مطالعه‌ی هزینه فایده‌ی میزان آب مصرفی نیروگاه‌ها روی هزینه‌ی بهره‌برداری از شبکه‌های قدرت

سبحان بدخشان[۱]
[۱]دانشگاه صنعتی شریف
Badakhshan_sobhan@ee.sharif.edu

مهدی گنج خانی[۲]
[2]دانشگاه صنعتی شریف
Ganjkhani_mehdi@ee.sharif.ir

امیر صفدریان[3]
[3]دانشگاه صنعتی شریف
Safdarian@sharif.edu

محمود فتوحی فیروزآباد[۴]
[۴]دانشگاه صنعتی شریف
Fotuhi@sharif.edu

چکیده - در این مقاله، روشی برای بررسی اثر میزان مصرف آب بر روی هزینه‌ی بهره‌برداری در سیستم‌های قدرت پیشنهاد شده است. همواره حجم عمده‌ای از آب‌های زیر زمینی در صنایع مختلف مصرف می‌شوند. از جمله‌ی این صنایع نیروگاه‌های تولید برق می‌باشند که هر روزه برای تولید انرژی الکتریکی حجم قابل توجهی از آب را مصرف می‌کنند. آب مصرفی هر نیروگاه با توجه به ساختار و نوع سوخت مصرفی، متفاوت خواهد بود. در این مقاله، با استفاده از مدل محاسبه‌ی آب مصرفی نیروگاه‌های مختلف و وارد کردن میزان مصرف آب نیروگاه‌ها در مساله‌ی برنامه‌ریزی مشارکت واحدهای تولید با قیود امنیتی، علاوه بر حداقل کردن هزینه تولید واحدها، اثر میزان آب مصرف شده در نیروگاه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. این روش خطی بوده و در نهایت روند اثر کاهش مصرف آب در تولید برق بر روی هزینه‌های اضافی تحمیل شده در بهره‌برداری از شبکه برق را به تصویر می‌کشد. با استفاده از مطالعات صورت گرفته در این مقاله، میزان مناسب آب قابل صرفه‌جویی در کوتاه مدت با نوجه به هزینه‌ی تحمیلی مربوط به صنعت برق تعیین می‌شود.

***کلمات کلیدی*- برنامه ریزی مشارکت واحدها، صرفه جویی آب ،مصرف آب ، نیروگاه‌های حرارتی**

پارامتر	توضیح
T	*ساعات دوره برنامه ریزی شده*
i	*ایندکس واحد تولید*
t	*ایندکس زمان*
G	*شاخص نیروگاه های گازی*
M	*شاخص خطوط انتقال نیرو*
r, q	*شاخص باس در شبکه انتقال نیرو*
b_i	*ضریب خطی هزینه واحد* i
c_i	*ضریب ثابت هزینه واحد* i *برحسب* [$/h]
e	*ساعاتی که واحد روشن است*
o	*ساعاتی که واحد خاموش است*
$y_{i,t}$	*نشانگر باینری شروع*
$z_{i,t}$	*نشانگر باینری پایان*

زاویه شیفت فاز	γ
توان جاری در خط b [MW]	Pf_b
محدودیت توان جاری در خط b [MW]	Pf_m^{max}
هزینه سوخت واحدتولیدی i*ام*.[$/MBtu]	λ_i
تولید برنامه ریزی شده واحد i*ام در زمان* t [MW]	$P_{i,t}$
تولید پیش بینی شده واحد i*ام در زمان* t [MW]	$P_{D,t}$
ماکزیمم و مینیمم مصرف سوخت واحد i [MW]	$P_{i,min}$,$P_{i,max}$
هزینه خاموشی واحد i *در زمان* t [$]	$SD_{i,t}$
هزینه روشن کردن واحد i *در زمان* t [$]	$ST_{i,t}$
هزینه تلفات بار[S/MWh]	ρ
ماکزیمم مصرف سوخت کل[kcf]	F^{totmax}
ماکزیمم مصرف سوخت واحد i*ام*[kcf]	F_i^{max}
میزان آب مصرفی نیروگاه بر حسب $[\frac{L}{kWh}]$	I
حجم آب مصرف شده برای هر واحد	$W_{i,t}$
حداکثر محدودیت آب مصرفی اصلاح شده	W_{mod}

