

صرفه‌جویی آب در سیستم‌های تولید برق: پتانسیل و هزینه

امیر صفدریان^۱، استادیار؛ مهدی گنج خانی^۲، کارشناس؛ سبحان بدخشانی^۳، محقق

۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی شریف - تهران - ایران - safdarian@sharif.edu

۲- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی شریف - تهران - ایران - ganjkhani.mehdi@alum.sharif.edu

۳- شرکت مدیریت شبکه برق ایران - تهران - ایران - badakhshan@igmc.ir

چکیده: نیروگاه‌ها سهم عمده‌ای از مصرف آب‌های زیرزمینی را به خود اختصاص می‌دهند. به‌منظور کاهش آب مصرفی در نیروگاه‌ها، فعالیت‌های مختلفی نظیر تبدیل برج‌های تقطیر مرطوب نیروگاه‌های حرارتی به برج‌های تقطیر خشک و سرمایه‌گذاری بر روی منابع انرژی تجدیدپذیر در صنعت برق کشور مورد توجه واقع شده است. لیکن، راه‌کارهای مذکور به‌عنوان راه‌کار میان‌مدت و بلندمدت با چالش‌هایی نظیر هزینه سرمایه‌گذاری بالا و افت بازده نیروگاه‌های هدف همراه است. در این مقاله، کمینه‌سازی آب مصرفی مجموعه نیروگاه‌ها در شرایط بهره‌برداری به‌عنوان راه‌کار کوتاه‌مدت مورد توجه واقع شده است. بدیهی است که این راه‌کار پتانسیل محدودی در صرفه‌جویی آب داشته، لحاظ هدف مذکور افزایش هزینه تولید برق را در پی خواهد داشت. لذا، هدف این مقاله ارزیابی پتانسیل مذکور در صرفه‌جویی و تخمین هزینه‌های مربوطه است. به‌منظور اجتناب از افزایش چشم‌گیر هزینه‌ها، مسئله توزیع اقتصادی توان به‌صورت یک مدل چند تابع هدف با هدف کاهش هزینه و آب مصرفی ارائه شده است. به این منظور، ابتدا مسئله توزیع اقتصادی توان با لحاظ آب مصرفی نیروگاه‌ها مدل‌سازی می‌شود. سپس، روش حل مدل پیشنهادی تشریح می‌گردد. در ادامه، روند استخراج تابع هزینه صرفه‌جویی آب مصرفی سیستم‌های تولید انرژی الکتریکی ارائه می‌گردد. در انتها، مدل و روش ارائه‌شده بر روی یک سیستم تولید نمونه پیاده‌سازی شده و نتایج حاصله ارائه و مورد بحث واقع می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سیستم تولید انرژی الکتریکی، منابع آب زیرزمینی، توزیع اقتصادی توان، صرفه‌جویی در مصرف آب.

Water Saving in Electricity Generation System: Potential and Cost

A. Safdarian, Assistant Professor¹; M. Ganjkhani, DCS Expert²; S. Badakhshan, Researcher³

1- EE Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, safdarian@sharif.edu

2- EE Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, ganjkhani.mehdi@alum.sharif.edu

3- Iran Grid Management Company, Tehran, Iran, Email: badakhshan@igmc.ir

Abstract: Power plants have noticeable share from underground water consumption. In order to make some water savings, different approaches such as replacing wet cooling towers and installing renewable energy sources have been proposed. These medium and long term approaches however need huge investments and may degrade performance of the system. This paper discusses generation system water consumption minimization as a short term solution. To do so, conventional economic dispatch problem is extended to a multi-objective problem where a linear combination of electricity generation cost and water consumption is minimized. The paper presents estimation procedure of water saving cost function in a generation system. Then, a test system is applied to determine potentials and costs of saving water in a generation system. Different studies are conducted and the results are presented. Finally, water saving cost function is estimated for the generation system. According to the results, some relevant conclusions are drawn.

Keywords: Electric energy generation system, underground water sources, economic dispatch, water consumption saving.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۱۸

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۲۸ و ۱۳۹۶/۱۰/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۳۰

نام نویسنده مسئول: امیر صفدریان

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - خیابان آزادی - دانشگاه صنعتی شریف - دانشکده مهندسی برق.

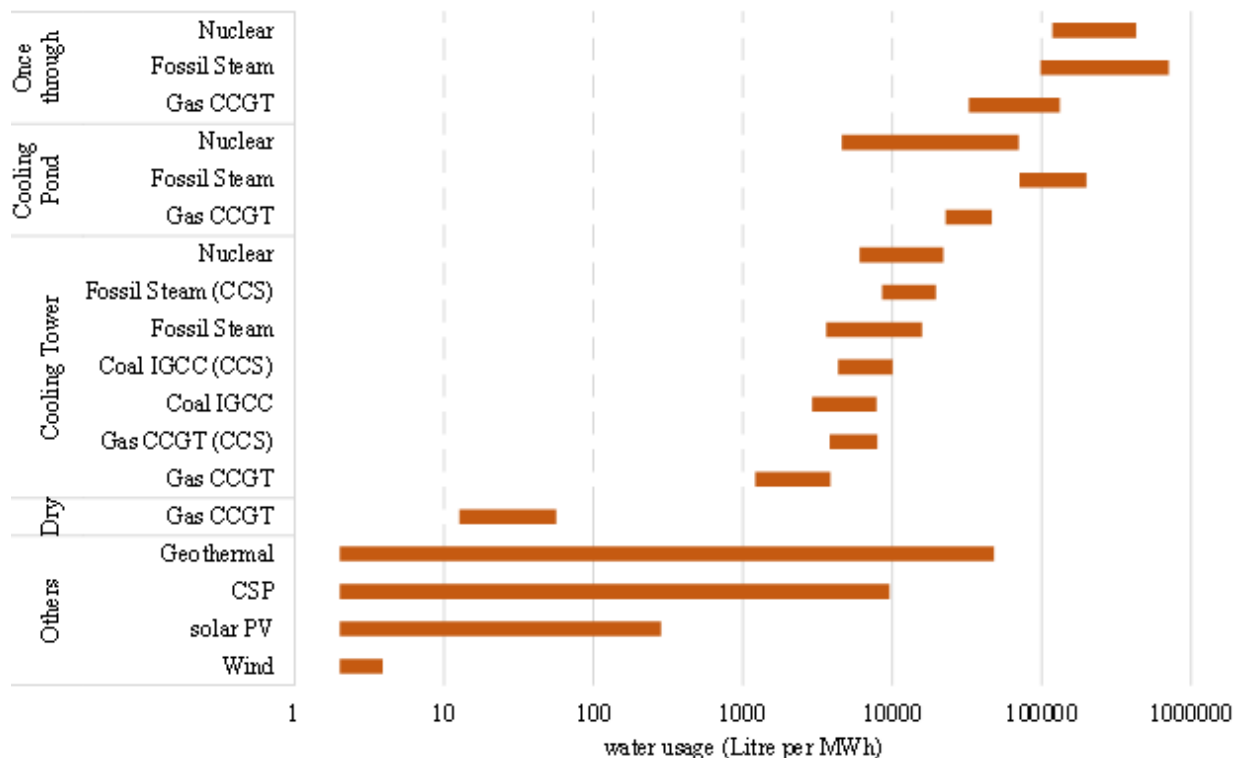
۱- مقدمه

راه‌کارهای مختلفی برای صرفه‌جویی در آب مصرفی در نیروگاه‌های تولید انرژی الکتریکی توجه دست‌اندرکاران صنعت برق را به خود جلب نموده است. سرمایه‌گذاری بر روی نیروگاه‌های مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر نظیر انرژی خورشیدی نمونه‌ای از این راه‌کارها است. با جایگزینی نیروگاه‌های حرارتی با سلول‌های خورشیدی، تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز جامعه با صرف مقدار کمتری از آب‌های سطحی و زیرزمینی انجام می‌گیرد [۳]. اگرچه نصب و به‌کارگیری نیروگاه‌های مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر با کاهش حجم آب مصرفی همراه است، لزوم سرمایه‌گذاری هنگفت، عدم قطعیت در تولید انرژی الکتریکی و ظرفیت تولید متغیر با زمان از جمله چالش‌های راه‌حل مذکور است. به‌عنوان یک راه‌حل دیگر، تبدیل برج‌های خنک‌کننده مرطوب به برج‌های خنک‌کننده خشک موجب کاهش چشم‌گیر آب مصرفی نیروگاه می‌شود. در برج‌های خنک‌کننده خشک، جریان هوا با گذر از بین لوله‌های داغ محتوی سیال اصلی موجب کاهش دمای آن می‌گردد. البته، بهره‌گیری از برج خنک‌کننده خشک در مقایسه با برج خنک‌کننده مرطوب با کاهش دمای کمتر و در نتیجه راندمان کمتری برای نیروگاه همراه است. علاوه بر چالش‌های مذکور، راه‌کارهای مورد اشاره طبیعت بلندمدت داشته و صرفه‌جویی قابل تحصیل پس از گذشت مدت زمان نسبتاً طولانی حاصل می‌گردد [۸].

