی ارزنده است و در ادامه بحث سیاستگذاری کاربرد آن مطرح خواهد شد. این شاخص نشان دهنده نسبت تغییرات F_i به تغییرات R_i است و می‌تواند بعنوان شاخص میزان سرمایه‌گذاری در بازیاخت و مدیریت انرژی یک نیروگاه مورد استفاده قرار گیرد. بدین صورت که هر چه سرمایه‌گذاری انجام شده در یک نیروگاه بیشتر باشد، نتیجتاً میزان بازیاخت در آن بیشتر بوده و در اثر مدیریت مطلوب، نسبت مصرف انرژیهای فسیلی کاهش یافته و نتیجتاً بخش بیشتری از انرژی ورودی از انرژیهای بازیاختی تأمین شده است.

سیستم معادلات درجه اولی زیر از برای کمینه شدن تابع هدف (۴) با توجه به محدودیتهای (۱) و (۲) بدست می‌آید:

$$\left(\frac{\partial C_s}{\partial E_i} \right) \times \left[- \left(\frac{r_i E_i}{F_i} \right) + 1 + \left(\frac{r_i E_i}{F_i} \right) \right] - \lambda_1 = 0 \quad (5)$$

$$\left[\left(\left(\frac{\partial C_s}{\partial E_i} \right) \times F_i E_i \right) / F_i \right] - \lambda_2 = 0 \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n (E_i - F_i - R_i) = 0 \quad (7)$$

$$T_i - TD_i - \sum_{i=1}^n r_i E_i = 0 \quad (8)$$

با تقسیم معادله (۵) به معادله (۶):

$$\frac{F_i}{F_i E_i} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

اگر فرض شود $\lambda_1 = \lambda_2$ ، یعنی تغییرات E (سطح مصرف انرژی) و T (سطح انرژی اتلافی)، اثری مشابه بر روی هزینه‌های اجتماعی داشته باشند^۱:

$$\frac{F_i}{F_i E_i} = 1$$

یا

$$F_i^* = F_i E_i > 0 \quad (9)$$

^۱ ضرائب لاگرانژ بیانگر میزان حساسیت تابع هدف (در این مورد هزینه‌های اجتماعی و زیست محیطی) نسبت به قیدها می‌باشند.

کاربرد منابع فسیلی در بخش نیروگاهی دارد. معادله (۱۳) بیان می‌کند که سرمایه‌گذاری بیشتر در مدیریت انرژی که موجب کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی می‌شود، نرخ بازیافت بهینه مورد نیاز را کمتر می‌کند. معادله (۱۴) به نکته مهمی در سیاستگذاری بازیافت اشاره دارد، و آن اینست که هر چه مقدار راندمان یک نیروگاه در مصرف منابع بالاتر باشد، نیاز به نرخ بازیافت بهینه کمتری وجود دارد. با این وصف، نرخ بازیافت بهینه لزوماً باید با توجه به راندمان مصرف انرژی در نیروگاه‌های مفروض انتخاب شود. لذا با فرض دسترسی به یک منبع سرمایه‌ای محدود برای بهینه‌سازی یک نیروگاه، بازیافت انرژی بعنوان مناسبترین راه حل به نظر می‌رسد. مطابق معادله (۱۵) برای رسیدن به سطح بهینه بازیافت در نیروگاهی با تولید اتلافات بالا، به نرخ بازیافت بالاتری نیاز می‌باشد. همچنین معادله (۱۶) نشان می‌دهد که نرخ بازیافت بهینه با افزایش میزان اتلافات غیر بازیافتی کاهش می‌ابد. از این معادله میتوان اینگونه استنتاج نمود که چون اتلافات غیر بازیافتی هم هزینه‌های زیست محیطی و هم هزینه‌های انرژی را شامل می‌شوند، گزینه مطلوب و سازگار در مدیریت بازیافت می‌باشند. معادله (۱۷) نشان می‌دهد که اگر بازیافت وجود داشته باشد، نرخ بهینه بازیافت کمتر خواهد بود. هنگامی که هزینه‌های مالی اتلافات انرژی بسیار کم باشد،