در کنار راه‌کارهای فوق، این مقاله یک راه‌حل کوتاه‌مدت برای کاهش مصرف آب در فرآیند تولید انرژی الکتریکی ارائه می‌کند. این راه‌حل بر تفاوت بین میزان آب مصرفی نیروگاه‌های مختلف برای تولید یک مقدار مشخص انرژی الکتریکی استوار است. در بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت، عمدتاً اولویت تولید به واحدهایی با هزینه تولید کمتر اختصاص می‌یابد [۹]. در مرجع [۱۰] نیز به‌طور هم‌زمان به حل مسئله توزیع بار اقتصادی هزینه و آلودگی توأم با برنامه پاسخ‌گویی بار پرداخته شده است. در راه‌حل پیشنهادی این مقاله، علاوه بر لحاظ هزینه به‌عنوان تابع هدف، کاهش آب مصرفی نیروگاه‌ها نیز به‌عنوان تابع هدف دوم لحاظ می‌گردد. به این منظور، مسئله توزیع اقتصادی توان به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه توسعه پیدا می‌کند. در مسئله توسعه‌یافته، کاهش کل آب مصرفی سیستم در کنار کاهش هزینه‌ها مورد توجه واقع می‌شود. پس از توسعه مدل مذکور، روش حل آن تشریح شده و فرآیندی برای استخراج تابع هزینه کل سیستم بر حسب کل آب مصرفی ارائه می‌شود. این تابع تحت عنوان تابع هزینه صرفه‌جویی آب مصرفی شناخته می‌شود. تابع مذکور بهره‌بردار سیستم قدرت را در سنجش پتانسیل و تخمین هزینه صرفه‌جویی آب مصرفی یاری می‌رساند. همچنین، با توجه به تابع استخراج‌شده، بهره‌بردار قادر به مصالحه بین میزان آب مصرفی و هزینه تأمین بار سیستم خواهد بود. در ادامه، مدل توسعه‌یافته بر روی یک سیستم نمونه پیاده‌سازی شده و نتایج حاصله مورد بحث واقع می‌شود. در این بخش، حالات مختلفی از جمله حالت متناظر با کمترین هزینه، حالت متناظر با کمترین آب مصرفی و حالت محافظه‌کارانه شبیه‌سازی می‌گردد.

با توجه به تغییرات آب و هوایی و خشکسالی سال‌ها و دهه‌های اخیر، صرفه‌جویی در مصرف آب‌های سطحی و زیرزمینی توجه ویژه‌ای را به خود جلب نموده است. صرفه‌جویی آب در بسیاری از صنایع نیز به‌عنوان یکی از مصرف‌کنندگان عمده آب مورد توجه بسیاری از محققین صنعتی و دانشگاهی واقع شده است. از جمله این صنایع، نیروگاه‌های تولید انرژی الکتریکی نیز مقدار غیرقابل چشم‌پوشی از مصرف آب را به خود اختصاص می‌دهند [۱، ۲]. همواره نیروگاه‌های با سوخت فسیلی مقدار قابل توجهی از آب برای سیستم خنک‌سازی خود مورد استفاده قرار می‌دهند. وابستگی این قبیل نیروگاه‌ها به آب امری دائمی است. با ارایه یک راه‌حل که توسط آن در آب مصرف‌شده برای تولید برق اندکی صرفه‌جویی شود می‌توان از آن برای جلوگیری از بحران کم‌آبی و بهینه‌سازی مصرف آب استفاده کرد. در تحقیقات انجام‌شده در مرجع [۱]، آب مورد نیاز برای بخش‌های مختلف تولید انرژی الکتریکی در نیروگاه از قبیل استخراج سوخت، تأسیسات، بهره‌برداری و نگهداری آن مورد مطالعه قرار گرفته است. مرجع [۳] استفاده از انواع مختلف سیستم‌های خنک‌کننده در ایالات متحده آمریکا را مورد بررسی قرار داده است. بر اساس فرضیات در نظر گرفته‌شده در این مطالعه، میزان آب مورد نیاز نیروگاه‌ها در سال ۲۰۳۰ برابر با مقدار آب مصرفی در حال حاضر بوده یا در بهترین شرایط ۳۰ درصد کاهش خواهد یافت. میزان منابع آب در دسترس در این مقاله در نظر گرفته نشده است. مرجع [۴] به‌طور مختصر افزایش تلفات مصرف آب به‌دلیل تغییرات آب و هوایی را نشان می‌دهد. مرجع [۵] افزایش تقاضای آب برای نیروگاه‌های با سوخت فسیلی و افزایش بارهای حرارتی برای آب‌های سطحی به‌دلیل افزایش تقاضای آب در شهر بوستون را تخمین زده است. مرجع [۶] توابع یکپارچه و پیچیده‌ای برای محاسبه آب مورد نیاز نیروگاه‌ها و مدیریت منابع آب در دسترس ارایه داده است. همچنین برنامه‌ریزی میان‌مدت و بلندمدت برای در نظر گرفتن تغییرات آب و هوایی در مصرف آب در نظر گرفته شده است. مرجع [۷] به استخراج میزان مصرف آب در انواع مختلف نیروگاه با تکنولوژی‌های متفاوت پرداخته است. در این مقاله، همه انواع نیروگاه اعم از سنتی و تجدیدپذیر مورد مطالعه قرار گرفته و بهره‌گیری از نیروگاه‌های فتوولتاییک و بادی به‌عنوان بهترین گزینه برای کاهش مصرف آب در تولید انرژی الکتریکی مورد اشاره قرار گرفته است.

در نیروگاه‌ها، انتقال حرارت از سیال اصلی به محیط پیرامون عمدتاً توسط برج‌های خنک‌کننده صورت می‌گیرد. در بسیاری موارد، به‌منظور افزایش راندمان فرآیند تبدیل انرژی، پاشیدن آب بر لوله‌های داغ حاوی سیال اصلی موجب افزایش قابلیت خنک‌کنندگی می‌گردد. برج‌های خنک‌کننده مبتنی بر پاشش آب بر روی لوله‌های محتوی سیال داغ تحت عنوان برج‌های خنک‌کننده مرطوب شناخته می‌شوند. در نیروگاه‌های حرارتی، برج‌های خنک‌کننده مرطوب بخش اعظم آب مصرفی در چرخه تولید انرژی الکتریکی را مصرف می‌کنند.



شکل ۱: محدوده آب مصرفی نیروگاه‌های مختلف

گرم حاصل به منبع اولیه باز می‌گردد. به دلیل مصرف آب قابل توجه در این روش و همچنین عدم وجود منبع آب در دسترس به اندازه کافی یا محدودیت مصرف آب توسط مقررات زیست محیطی، نیروگاه‌ها ناگزیر به استفاده از سیستم‌های خنک‌کننده مدار بسته هستند [۱۲].

در سیستم‌های مدار بسته، آب از چگالنده گرفته شده و پس از عبور از یک دستگاه خنک‌کننده دوباره به چگالنده باز می‌گردد. سیستم مدار بسته نسبت به سیستم یک‌بارگذر از کارایی کمتری برخوردار است. لیکن، بر خلاف سیستم یک‌بارگذر، سیستم بسته به آب بسیار کمتری نیاز داشته و در مقابل مستلزم سرمایه‌گذاری، هزینه بهره‌برداری و فضای احداث بیشتری است [۱۳].

۴-۲ مدل آب مصرفی نیروگاه

میزان آب مصرفی در هر نیروگاه حرارتی از طریق اندازه‌گیری آب ورودی به بخش‌های مختلف آن قابل محاسبه است. لیکن، برای محاسبه میزان آب مصرفی کل نیروگاه، نیازی به استخراج تمام جزئیات میزان آب ورودی و خروجی نیروگاه نیست [۱۴]. رابطه‌ای بین آب مصرف شده در نیروگاه و میزان حرارت خروجی آن روشی ساده و با دقت مناسب برای تخمین میزان آب مصرفی نیروگاه است. این روش در [۱۵] به صورت کامل تشریح شده است. رابطه محاسبه میزان آب مصرفی نیروگاه به این صورت است:

$$I = A(HR - B) + C \quad (1)$$

سپس، تابع هزینه کل سیستم بر حسب کل آب مصرفی برای سیستم مورد نظر استخراج شده و مورد بحث و بررسی واقع می‌شود. در انتها، جمع‌بندی مطالب و نتیجه‌گیری مشاهدات ارائه شده و برخی گام‌های پژوهشی برای ادامه این مطالعات معرفی می‌گردد.

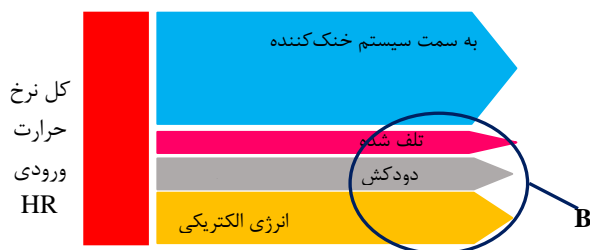
۲ آب مصرفی نیروگاه

همان‌طور که ذکر شد، هدف این مقاله بررسی پتانسیل صرفه‌جویی در آب مصرفی سیستم تولید و تخمین هزینه مربوطه است. به این منظور، دستیابی به مدل آب مصرفی نیروگاه‌های مختلف ضروری است. لذا، در این بخش، ابتدا انواع سیستم‌های خنک‌کننده در نیروگاه‌های حرارتی به طور اجمالی معرفی می‌گردد. سپس، مدلی برای تخمین آب مصرفی یک نیروگاه به‌عنوان تابعی از توان تولیدی آن استخراج می‌گردد.