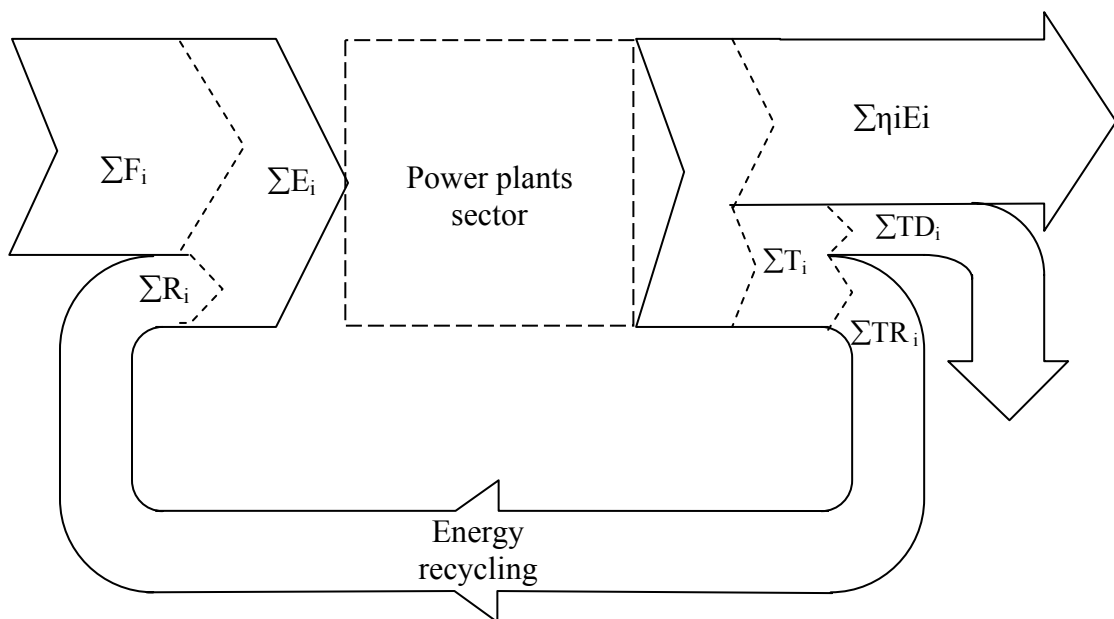
$$\partial r_i^* / \partial T_i = 1 / (F_i E_i + R_i) > 0 \quad (15)$$

$$\partial r_i^* / \partial TD_i = -1 / (F_i E_i + R_i) < 0 \quad (16)$$

$$\partial r_i^* / \partial R_i = -(T_i - TD_i) / (F_i E_i + R_i)^2 < 0 \quad (17)$$

نتایج و سیاست‌گذاریهای بازیافت انرژی

آژانس بین‌المللی انرژی درباره سیاستگذاری در بخش انرژی و تغییرات آب و هوا چنین پیشنهاد می‌دهد: دولتها سیاست‌گذاریهای لازم جهت تشویق و یا وادار نمودن تولید کنندگان و مصرف کنندگان را به کاهش صدور کربن اتخاذ می‌کنند و مصرف کنندگان با تغییر دادن رفتار و یا اصلاح روش زندگی به آن سیاستها پاسخ می‌دهند [1]. با توجه به نیاز به نرخ بهینه بازیافت در زیربخش نیروگاهی با استفاده از معادلات (۱۲) تا (۱۷) سیاست‌گذاریهای ممکن در دستیابی به این نرخ بهینه تشریح می‌گردد. معادله (۱۲) یادآور خاصیت جانشینی منابع انرژی مصرفی نیروگاهها می‌باشد. بدینصورت که انرژی مورد نیاز مصرفی با افزایش نرخ بازیافت کاهش یافته و با کاهش آن افزایش می‌ابد. لذا سرمایه‌گذاری در بازیافت پتانسیل بالایی نسبت به سرمایه‌گذاری در توسعه

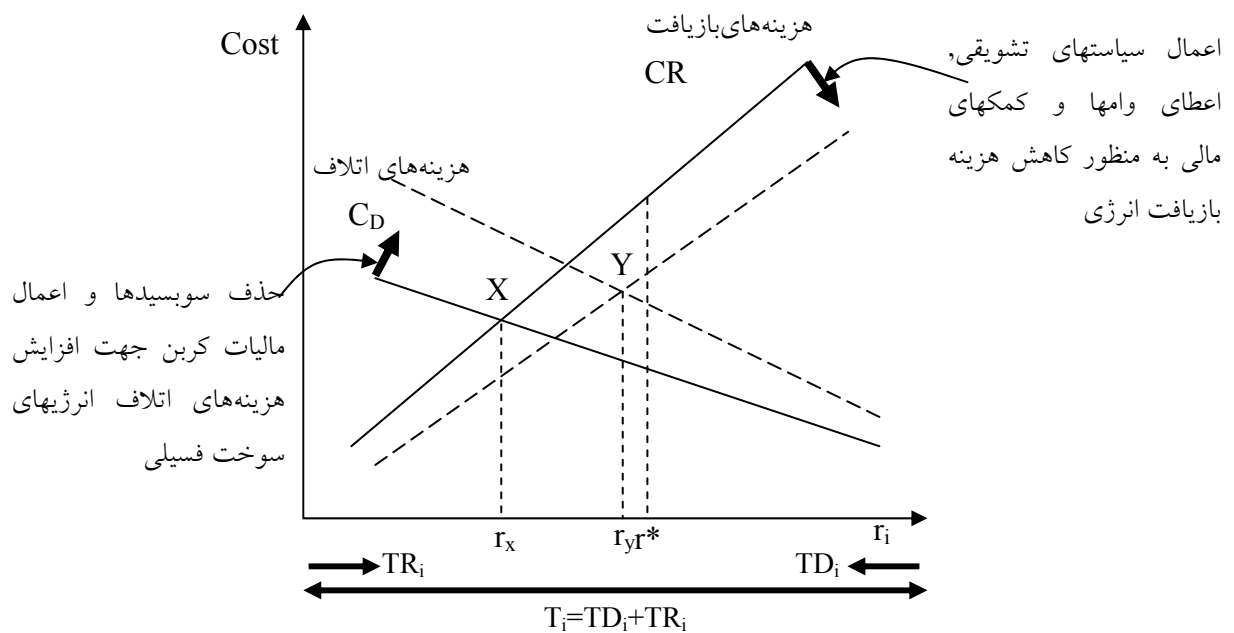


شکل (۳): شماتیک جریان‌های انرژی به همراه بازیافت در نیروگاه

تبعات بهداشتی آن نیز می‌شود.

در شکل (۴) رفتار منحنی‌های هزینه بازیافت و هزینه انرژی اتلافی بصورت توابعی از نرخ بازیافت نشان داده شده‌اند. همانگونه که تعریف شد، نرخ بازیافت بیانگر نسبت انرژی بازیافتی به کل انرژی مصرفی نیروگاه است ($TR_i = \Gamma_i E_i$). همچنین کل انرژی اتلافی برابر با مجموع انرژیهای اتلافی و بازیافتی است ($T_i = TD_i + TR_i$). بنابراین وقتی Γ_i افزایش میابد مقدار TD_i کاهش یافته و TR_i افزایش میابد و بالعکس. C_D بیانگر هزینه اتلاف انرژی بوده و تابعی نزولی از Γ_i است. به این صورت که با افزایش نرخ بازیافت، انرژی بازیافتی افزایش یافته و لذا انرژی اتلافی کاهش میابد و بنابراین هزینه انرژی اتلافی نیز کاهش خواهد یافت. از سوی دیگر C_R که بیانگر هزینه‌های اقتصادی بازیافت انرژی است، تابعی صعودی از انرژی بازیافت شده می‌باشد. چراکه برای دستیابی به نرخ بازیافت انرژی بیشتر، نیاز به تجهیزات گرانتری است. مثلاً مبدلهای حرارتی با سطوح حرارتی بیشتر لازم است که هزینه‌های اولیه و عملیاتی بیشتری را در بر خواهد داشت. بنابراین با افزایش نرخ بازیافت، هزینه بازیافت انرژی C_R افزایش میابد. نرخ بهینه بازیافت که قبلاً

تلاشی برای توسعه بازیافت و کاهش اتلافات در راستای حفظ منابع و محیط زیست صورت نمی‌گیرد. چنین وضعیتی زمانی روی می‌دهد که هزینه ناشی از اتلافات انرژی برابر با فایده نهایی جامعه از فرایند بازیافت نشود. این مفهوم نه تنها برای سیاستگذاری مدیریت اتلافات انرژی مهم است، بلکه برای تنظیم سیاستگذاریها در جهت پیشرفت و بهبود راندمان در مدیریت انرژی و محیط زیست نیز اهمیت دارد. بازیافت انرژی از لحاظ مالی فرایندی هزینه بر است و نظر به اینکه در برنامه‌های بازیافت در بخش خانگی - تجاری، هزینه اتلافات بسیار کوچک بوده و محدود به هزینه کم اتلافات انرژی می‌شود، به همین دلیل در این بخش پتانسیل زیادی برای دستیابی به شرایط زیست‌محیطی بهتر با اجرای برنامه‌های مدیریت اتلافات وجود ندارد. بنابراین نیاز به اجرای برنامه‌های بازیافت در بخش تولید لازم می‌نماید. همچنین هزینه‌های اجتماعی تأمین انرژی در مقایسه با هزینه‌های تولید انرژی برای دولت بالا است. هزینه‌های اجتماعی علاوه بر فرآیندهای تولید انرژی شامل هزینه فرصتهایی نظیر صادرات، هزینه‌های فرسایش منابع فسیلی و بالا رفتن هزینه استخراج از این منابع و همچنین هزینه‌های آلودگیهای زیست محیطی و