۴-۲ سیستم‌های خنک‌کننده

بخش اعظمی از آب مصرفی یک نیروگاه توسط سیستم خنک‌کننده مصرف می‌شود. از بین انواع سیستم‌های خنک‌کننده به‌کاررفته در نیروگاه‌ها، سیستم‌های یک‌بارگذر و سیستم‌های مدار بسته متداول‌تر و رایج‌تر هستند [۱۱]. سیستم‌های خنک‌کننده یک‌بارگذر عمدتاً در نیروگاه‌های بزرگ مجاور منابع آب کافی استفاده می‌شوند. در این سیستم‌ها، آب از یک منبع طبیعی مانند دریاچه، رودخانه یا دریا گرفته شده و در مجاورت لوله‌های چگالنده حاوی سیال اصلی جریان می‌یابد. به این ترتیب، گرما از سیال اصلی به آب منتقل شده و آب

عمدتاً به دلیل تعدد پارامترهای مؤثر بر مقدار آب مصرفی نیروگاه نظیر شرایط آب و هوایی محیط پیرامون نیروگاه است. راندمان نیروگاه یکی از پارامترهای مؤثری است که از اهمیت بالایی برخوردار بوده و برای انواع نیروگاه‌ها در دسترس است. با افزایش راندمان نیروگاه، به‌ازای تولید یک مقدار انرژی ثابت، انرژی کمتری به‌صورت حرارت تلف شده و در نتیجه میزان آب مصرفی کاهش می‌یابد. شکل ۲ حرارت ورودی مصرف‌شده در بخش‌های مختلف نیروگاه حرارتی را نشان می‌دهد.



شکل ۲: تقسیم‌بندی حرارت مصرف‌شده در نیروگاه‌ها

حرارت ورودی به نیروگاه حرارتی صرف تبخیر آب ورودی در بویلر می‌شود. بنابراین، بخش اعظمی از انرژی خود را به سیال آب انتقال داده و مابقی از داخل دودکش به جو هدایت می‌شود. آب تبخیرشده با دما و فشار مشخص به داخل توربین بخار هدایت شده و انرژی الکتریکی تولید می‌کند. در این قسمت، بخشی از انرژی بخار آب توسط توربین به انرژی الکتریکی تبدیل شده و بخار آب خروجی با انرژی کمتر نسبت به بخار ورودی، به سمت سیستم خنک‌کننده هدایت می‌شود. سیستم خنک‌کننده وظیفه تبدیل بخار به آب مناسب برای بازگشت به ورودی بویلر را دارد. با توجه به شکل ۲، بخش قابل توجهی از انرژی نیروگاه به سمت سیستم خنک‌کننده انتقال می‌یابد. با فرض این که راندمان توربین بخار ثابت باشد، طبق مرجع [۱۵]، برای تولید ۱ کیلووات ساعت انرژی الکتریکی نیاز به ۳۶۰۰ کیلوژول انرژی حرارتی در توربین می‌باشد. بنابراین، رابطه راندمان نیروگاه به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\eta = \frac{3600(kJ / kWh)}{HR(kJ / kWh)} \quad (2)$$

از رابطه اخیر مشخص است که هر چه راندمان نیروگاه بیشتر باشد، نرخ حرارتی ورودی مورد نیاز کمتر بوده و حرارت ورودی به سیستم خنک‌کننده و در نتیجه آب مصرفی در آن کاهش می‌یابد. اگر از حرارت تلف‌شده در داخل ژنراتورها صرف نظر شود و نرخ حرارتی دودکش از FG (Flue Gas) بنامیم، در این صورت خواهیم داشت:

$$(3)$$

با جای‌گذاری رابطه (۳) در رابطه (۲) و کم کردن مقدار دو طرف از واحد رابطه زیر استخراج می‌گردد:

در این رابطه، I بیانگر میزان آب مصرفی نیروگاه بر حسب لیتر به‌ازای تولید هر کیلووات ساعت انرژی الکتریکی است. پارامتر HR بیانگر نرخ حرارتی نیروگاه یا میزان حرارت ورودی مورد نیاز جهت تولید یک کیلووات ساعت انرژی الکتریکی بر حسب کیلوژول است. پارامتر B نرخ کل حرارت ورودی نیروگاه به جز نرخ حرارتی ورودی به سیستم خنک‌کننده را شامل می‌شود. پارامتر A نیز میزان آب مورد نیاز جهت دفع یک کیلوژول حرارت در سیستم خنک‌کننده را ارائه می‌کند. شایان ذکر است که این پارامتر کاملاً به نوع سیستم خنک‌کننده وابسته است. در نهایت، پارامتر C مقدار آب مورد نیاز در نیروگاه جز بخش خنک‌کننده را نشان می‌دهد. واحد این پارامتر لیتر بر کیلووات ساعت است.

آب مصرفی در نیروگاه‌ها به دو قسمت آب خروجی و آب مصرفی تقسیم می‌شود. آب خروجی مقدار آبی است که از زیر سطح زمین استخراج یا از منبع خود برای استفاده منحرف می‌شود. آب مصرفی شامل مقدار آبی است که تبخیر شده، به‌صورت تعرق از دسترس خارج می‌شود یا برای محصولات کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقدار آب مصرف‌شده در هر نیروگاه با توجه به سیستم خنک‌کننده و نوع نیروگاه متفاوت است. از آنجا که این مقدار به شرایط و پارامترهای متنوعی نظیر شرایط آب و هوایی محیط اطراف نیروگاه وابسته است، مقدار آب مصرفی و پارامترهای مربوطه عمده‌تاً به‌صورت یک بازه ارائه می‌شود. بازه پارامترهای مربوط به انواع نیروگاه‌ها برای محاسبه آب مصرفی آن‌ها در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است [۱۶].

جدول ۱: پارامترهای مربوط به میزان آب مصرفی نیروگاه‌های مختلف

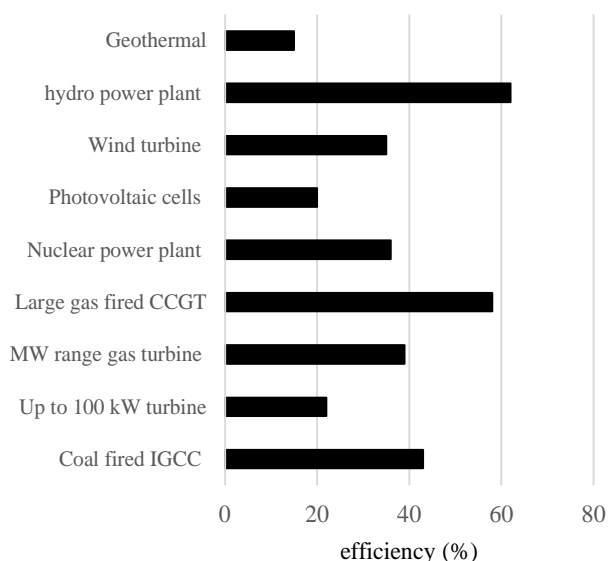
نوع نیروگاه	پارامتر (کیلوژول یا لیتر بر کیلووات ساعت)		
	C	B	HR
گازی	۰/۰۲-۰/۰۳	۵۱۶۰-۵۲۳۰	۷۲۰۰
بخاری	۰/۱-۰/۲	۵۵۰۰-۵۸۰۰	۹۰۰۰-۹۵۰۰
هسته‌ای	۰/۰۲-۰/۰۳	۴۱۰۰-۴۴۲۰	۱۰۰۰۰-۱۲۴۰۰
زغال سنگ	۰/۲-۰/۳	۵۱۰۰-۵۴۰۰	۸۹۰۰-۹۸۰۰

جدول ۲: پارامتر مربوط به میزان آب مصرفی انواع سیستم‌های خنک‌کننده

نوع سیستم خنک‌کننده	A (لیتر بر کیلوژول)	
	آب مصرفی	آب خروجی
یک بار گذر	۰/۰۰۰۲۲-۰/۰۰۰۶۸	۰/۰۲۲-۰/۰۲۴
برج خنک‌کننده تر	۰/۰۰۰۳۳-۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۳۴-۰/۰۰۰۷۷
برج خنک‌کننده خشک	.	.

شکل ۱ بازه بین حداقل و حداکثر آب مصرفی برای تولید انرژی الکتریکی در انواع نیروگاه را با توجه به نوع سیستم خنک‌کننده آن ارائه می‌کند [۱۷]. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در بین انواع نیروگاه‌ها، نیروگاه‌های هسته‌ای و بخاری با سیستم خنک‌کننده یک-بارگذر در مقایسه با سایر نیروگاه‌ها بیشترین مقدار آب را مصرف می‌کند. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، بازه مربوط به مقدار آب مصرفی بسیاری از نیروگاه‌ها بسیار گسترده است. این گستردگی

حل این مسئله ارائه می‌شود. در ادامه، نحوه استخراج تابع هزینه صرفه‌جویی در آب مصرفی تشریح می‌گردد. در انتها، روش مبتنی بر تئوری فازی جهت انتخاب پاسخ بهینه مرور می‌شود.



شکل ۳: بازه راندمان نیروگاه‌های مختلف

۳-۴ مدل‌سازی مسئله توزیع توان چندهدفه

در مدل پیشنهادی، دو هدف مختلف مورد توجه واقع شده است. کاهش هزینه تأمین بار به‌عنوان تابع هدف اول و کاهش مقدار آب مصرفی سیستم تولید به‌عنوان تابع هدف دوم انتخاب شده است. این تابع هدف به‌صورت زیر قابل تعریف است:

$$\text{Minimize } \alpha C + (1-\alpha)W \quad (10)$$

در رابطه فوق، C بیانگر هزینه تأمین بار و W بیانگر مقدار آب مصرفی سیستم تولید انرژی الکتریکی است. همچنین، α ضریب مقایسه دو تابع هدف مختلف است. این ضریب مقداری بین ۰ و ۱ دارد. با افزایش α ، اهمیت کاهش هزینه بیشتر شده و کاهش آب مصرفی در اولویت پایین‌تری قرار می‌گیرد. به این ترتیب، با انتخاب α برابر ۱، مسئله بدون توجه به آب مصرفی در پی کاهش هر چه بیشتر هزینه تأمین بار می‌گردد. بر عکس، با انتخاب α برابر ۰، هدف مسئله کاهش هر چه بیشتر آب مصرفی سیستم تولید خواهد بود. بدیهی است که با لحاظ مقدار ۱ برای پارامتر α ، این مدل قابل تبدیل به مدل سنتی توزیع بار اقتصادی است.