شکل (۴): منحنی هزینه‌های اتلاف و بازیافت انرژی

نقطه Y که محل جدید تلاقی دو منحنی هزینه اتلاف و هزینه‌های بازیافت است، نرخ بازیافت Γ_Y را تعیین می‌کند. پس از اعمال سیاستهای قیمتی نرخ بازیافت Γ_Y ($\Gamma_Y > \Gamma_X$) از نظر اقتصادی توجیه پذیر است به همین دلیل زیربخش نیروگاهی نرخ بازیافت مطلوب را Γ_Y انتخاب می‌کند. بدین ترتیب و با اعمال سیاستهای فوق‌الذکر زیربخش نیروگاهی در جهت دستیابی به نرخ بهینه بازیافت (Γ^*) هدایت می‌شود.

پیشنهادات

توسعه پایدار نیازمند منابع انرژی پایدار و محیط زیست سالم است. بازیافت انرژی بر اساس اهداف دستیابی به توسعه پایدار قابل توجیه است. استفاده مداوم از منابع فسیلی، علاوه بر افزایش هزینه‌های انرژی موجب بروز اثرات منفی زیست محیطی نیز شده است. در جستجو برای دستیابی به نرخ بازیافت بهینه در نیروگاهها، مدلی با توجه به جریان انرژی نیروگاه و منحنی‌های هزینه ارائه شد. به نظر می‌رسد فعالیت‌های مربوط به بازیافت انرژی صرفاً امری هزینه‌بر است، اما از دیدگاه اجتماعی هزینه‌بر نبوده و باید به صورت جزئی از سیستم انرژی-اقتصادی دیده شود. این حقیقت به دلیل وجود یک فاصله میان هزینه‌های اتلاف انرژی و هزینه‌های اجتماعی است. لذا جزء کلیدی برنامه‌های بازیافت به منظور دستیابی به نرخ بهینه، منطقی کردن قیمت‌گذاری انرژی بر اساس هزینه‌های واقعی پرداخت شده از سوی جوامع است. بدین ترتیب بخشهای مختلف انرژی به سمت بازیافت بیشتر و جانشینی انرژی فسیلی با منابع بازیافتی هدایت می‌شوند.

انرژی اتلافی در مقابل انرژی اولیه کیفیت پایینی دارد ولی با توجه به اهمیت آن در ایجاد آلودگیهای زیست محیطی، کاهش و یا بازیافت آن از نقطه نظر اقتصادی و زیست محیطی بسیار با ارزش است. در سالهای اخیر روشهای بسیاری درباره توسعه استفاده از انرژی اتلافی توسعه یافته است، اما بکارگیری این راه حلها مستلزم در نظر گرفتن ابعاد مختلف و شرایط فنی، اقتصادی، اجتماعی و قانونی است. بنابراین با توجه به مطالب مذکور، همواره باید در انتخابها و سیاست‌گذاریها از تصمیمات یک بعدی و غیر جامع پرهیز شود تا موجب پیگیری اهداف متناقض نگردد.

بدست آمد، با Γ^* در شکل (۴) مشخص شده است. همچنین نقطه X که محل تلاقی دو منحنی هزینه اتلاف و هزینه بازیافت است، حالت تعادل میان نرخهای اتلاف و بازیافت انرژی را نشان می‌دهد. در این نقطه که نرخ بازیافت آن برابر Γ_X است، انرژی به میزان TD_X اتلاف و به مقدار TR_X بازیافت شده است. در تمام نقاط سمت راست X هزینه‌های بازیافت از اتلاف انرژی بیشتر است و نقطه X را بعنوان نقطه بهینه بازیافت انتخاب می‌شود. بنابراین باید با اتخاذ سیاست‌گذاریهای تکمیلی، نیروگاهها را در جهت افزایش نرخ بازیافت و کاهش اتلافات تا نقطه بهینه هدایت نمود. با این شرح به سادگی سیاست‌گذاریهای کلیدی در جهت دستیابی به نرخ بهینه بازیافت در زیربخش نیروگاهی قابل استنباط است: اول نیاز به کاهش هزینه‌های بازیافت است تا منحنی CR را به سمت پایین تمایل دهد و نتیجتاً نرخ بازیافت افزایش یابد. این کار با اتخاذ سیاستهای تشویقی مانند اعطای وامها و کمکهای مالی قابل انجام است. با این روش منحنی هزینه بازیافت انرژی به پایین متمایل می‌گردد. منحنی جدید بوسیله خط چین در شکل (۴) نشان داده شده است.