هزینه تأمین بار از رابطه ذیل قابل محاسبه است:

$$C = \sum_i a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (11)$$

در رابطه فوق، i بیانگر اندیس واحدهای تولید انرژی الکتریکی است. همچنین، P_i توان تولیدی واحد تولیدی i است. در نهایت، a_i ، b_i و c_i ضرایب تابع هزینه واحد تولیدی i است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این مقاله، تابع هزینه درجه ۲ برای مدل‌سازی هزینه تولید انرژی الکتریکی مورد استفاده واقع شده است. شایان ذکر است که تابع

$$1-\eta = \frac{HR - B + FG}{HR} \quad (4)$$

با جابه‌جایی پارامترهای رابطه (۴)، رابطه زیر قابل دستیابی است:

$$HR - B = HR * (1-\eta) - FG \quad (5)$$

با ترکیب روابط (۱) و (۵) می‌توان نتیجه گرفت:

$$I = A * HR * (1-\eta) - A * FG + C \quad (6)$$

با جایگذاری HR از رابطه (۲) در رابطه (۶)، رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$I = A * 3600 * \left(\frac{1}{\eta} - 1\right) - A * FG + C \quad (7)$$

با توجه به این که A و FG برای نیروگاه‌های با سیستم خنک‌کننده یکسان ثابت می‌باشند، بنابراین، رابطه زیر قابل حصول است:

$$I = \frac{k_1}{\eta} + k_2 \quad (8)$$

در رابطه اخیر، $k_1 = A * 3600$ و $k_2 = C - A * FG$ می‌باشند. با توجه به رابطه (۸) می‌توان به این نتیجه رسید که هر چه راندمان نیروگاه بالاتر باشد میزان آب مصرفی آن پایین‌تر خواهد بود. همچنین، با در اختیار داشتن میزان مصرف آب در راندمان مشخص برای نیروگاه معین، می‌توان میزان مصرف آن نوع نیروگاه در هر راندمان دیگر را از رابطه زیر به‌دست آورد:

$$I_2 = I_1 + k_1 * \left(\frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_1 * \eta_2}\right) \quad (9)$$

در این رابطه، I_1 میزان مصرف آب نیروگاه در راندمان η_1 و I_2 میزان مصرف آب نیروگاه در راندمان η_2 می‌باشد. با توجه به رابطه فوق، اگر میزان آب مصرفی یک نیروگاه با راندمان مشخص در دسترس باشد، میزان مصرف آب در راندمان‌های دیگر قابل محاسبه است. شکل ۳ بازه راندمان برخی نیروگاه‌های متداول را ارائه می‌کند [۱۸]. با استفاده از روابط فوق، با توجه به نوع نیروگاه و مشخص بودن راندمان آن، میزان آب مصرفی به‌ازای تولید یک مگاوات ساعت انرژی الکتریکی قابل محاسبه است. در ادامه، این مقاله نیز با بهره‌گیری از این روابط و مقادیر متداول ارائه‌شده در سایر مقالات به محاسبه نرخ آب مصرفی هر نیروگاه پرداخته شده است. نکته شایان توجه این است که موضوع اصلی مورد بحث در این مقاله به بهره‌گیری از پتانسیل سیستم تولید انرژی الکتریکی جهت صرفه‌جویی در آب مصرفی باز می‌گردد. لذا، استفاده از روش‌های دیگر جهت تخمین آب مصرفی نیروگاه یا استفاده از مقادیر دیگر خللی در مباحث ارائه‌شده در این مقاله وارد نمی‌سازد.

۳-توزیع توان چندهدفه

این بخش در ابتدا به ارائه روابط ریاضی مربوط به مسئله توزیع توان چندهدفه می‌پردازد. این مدل، بر خلاف مسئله توزیع اقتصادی توان که بر کاهش هزینه‌های بهره‌برداری متمرکز است، به مصالحه بین کاهش هزینه‌های تأمین بار سیستم و کاهش میزان آب مصرفی سیستم تولید می‌پردازد. سپس، توضیحات مختصری در خصوص روش

رابطه (۱۳) که تنها قید مساوی مسئله است با بهره‌گیری از ضریب لاگرانژ به تابع هدف فوق افزوده شده و تابع لاگرانژ مطابق رابطه زیر را تشکیل می‌دهد:

$$L = \alpha \left(\sum_i a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \right) + (1-\alpha) \times \left(\sum_i d_i P_i + e_i \right) + \lambda \left(D - \sum_i P_i \right) \quad (16)$$

در رابطه فوق، L و λ به ترتیب بیانگر تابع و ضریب لاگرانژ است. حال، با توجه به این که توابع خطی و درجه دو محدب هستند، حل مسئله مقید (۱۵) به شرط (۱۳) معادل با مسئله نامقید زیر است:

$$\text{Minimize } L \quad (17)$$

حل مسئله نامقید با مشتق‌گیری از تابع هدف نسبت به متغیرهای مسئله و برابر صفر قراردادن روابط مربوطه میسر است. با مشتق‌گیری از تابع لاگرانژ ارائه‌شده، روابط زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{\partial L}{\partial P_i} = 2\alpha a_i P_i + \alpha b_i + (1-\alpha)d_i - \lambda \quad (18)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = D - \sum_i P_i \quad (19)$$

با برابر صفر قراردادن دو رابطه مذکور، دستگاه معادلات خطی زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{cases} 2\alpha a_i P_i + \alpha b_i + (1-\alpha)d_i - \lambda & \forall i \\ D - \sum_i P_i \end{cases} \quad (20)$$

بنابراین، حل مسئله بهینه‌سازی مذکور با حل یک دستگاه معادلات خطی معادل شد. شایان ذکر است که ابعاد دستگاه معادلات خطی مذکور برابر با تعداد واحدهای تولیدی به علاوه یک بوده و ماتریس ضرایب آن بسیار تنگ خواهد بود. لذا، حل این دستگاه معادلات حتی برای سیستم‌های بسیار بزرگ به سهولت قابل انجام است. تنها نکته باقیمانده مربوط به محدودیت بازه مجاز تولید واحدهای تولیدی است. به منظور لحاظ این محدودیت بایستی روند تکراری زیر که در شکل ۴ ارائه شده در دستور کار قرار گیرد:

(۱) صرف‌نظر از محدودیت بازه مجاز تولید واحدهای تولیدی

(رابطه (۱۴)) و بهینه‌سازی تابع لاگرانژ

(۲) بررسی نقض یا عدم نقض محدودیت بازه مجاز تولید

واحدهای تولیدی و اعلام خاتمه فرآیند بهینه‌سازی در صورت عدم نقض محدودیت‌ها

(۳) تعیین واحدهایی که محدودیت بازه مجاز تولید آن‌ها نقض

شده، لحاظ مقدار مرزی محدودیت نقض‌شده به‌عنوان توان

تولیدی واحد مربوطه و ادامه فرآیند از مرحله ۱

در بالا، با به‌کارگیری روش لاگرانژ، حل مسئله توزیع توان

چندهدفه با استفاده از یک روش تکراری و حل یک دستگاه معادلات

ساده تشریح گردید. از خصوصیات این روش سادگی پیاده‌سازی و

درجه ۲ برای بیان هزینه واحدهای تولید انرژی الکتریکی بسیار متداول بوده و این انتخاب با توجه به ادبیات موضوع انجام شده است. مقدار آب مصرفی سیستم تولید انرژی الکتریکی از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$W = \sum_i d_i P_i + e_i \quad (12)$$

در این رابطه، d_i و e_i ضرایب تابع آب مصرفی واحد تولیدی i است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تابع خطی برای مدل‌سازی آب مصرفی واحدهای تولیدی مورد استفاده واقع شده است. این انتخاب با توجه به توضیحات ارائه‌شده در بخش قبلی صورت گرفته است. تابع هدف فوق بایستی با توجه به محدودیت تأمین بار مورد نیاز سیستم حل گردد. این محدودیت عبارت است از:

$$\sum_i P_i = D \quad (13)$$

در رابطه فوق، D بیانگر کل بار سیستم است. همان‌طور که در محدودیت فوق مشاهده می‌شود، مجموع توان تولیدی واحدهای تولیدی بایستی برابر با کل بار سیستم باشد.

علاوه بر محدودیت تأمین بار مورد نیاز سیستم، رعایت محدوده مجاز تولید توان برای کلیه واحدهای تولیدی مطابق رابطه زیر الزامی است:

$$\underline{P}_i \leq P_i \leq \overline{P}_i \quad (14)$$

در رابطه فوق، \underline{P}_i و \overline{P}_i به ترتیب مقادیر کمینه و بیشینه مجاز برای توان قابل تولید واحد تولیدی i است. مسئله فوق با یک تابع هدف و ۴ محدودیت در قالب برنامه‌ریزی با محدودیت درجه ۲ ارائه شده است. با جایگزین نمودن روابط (۹) و (۱۰) در تابع هدف، مسئله به یک مسئله بهینه‌سازی در قالب برنامه‌ریزی درجه ۲ با تابع هدف درجه ۲ و قیود خطی تبدیل می‌گردد. زیربخش بعدی روش حل این مسئله را تشریح می‌کند.

۳ روش حل مسئله توزیع توان چندهدفه

مسئله توزیع توان چندهدفه در زیربخش قبلی ارائه شد. همان‌طور که ذکر شد، قالب این مسئله برنامه‌ریزی درجه ۲ با تابع هدف درجه ۲ و قیود خطی است. روش‌های مختلفی برای حل مسئله با چنین قالبی وجود دارد. در این مقاله، روش لاگرانژ به‌منظور حل این مسئله مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای بهره‌گیری از روش لاگرانژ، ابتدا هزینه تأمین بار و آب مصرفی سیستم تولید با بهره‌گیری از روابط (۱۱) و (۱۲) جایگزین شده و رابطه زیر برای تابع هدف استخراج می‌شود:

$$\text{Minimize } \alpha \left(\sum_i a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \right) + (1-\alpha) \times \left(\sum_i d_i P_i + e_i \right) \quad (15)$$

و مقادیر مرحله ثبت‌شده در مرحله ۱ مقدار صرفه‌جویی در آب مصرفی و هزینه مربوطه را نتیجه می‌دهد.

۳) در مرحله سوم، مقدار ضریب α ارزیابی می‌شود. در صورتی که مقدار ضریب مذکور کمتر از ۱ است، فرآیند استخراج تابع از مرحله ۲ ادامه می‌یابد. در غیر این صورت، خاتمه فرآیند اعلام می‌گردد.

پس از طی فرآیند بالا و ثبت مقادیر مختلف مقدار صرفه‌جویی در آب مصرفی و هزینه مربوطه به‌ازای مقادیر مختلف ضریب α ، تابع هزینه صرفه‌جویی در آب حاصل می‌شود. همچنین، با رسم نقاط مذکور و برازش یک تابع مناسب بر روی این نقاط، تابع هزینه قابل حصول است.

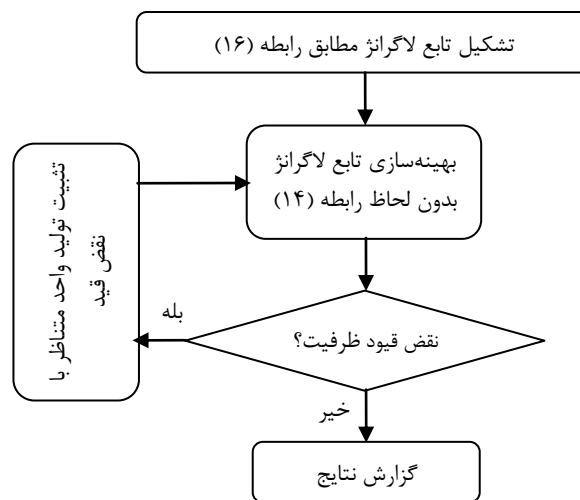
۴-۳ انتخاب پاسخ مناسب

مسئله توزیع توان چندهدفه در زیربخش‌های قبلی ارائه شد. همان‌طور که ذکر شد، این مسئله به‌ازای مقادیر مختلفی برای ضریب α قابل حل است. بدیهی است که انتخاب یک مقدار مناسب برای این ضریب به اولویت‌های بهره‌بردار سیستم در قبال کاهش هزینه‌های تأمین بار و آب مصرفی سیستم وابسته است. یک روش مرسوم برای انجام مصالحه مناسب بین توابع هدف مختلف در مسائل چند تابع هدف مختلف در سطح یا منحنی پرتو و مقایسه بین مقادیر توابع هدف مختلف در شرایط متفاوت است. در این مقاله، به‌منظور رسم منحنی پرتو، حل مسئله به‌ازای مقادیر مختلف برای ضریب α و در انتها رسم مقادیر دو تابع هدف موردنظر در دستور کار قرار گرفته است. چالش دیگر انتخاب از بین نقاط مختلف روی منحنی پرتو است. به این منظور، روش‌های مختلفی در ادبیات بهینه‌سازی چندهدفه ارائه شده است. روش فازی یکی از روش‌های مورد توجه بسیاری از محققین در سال‌های اخیر است. در این روش، تصمیم‌گیری و انتخاب پاسخ مناسب از بین نقاط مختلف روی منحنی پرتو طبق روند زیر انجام می‌گیرد:

۱) در این گام، یک حد مطلوب و یک حد نامطلوب برای هر تابع هدف انتخاب می‌شود. مقدار حد مطلوب بدترین مقداری است که رضایت کامل کاربر را به‌دنبال دارد. همچنین، مقدار حد نامطلوب بهترین مقداری است که به هیچ وجه رضایت کاربر را به‌دنبال ندارد. در این مقاله، بدون از دست رفتن کلیت، حد مطلوب و حد نامطلوب برای هر تابع هدف به‌ترتیب مقادیر متناظر با بهینه‌سازی صرف تابع هدف مذکور و بهینه‌سازی صرف تابع هدف دیگر لحاظ شده است.

۲) در این مرحله، یک تابع عضویت اکیداً نزولی بین حدود مطلوب و نامطلوب برای هر یک از توابع هدف موردنظر لحاظ می‌شود. مقدار تابع عضویت در نقطه متناظر با حد مطلوب و نامطلوب به‌ترتیب برابر ۱ و ۰ فرض می‌شود. شکل ۵ یک تابع عضویت نمونه را ارائه می‌کند. در این شکل،

قابلیت لحاظ کمینه‌سازی آب مصرفی سیستم تولید به‌عنوان یکی از توابع هدف قابل عنوان است.



شکل ۴: فلوچارت روش حل مسئله توزیع توان چندهدفه

۴-۳ استخراج تابع هزینه صرفه‌جویی آب مصرفی

در بخش قبل، مدل‌سازی و روند حل مسئله توزیع توان چندهدفه تشریح گردید. در این مسئله، کمینه‌سازی هزینه تأمین بار و مقدار آب مصرفی به‌عنوان دو تابع هدف ناسازگار مورد توجه واقع شد. به‌منظور مدل‌سازی رفتار بهره‌بردار سیستم در مصالحه بین هزینه تأمین بار و مقدار آب مصرفی، ضریب α در تابع هدف لحاظ شد. لیکن، انتخاب این ضریب فرآیند پیچیده‌ای داشته به مسائل متعددی نظیر وضعیت آب‌های زیرزمینی وابسته است. همچنین، با توجه به تغییر بسیاری از شرایط اثرگذار غیرقابل کنترل نظیر میزان بارندگی سالانه، مقدار این ضریب در شرایط مختلف متفاوت است. لذا، این بخش روندی برای استخراج تابعی برای هزینه تأمین بار سیستم بر حسب مقدار آب مصرفی ارائه می‌کند. با بهره‌گیری از این تابع، بهره‌بردار قادر به تصمیم‌گیری در خصوص مصالحه بین هزینه تأمین بار سیستم و مقدار آب مصرفی است. به‌منظور استخراج تابع مذکور، روند تکراری زیر در دستور کار قرار می‌گیرد:

۱) در این مرحله، مقدار α برای ضریب α در نظر گرفته شده و مسئله توزیع توان چندهدفه حل می‌شود. بدین ترتیب، کمترین مقدار آب مورد نیاز جهت تأمین بار سیستم محاسبه می‌شود. در انتهای این مرحله، هزینه تأمین بار و آب مورد نیاز مربوطه ثبت می‌شود.

۲) در این مرحله، با افزایش ضریب α با یک گام از پیش تعیین شده (به‌عنوان نمونه ۰/۱)، مسئله توزیع توان چندهدفه حل شده و هزینه تأمین بار و آب مورد نیاز مربوطه ثبت می‌شود. تفاضل مقادیر ثبت‌شده در این مرحله

مدل سنتی توزیع اقتصادی توان به هزینه‌ای معادل ۸۱۴۲۱ دلار منجر می‌شود. در این حالت، بیش از ۲۸۶ هزار مترمکعب آب توسط سیستم تولید مصرف می‌شود. در صورت بهره‌گیری از مدل پیشنهادی و برقراری مصالحه بین هزینه و آب مصرفی، مقدار آب مصرفی به حدود ۱۵۲ هزار مترمکعب کاهش می‌یابد. این کاهش در حدود ۴۷ درصد است. این کاهش چشم‌گیر در آب مصرفی با افزایشی در حدود ۵۰۰۰ دلار (از حدود ۸۱ هزار دلار به حدود ۸۶ هزار دلار) حاصل شده است. به عبارت دیگر، دستیابی به ۴۷ درصد کاهش در آب مصرفی با افزایشی در حدود ۶ درصد در هزینه حاصل شده است. با بهره‌گیری از مدل ارائه‌شده برای کاهش حداکثری آب مصرفی سیستم، مقدار بیشینه صرفه‌جویی قابل تصور در حدود ۱۳۵ هزار مترمکعب حاصل می‌شود. این صرفه‌جویی چشم‌گیر با افزایش حدوداً ۸۰۰۰ دلاری در هزینه همراه است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل ارائه‌شده مصالحه مناسبی بین هزینه و آب مصرفی برقرار نموده است.