دوم لازم است که هزینه‌های اتلاف انرژی بالا برده شود تا برای بخشهای نیروگاهی، دستیابی به نرخ بیشتر بازیافت از نظر اقتصادی توجیه پذیر شود. در حقیقت بدینوسیله هزینه‌های زیست محیطی صدور کربن در قیمت‌ها انعکاس پیدا می‌کند. از جمله سیاستهای قیمتی قابل اتخاذ در دستیابی به این هدف، حذف سوبسیدهای انرژی و برقراری مالیات کربن را می‌توان نام برد که مستقیماً قیمت انرژی نهایی را تغییر می‌دهند. سیاستهای قیمتی نظیر مالیات کربن که با توجه به محتوای کربن سوخت‌های فسیلی اعمال می‌شوند، در حال حاضر در برخی کشورهای صنعتی در حال اجراست. این سیاست‌گذاریها علاوه بر تشویق نیروگاهها به افزایش بازیافت، موجب ترغیب آنها به جایگزینی سوخت مصرفی با شرایط قیمتی جدید و با محتوای کربن کمتر می‌گردد. همانگونه که در شکل (۴) نشان داده شده است، انجام این سیاست‌گذاری موجب انتقال هزینه بازیافت انرژی به سمت بالا می‌شود. منحنی جدید هزینه اتلاف با خط چین مشخص شده است.

مراجع

- [1] International Energy Agency, Energy and Climate Change, Organization for Economic Co-operation and Development/International Energy Agency, 1997, Paris.
- [2] Subhes C. Bhattacharyya "Applied general equilibrium models for energy studies: a survey" Energy Economics 18 (1996) 145-164.
- [3] William W. Hogan "Energy Modeling for Policy Studies" Operations Research 50(1) (2002) 89-95.
- [4] Ibrahim Dincer, Marc A. Rosen "Energy, environment and sustainable development" Applied Energy 64 (1999) 427-440.
- [5] Jan Szargut, Andrzej Ziebiak, Wojciech Stanek "Keynote paper: Depletion of the non-renewable natural exergy resources as a measure of the ecological cost" Energy Conversion and Management 43 (2002) 1149-1163.
- [6] Jan Szargut "Application of exergy for the determination of the pro-ecological tax replacing the actual personal taxes" Energy 27 (2002) 379-389.
- [7] Luciano Basto Oliveira, Luiz Pinguelli Rosa "Brazilian waste potential: energy, environmental, social and economic benefits" Energy Policy 31 (2003) 1481-1491.
- [8] Hermine Dimitroff-Regatschnig, Hans Schnitzer, "A techno-economic approach to link waste minimization technologies with the reduction of corporate environmental costs: effects on the resource and energy efficiency of production" Journal of Cleaner Production 6 (1998) 213-225.
- [9] S. Iniyar, K. Sumanthy "An optimal renewable energy model for various end-uses" Energy 25 (2000) 563-575.
- [10] T. Masui, T. Morita, J. Kyogoku "Analysis of recycling activities using multi-sectoral economic model with material flow" European Journal of Operational Research 122 (2000) 405-415.
- [11] Wolfgang Fratzscher, Karl Stephan "Waste energy utilization - An appeal for an entropy based strategy" International Journal of Thermodynamic Sciences (2001) 40, 311-315.
- [12] Robert U. Ayers "Analysis; Eco-thermodynamics: economics and the second law" Ecological Economics 26 (1998) 189-209.
- [13] Alexander V. Bandura, Victor M. Brodiansky "Thermodynamics extends economics potentials" Energy 26 (2001) 811-814.
- [14] Ibrahim Dincer "The role of exergy in energy policy making" Energy Policy 30 (2002) 137-149.
- [15] Einar Bowitz, Maj Dang Trong "The social cost of district heating in a sparsely populated country" Energy Policy 29 (2001) 1163-1173.