جدول ۳: هزینه و آب مصرفی سیستم در حالات مختلف به‌ازای بار بیشینه

تابع هدف	هزینه (دلار)	آب مصرفی (مترمکعب)
مصالحه بین آب مصرفی و هزینه	۸۶۶۴۰	۱۵۲۲۷۰
کاهش هزینه	۸۱۴۲۱	۲۸۶۱۹۰
کاهش آب مصرفی	۸۹۶۲۳	۱۵۱۶۳۰

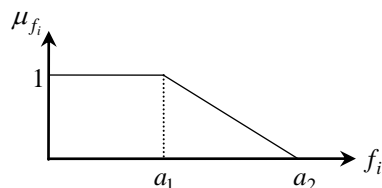
جدول ۴ میزان پتانسیل صرفه‌جویی در آب مصرفی و هزینه مربوطه را در شرایط بیشینه بار، میان‌باری و کم‌باری ارائه می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش بار، پتانسیل صرفه‌جویی در آب مصرفی سیستم تولید افزایش می‌یابد. البته، این افزایش پتانسیل با افزایش هزینه تولید همراه است. هزینه صرفه‌جویی در یک مترمکعب آب مصرفی سیستم در میان‌باری و بیشینه بار به ترتیب برابر ۰/۰۵۲ و ۰/۰۶۱ دلار است. نکته قابل توجه دیگر این‌که در کم‌باری، پتانسیل صرفه‌جویی در آب مصرفی سیستم تولید ناچیز است. این مقدار ناچیز به مقادیر کمینه تولید واحدهای تولیدی که تقریباً با بار برابر است باز می‌گردد. در واقع، در کم‌باری، مقدار تولید قریب به اتفاق واحدهای تولیدی برابر با کمینه توان واحد بوده و در نتیجه فضایی برای تغییر تولید و در نتیجه مصالحه بین آب مصرفی و هزینه وجود ندارد.

جدول ۴: تغییرات هزینه و آب مصرفی در شرایط باری مختلف

شاخص	شرایط بار		
	کم‌باری	میان‌باری	بیشینه بار
صرفه‌جویی در آب مصرفی (درصد)	۰	۳۷	۴۷
افزایش هزینه (درصد)	۰	۷/۵۶	۱۰/۱

جدول ۵ میزان صرفه‌جویی در آب مصرفی و هزینه مربوطه را در کم‌باری، میان‌باری و بیشینه بار با فرض $\alpha = 0/5$ ارائه نموده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل ارائه‌شده در دو شرایط میان‌باری و بیشینه بار، به‌طور مناسبی بین آب مصرفی و هزینه مصالحه برقرار می‌کند. همچنین، همان‌طور که قابل پیش‌بینی بود، مدل ارائه‌شده قادر به برقراری مصالحه در شرایط کم‌باری نیست.

مقادیر a_1 و a_2 به ترتیب حد مطلوب و حد نامطلوب تابع هدف f_i را بیان می‌کنند.

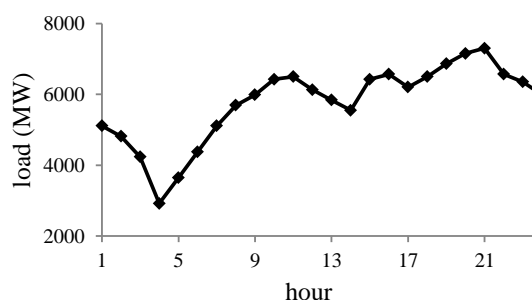


شکل ۵: یک تابع عضویت فازی نمونه

در این مرحله، درجه عضویت مقادیر متناظر با توابع هدف مختلف در هر نقطه از منحنی پرتو تعیین شده و میزان مطلوبیت هر نقطه از سطح پرتو با تجمیع درجه عضویت متناظر با توابع هدف مختلف تعیین می‌گردد. در انتها، نقطه متناظر با بیشترین میزان مطلوبیت به‌عنوان نقطه بهینه معرفی می‌گردد.

۴ نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، سیستم تولید متصل به شبکه استاندارد ۱۱۸ باسه IEEE مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج حاصله ارائه می‌شود. این سیستم متشکل از ۱۰۹ واحد نیروگاهی است. ظرفیت کوچکترین و بزرگترین واحدهای این سیستم به ترتیب ۲۰ و ۴۲۰ مگاوات است. همچنین، کل ظرفیت سیستم بیش از ۱۰۶۵۰ مگاوات است. در این مطالعات، بار ساعتی سیستم برای یک بازه زمانی یک روزه مورد مطالعه و ارزیابی واقع شده است. بر اساس اطلاعات مورد استفاده، کمینه و بیشینه بار سیستم به ترتیب برابر ۲۹۲۰ و ۷۳۰۰ مگاوات است. به عبارتی، ظرفیت ذخیره سیستم در پیک بار مورد توجه در این مقاله بیش از ۳۰۰۰ مگاوات (معادل ۳۱٪ کل ظرفیت نصب‌شده سیستم) است. شکل ۶ پروفیل بار روزانه سیستم مورد مطالعه را ترسیم می‌کند.



شکل ۶: پروفایل بار روزانه سیستم مورد مطالعه

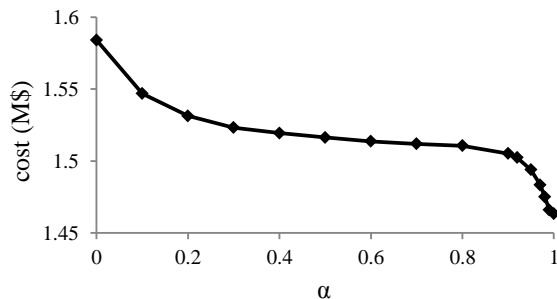
در ابتدا، مدل ارائه‌شده در بخش ۳ با لحاظ $\alpha = 0/5$ برای ساعت پیک بار شبیه‌سازی شده است. جدول ۳ نتایج حاصله را با نتایج مطالعات سنتی توزیع اقتصادی توان (معادل لحاظ $\alpha = 1$) و حالتی از مطالعات با هدف کاهش آب مصرفی سیستم (معادل لحاظ $\alpha = 0$) مقایسه نموده است. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، حل

پیشنهادی، هزینه صرفه‌جویی در آب مصرفی سیستم تولید به‌ازای یک مترمکعب به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد.

جدول ۶: هزینه و آب مصرفی روزانه سیستم در شرایط باری مختلف

تابع هدف	هزینه (دلار)	آب مصرفی (مترمکعب)
مصلحه بین آب مصرفی و هزینه	۱۵۱۶۴۱۷	۳۴۸۶۴۴۰
کاهش هزینه	۱۴۶۳۳۶۰	۵۳۶۹۱۶۰
کاهش آب مصرفی	۱۵۸۳۹۹۱	۳۴۷۴۸۷۰

همان‌طور که از نتایج ارائه‌شده بر می‌آید، نتیجه مصالحه بین آب مصرفی و هزینه به مقدار α وابسته است. شکل‌های ۸ و ۹ به مقایسه هزینه و آب مصرفی سیستم به‌ازای مقادیر مختلف α می‌پردازد. مطابق انتظار، با افزایش ضریب مذکور، هزینه و آب مصرفی به‌ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تغییر کمی در مقدار این ضریب در بازه‌های ابتدایی و انتهایی محدوده مجاز به‌طور چشم‌گیری بر روی هزینه سیستم اثر می‌گذارد. لیکن، در بازه‌های میانی حول مقدار $0/5$ ، مقدار هزینه چندان به تغییر در مقدار ضریب وابسته نیست. از دیگر سو، مقدار آب مصرفی سیستم به‌ازای مقادیر کوچکتر از $0/8$ برای ضریب تغییر چندان نمی‌کند. به‌ازای مقادیر بزرگتر از $0/8$ ، مقدار آب مصرفی به‌طور چشم‌گیری با افزایش ضریب α افزایش می‌یابد. با بررسی روند این دو تابع، در بازه بین صفر و $0/8$ ، انتخاب مقدار $0/8$ برای این ضریب کاملاً عاقلانه محسوب می‌شود. در بازه مقادیر بزرگ‌تر از $0/8$ ، صرفه‌جویی در آب مصرفی سیستم با افزایش قابل ملاحظه‌ای در هزینه همراه خواهد بود.



شکل ۸: هزینه سیستم بر حسب مقادیر مختلف ضریب α

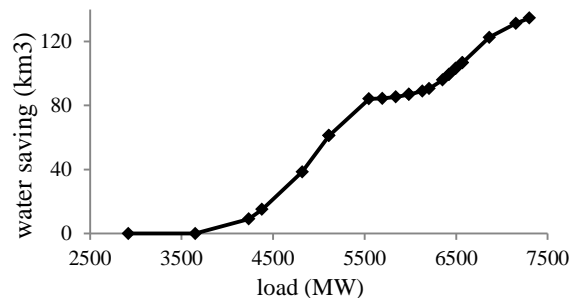
در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، رسم منحنی پرتو دید مناسبی از مصالحه بین توابع هدف مختلف ارائه می‌نماید. شکل ۱۰ منحنی پرتو مربوط به ناحیه پاسخ مسئله تحت بررسی را ارائه می‌نماید. همان‌طور که در این منحنی مشاهده می‌شود، انتخاب مقادیر کوچک برای α متناظر با افزایش چشم‌گیر هزینه است. همچنین، انتخاب مقدار واحد برای این پارامتر موجب افزایش بی‌رویه آب مصرفی سیستم می‌گردد. با توجه به روند افزایش هزینه‌ها با کاهش پارامتر α ، انتخاب مقادیری در حدود $0/8$ الی $0/97$ منطقی به نظر می‌رسد. شایان ذکر است که انتخاب مقدار $0/97$ برای پارامتر مذکور موجب کاهش آب مصرفی از $5/33$ میلیون مترمکعب به $3/96$ میلیون مترمکعب شده، حال آن‌که هزینه‌های تأمین بار سیستم تنها در حدود $1/4$ درصد افزایش می‌یابد. با بهره‌گیری از روش فازی ارائه‌شده در بخش ۳-۴

جدول ۵: آب قابل صرفه‌جویی و هزینه مربوطه در شرایط باری مختلف

شاخص	شرایط بار		
	کم‌باری	میان‌باری	بیشینه بار
صرفه‌جویی در آب مصرفی (درصد)	۰	۳۶/۹	۴۶/۸
افزایش هزینه (درصد)	۰	۳/۱	۶/۴

همان‌طور که از نتایج جدول ۵ بر می‌آید، پتانسیل صرفه‌جویی آب قابل توجهی در سیستم تولید وجود دارد. لیکن، دستیابی به این پتانسیل با افزایش هزینه تأمین بار سیستم همراه است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان آب صرفه‌جویی‌شده در زمان بار بیشینه بیشتر است. البته، این صرفه‌جویی بیشتر با هزینه تأمین بار بیشتری نیز همراه است.

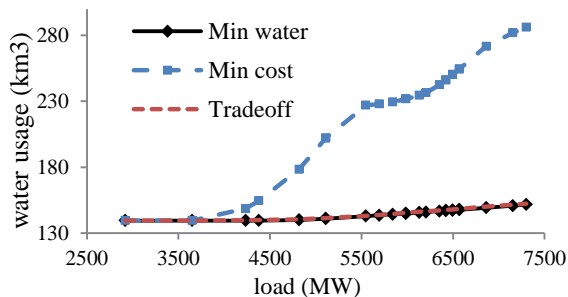
شکل ۷ مقدار آب قابل صرفه‌جویی سیستم را به‌صورت تابعی از بار سیستم (از مقدار کمینه تا بیشینه بار) ارائه می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش بار، پتانسیل صرفه‌جویی در آب مصرفی سیستم افزایش می‌یابد. این روند غیرخطی بوده و در بازه‌هایی از بار با شیب کمتر و در برخی بازه‌های دیگر با شیب بیشتر تغییر می‌کند.



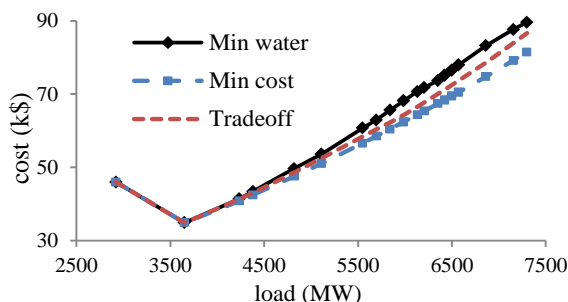
شکل ۷: آب قابل صرفه‌جویی سیستم بر حسب بار سیستم

مدل ارائه‌شده برای کلیه ساعات روز مورد مطالعه مورد شبیه‌سازی قرار گرفته و نتایج حاصله در جدول ۶ ارائه شده است. در این جدول، سه حالت مختلف معادل $\alpha = 0$ ، $\alpha = 0/5$ و $\alpha = 1$ شبیه‌سازی شده است. با توجه به نتایج ارائه‌شده در جدول ۶، حداکثر مقدار آب قابل صرفه‌جویی در طول روز برابر 1894290 مترمکعب است. این مقدار صرفه‌جویی معادل 35 درصد از آب مصرفی سیستم در مطالعات سنتی است. لیکن، دستیابی به این پتانسیل با افزایشی در حدود 121 هزار دلار همراه است. این افزایش در هزینه‌ها تقریباً معادل 8 درصد هزینه سیستم در مطالعات سنتی است. به‌عبارت دیگر، به‌طور متوسط، هر مترمکعب صرفه‌جویی در آب مستلزم 6 سنت افزایش در هزینه‌های تولید است. به‌کارگیری مدل ارائه‌شده به‌منظور ایجاد مصالحه بین آب مصرفی و هزینه به نتایج مطلوبی انجامیده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با بهره‌گیری از این مدل، آب مصرفی سیستم در حدود 1882720 مترمکعب معادل حدوداً 35 درصد از آب مصرفی سیستم در مطالعات سنتی کاهش می‌یابد. این کاهش در آب مصرفی با افزایش 53 هزار دلاری در هزینه‌ها همراه است. به‌عبارت دیگر، با مصالحه بین آب مصرفی و هزینه، هزینه صرفه‌جویی یک مترمکعب آب کمتر از 3 سنت است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با بهره‌گیری از مدل

نیست. نکته آخر این‌که با افزایش بار، هزینه سیستم به‌طور تقریباً خطی افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱: آب مصرفی سیستم بر حسب بار در حالات مختلف

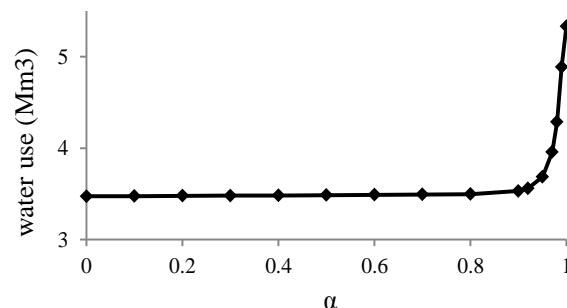


شکل ۱۲: هزینه سیستم بر حسب بار در حالات مختلف

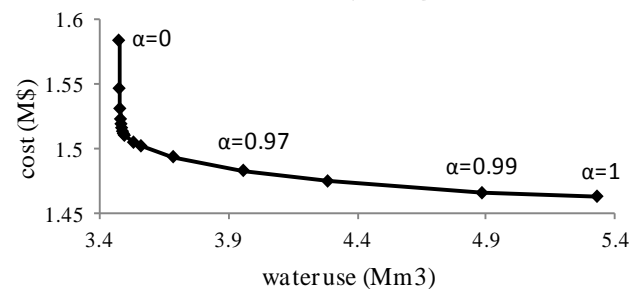
شکل ۱۳ تابع هزینه صرفه‌جویی آب مصرفی سیستم را به‌ازای بار بیشینه ارائه می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هزینه صرفه‌جویی یک مترمکعب آب با افزایش مقدار صرفه‌جویی افزایش می‌یابد. این روند در ابتدا رفتار خطی داشته و هزینه مربوطه به‌طور خطی و با شیب ملایمی افزایش می‌یابد. لیکن، پس از صرفه‌جویی مقدار قابل‌ملاحظه‌ای از آب قابل صرفه‌جویی، شیب افزایش هزینه به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد. این افزایش به‌نحوی است که هزینه صرفه‌جویی یک مترمکعب آب در انتهای بازه حدوداً ۲۰ برابر بیشتر از مقدار مربوط به ابتدای بازه است. با مشاهده این روند می‌توان نتیجه گرفت که دستیابی به کل پتانسیل صرفه‌جویی در آب مصرفی بسیار هزینه‌بر بوده، لیکن دستیابی به بخش عمده‌ای از آن با صرف هزینه منطقی میسر است.

شکل ۱۴ تابع هزینه صرفه‌جویی آب در طول روز را ارائه می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تابع مذکور روند افزایشی دارد. به‌عبارت دیگر، دستیابی به مقدار آب صرفه‌جویی شده بیشتر تنها با صرف هزینه حاشیه‌ای بیشتر میسر است. در ابتدای روند، تابع هزینه صرفه‌جویی آب رفتار خطی با شیب نسبتاً ملایمی دارد. لیکن، پس از دستیابی به بخش اعظمی از پتانسیل آب قابل صرفه‌جویی، شیب افزایش هزینه‌ها به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، هزینه حاشیه‌ای ناشی از صرفه‌جویی یک مترمکعب آب مصرفی سیستم در انتهای بازه در حدود ۸ برابر مقدار این پارامتر در ابتدای بازه است. اگرچه این رشد در هزینه حاشیه‌ای قابل توجه است، لیکن در مقایسه با رفتار هزینه حاشیه‌ای در بار بیشینه بسیار هموارتر و قابل

برای انجام مصالحه بین دو تابع هدف هزینه و آب مصرفی، مقدار مناسب پارامتر α برابر ۰/۹۵، آب مصرفی و هزینه سیستم به‌ترتیب معادل ۳/۶۹ میلیون مترمکعب و ۱/۴۹ میلیون دلار است.



شکل ۹: آب مصرفی سیستم بر حسب مقادیر مختلف ضریب α



شکل ۱۰: منحنی پرتو سیستم تحت مطالعه

شکل ۱۱ مقدار آب مصرفی سیستم تولید را بر حسب مقدار بار به‌ازای سه حالت کمترین هزینه، مصالحه بین هزینه و آب مصرفی و کمترین آب مصرفی ارائه می‌کند. با توجه به شکل ۱۱، آب مصرفی در دو حالت متناظر با کمترین آب مصرفی و مصالحه بین هزینه و آب مصرفی در تمام مقادیر بار تقریباً یکسان است. لیکن، مقدار آب مصرفی سیستم در حالت متناظر با کمترین هزینه بسیار بیشتر از آب مصرفی در دو حالت دیگر است. نکته قابل‌توجه این‌که در شرایط کم‌باری، آب مصرفی در هر سه حالت شبیه‌سازی شده برابر بوده و اختلاف بین حالات با افزایش بار به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد. نکته قابل‌توجه دیگر به رفتار غیرخطی بین آب مصرفی سیستم و مقدار بار سیستم باز می‌گردد.

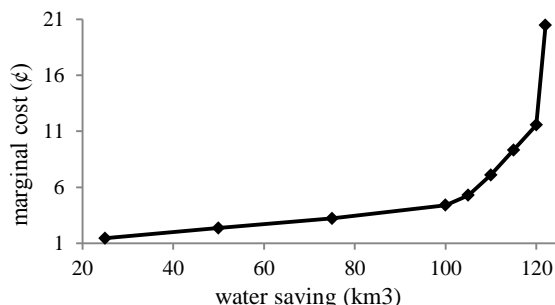
شکل ۱۲ هزینه بهره‌برداری از سیستم تولید را بر حسب مقدار بار به‌ازای سه حالت کمترین هزینه، مصالحه بین هزینه و آب مصرفی و کمترین آب مصرفی ارائه می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ابتدا، با افزایش بار سیستم، هزینه تأمین بار کاهش می‌یابد. این مهم به ضرایب توابع هزینه تولید واحدهای تشکیل‌دهنده سیستم تولید باز می‌گردد. پس از تجربه مقدار کمینه هزینه، افزایش بار با افزایش چشم‌گیر هزینه همراه می‌گردد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حالت متناظر با کمترین آب مصرفی به هزینه بیشتری می‌انجامد. بدیهی است که کمترین هزینه در حالت متناظر با کمترین هزینه قابل مشاهده است. هر چند افزایش بار سیستم با افزایش هزینه همراه است، تفاوت بین هزینه در سه حالت شبیه‌سازی شده چندان چشم‌گیر

خود قرار داده است. به این منظور، مدل سنتی توزیع بار اقتصادی توسعه‌یافته و کاهش آب مصرفی به‌عنوان تابع هدف دوم در آن لحاظ شده است. مصالحه بین دو تابع هدف کمترین هزینه و کمترین آب مصرفی با در نظر گرفتن مجموع موزون آن‌ها در تابع هدف انجام شده است. پس از توسعه مدل، قابلیت آن بر روی سیستم تولید متصل به شبکه استاندارد ۱۱۸ باسه IEEE ارزیابی شد. با توجه به نتایج ارائه‌شده، پتانسیل آب قابل صرفه‌جویی چشم‌گیر بوده لیکن با صرف هزینه بیشتر میسر است. همچنین، با صرفه‌جویی هر چه بیشتر در آب مصرفی، هزینه حاشیه‌ای مربوطه افزایش می‌یابد. لیکن، بخش عمده‌ای از این پتانسیل با صرف هزینه منطقی قابل دستیابی است. با توجه به نتایج، صرفه‌جویی در آب مصرفی سیستم در زمان‌های متناظر با بار بیشینه هزینه بیشتری را به‌دنبال دارد. پتانسیل صرفه‌جویی نیز در ساعات متناظر با بار بیشینه کمتر از مقدار مربوط به ساعات میان‌باری است.

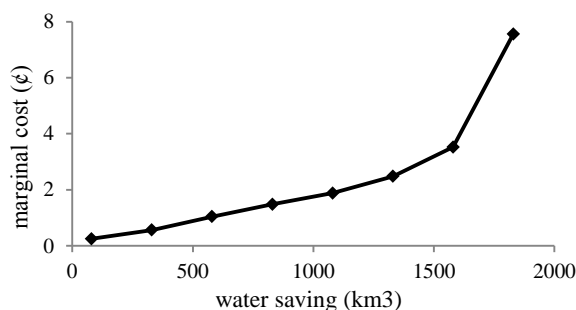
مراجع

- [1] P. H. Gleick, "Water and energy," *Annual Review of Energy and the Environment*, vol. 19, pp. 267-299, 1994.
- [2] K. Averyt, J. Fisher, A. Huber-Lee, A. Lewis, J. Macknick, N. Madden, J. Rogers and S. Tellinghuisen, "Freshwater use by U.S. power plants: electricity's thirst for a precious resource", *A report of the Energy and Water in a Warming World initiativeRep.* Union of Concerned Scientists, Cambridge, MA, 2011.
- [3] T. J. Feeley, T. J. Skone, G. J. Stiegel, A. McNemar, M. Nemeth and B. Schimmoller, "Water: a critical resource in the thermoelectric power industry," *Energy*, vol. 33, pp. 1-11, 2008.
- [4] R. Mendelsohn, "Global warming and the American economy: a regional assessment of climate change impacts" Edward Elgar Publishing, 2001.
- [5] P. Kirshen, M. Ruth and W. Anderson, "Interdependencies of urban climate change impacts and adaptation strategies: a case study of Metropolitan Boston USA," *Climatic Change*, vol. 86, pp. 105-122, 2008.
- [6] H. Koch and S. Vögele, "Dynamic modelling of water demand, water availability and adaptation strategies for power plants to global change," *Ecological Economics*, vol. 68, pp. 2031-2039, 2009.
- [7] V. Fthenakis and H. C. Kim, "Life-cycle uses of water in US electricity generation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 2039-2048, 2010.
- [8] H. Koch and S. Vögele, "Dynamic modelling of water demand, water availability and adaptation strategies for power plants to global change," *Ecological Economics*, vol. 68, pp. 2031-2039, 2009.
- [9] عباس ربیعی و مرتضی محمدی، «پخش بار بهینه احتمالی مقید به پایداری گذرا: رهیافت برنامه‌ریزی تصادفی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵.
- [10] فرید محمدی، حمدی عبدی و احسان دهنوی، «حل مسئله توزیع بار اقتصادی هزینه-آلودگی دینامیک همراه با برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری بهینه تحت قیود اثر نقطه-دریچه و ذخیره چرخان»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵.
- [11] J. Barcel, E. Codina, J. Casas, J. L. Ferrer and D. Garca, "A review of operational water consumption and withdrawal factors

پیش‌بینی تر است. با مقایسه توابع هزینه صرفه‌جویی آب مصرفی در بار بیشینه و در طول روز، صرفه‌جویی در آب مصرفی در بازه‌های زمانی متناظر با ساعات بار بیشینه در مقایسه با سایر زمان‌ها بسیار هزینه‌بر است.



شکل ۱۳: تابع هزینه صرفه‌جویی آب مصرفی در بار بیشینه



شکل ۱۴: تابع هزینه صرفه‌جویی آب مصرفی در طول روز

با توجه به نتایج و مباحث ارائه‌شده، پتانسیل ذخیره‌سازی آب مصرفی بسیار مناسبی در سیستم‌های تولید انرژی الکتریکی در دسترس است. در صورت کمبود ظرفیت نصب‌شده، این پتانسیل در ساعات متناظر با پرباری سیستم کمتر است. همچنین، با بهره‌گیری از یک سیستم با ظرفیت بالا، پتانسیل صرفه‌جویی در آب مصرفی سیستم در ساعات متناظر با کم‌باری چندان قابل‌توجه نخواهد بود. لیکن، تمرکز بر بازه‌های طولانی‌مدت شامل دوره‌های زمانی متناظر با میان‌باری میزان آب قابل صرفه‌جویی چشم‌گیری را فراهم می‌کند. همچنین، در سیستم‌هایی که ظرفیت آن‌ها متناسب با بار سیستم بوده و پروفیل بار تغییرات کمتری را تجربه می‌کند، آب قابل صرفه‌جویی شایان توجه خواهد بود. اگرچه مقدار آب قابل صرفه‌جویی چشمگیر است، لیکن دستیابی به آن تنها با صرف هزینه بیشتر میسر است. این هزینه در زمان بار بیشینه بیشتر و در زمان‌های متناظر با کم‌باری و میان‌باری کمتر است. همچنین، هزینه مذکور با افزایش صرفه‌جویی افزایش می‌یابد.

۵- نتیجه

این مقاله صرفه‌جویی در آب مصرفی سیستم تولید و به‌کارگیری واحدهایی که آب کمتری برای تولید انرژی الکتریکی مصرف می‌کنند را به‌عنوان یک راه‌کار کوتاه‌مدت برای کاهش آب مصرفی در دستور کار

- [15] A. Delgado and H. J. Herzog, "A simple model to help understand water use at power plants," *Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA*, 2012.
- [16] J. Macknick, R. Newmark, G. Heath and K. Hallett, "A review of operational water consumption and withdrawal factors for electricity generating technologies," *Contract*, vol. 303, pp. 275-300, 2011.
- [17] M. V. Hoeven, *World Energy Outlook 2012*, Paris: International Energy Agency, 2012.
- [18] L. Honorio, *Efficiency in Electricity Generation*, Union of the Electricity Industry – EURELECTRIC, VGB, 2003.
- for electricity generating technologies," NREL, Golden, CO, USA, Tech. Rep. NREL/TP-6A20-5090, 2011.
- [12] J. Macknick, R. Newmark, G. Heath and K. C. Hallett, "Operational water consumption and withdrawal factors for electricity generating technologies: a review of existing literature," *Environmental Research Letters*, vol. 7, no. 4, p. 045802, 2012.
- [13] P. Torcellini, N. Long and R. Judkoff, "Consumptive water use for U.S. power production," Natl. Renew. Energy Lab., Golden, CO, USA, Tech. Rep., 2003.
- [14] M. J. Rutberg, *Modeling Water use at Thermoelectric Power Plants*, M.S. thesis, Mass. Inst. Technol., Cambridge, MA, USA, 2012.