۱. مقدمه

امروزه مساله‌ی کم‌آبی تنها نیازهای شرب و کشاورزی در جهان را متاثر نکرده است، بلکه صنایع مختلف نیز از این بحران در امان نمانده‌اند. مقدار قابل توجهی از آب مورد نیاز بخش صنعت در نیروگاه‌های تولید انرژی الکتریکی مصرف می‌شود. وابسنگی نیروگاه‌ها به آب حدی است که کمبود آب در برخی موارد موجب توقف فعالیت نیروگاه‌ها می‌شود. از آنجا که هیچ‌یک از فعالیت‌های تولیدی بدون حضور برق امکان‌پذیر نیست، ارایه‌ی یک راه حل مفید برای جلوگیری از این بحران و بهینه سازی مصرف آب در نیروگاه‌ها، علاوه بر کاهش مصرف آب و کاهش هزینه‌های ناشی از آن می تواند به حفظ منابع آبی و کاهش آلودگی‌های آن کمک کند. با توجه به لزوم دسترسی نیروگاه‌ها به آب کافی، اهمیت

کمبود آب برای نیروگاه‌ها را میتوان معادل محدودیت کمبود سوخت برای آنها توصیف کرد. مشکلات نیروگاه‌ها در تولید انرژی الکتریکی ناشی از کمبود منابع آبی در سال‌های اخیر خودگواهی بر این ادعا است.

در تحقیقات انجام شده در مرجع [۱] آب مورد نیاز برای بخش‌های مختلف تولید انرژی الکتریکی در یک نیروگاه از قبیل استخراج سوخت، تاسیسات، بهره برداری و نگهداری آن مورد مطالعه قرار گرفته است.

مرجع [۲] استفاده از انواع مختلف سیستم‌های خنک‌کننده در ایالات متحده‌ی آمریکا را مورد بررسی قرار داده است. بر اساس فرضیات در نظر گرفته شده در این مطالعه، میزان آب مورد نیاز نیروگاه‌ها در سال ۲۰۳۰ برابر مقدار آن در حال حاضر بوده و یا در بهترین شرایط ۳۰ درصد کاهش خواهد یافت. میزان منابع آب در دسترس در این مقاله در نظر گرفته نشده است.

اثر تغییرات آب و هوایی بر روی میزان مصرف آب نیروگاه‌ها در مراجعی از قبیل [۳]، [۴] و [۵] مورد بررسی قرار گرفته است. مرجع [3]به طور مختصر افزایش تلفات مصرف آب به دلیل شرایط آب و هوایی را نشان می‌دهد. مرجع [۴] افزایش تقاضای آب برای نیروگاه‌های با سوخت فسیلی و افزایش بارهای حرارتی برای آب‌های سطحی به دلیل افزایش تقاضای آب در شهر بوستون را تخمین زده است. مرجع [۵] توابع یکپارچه و پیچیده‌ای برای محاسبه‌ی آب مورد نیاز نیروگاه‌ها و مدیریت منابع آب در دسترس ارایه داده است. همچنین برنامه‌ریزی میان مدت و بلند مدت برای در نظر گرفتن تغییرات آب و هوایی در مصرف آب در نظر گرفته شده است.

مرجع [۶] به مرور مراجع دیگر برای استخراج میزان مصرف آب در انواع مختلف نیروگاه با تکنولوژی‌های متفاوت پرداخته است. در این مقاله همه‌ی انواع نیروگاه اعم از سنتی و تجدید پذیر مورد مطالعه قرار گرفته است و مشخص شده است که استفاده از تکنولوژی‌های تجدید پذیری از قبیل نیروگاه‌های فتوولتاییک و بادی بهترین گزینه برای کاهش مصرف آب در تولید انرژی الکتریکی است.

تولید انرژی الکتریکی امری پویا بوده و همواره انرژی الکتریکی باید به میزان مصرف تولید شود و به دنبال آن حجم آب بسیاری در بخش تولید برق در سیستم‌های قدرت مصرف می‌شود. این حجم به قدری قابل توجه است که حتی کاهش درصد ناچیزی از این مقدار می‌تواند منابع آبی عظیمی را حفظ کند. لذا روش‌های مختلفی برای کاهش مصرف آب در نیروگاه‌ها وجود دارد که بخش‌هایی از آن‌ها به تاسیسات نیروگاه‌ها و نوع سیستم خنک‌کننده‌ی نیروگاه مربوط می‌شود که عموما اجرا و پیاده‌سازی این روش‌ها زمان‌بر بوده و به عنوان راه حلی برای برنامه‌ریزی بلند مدت برای حل مشکل کم آبی در سراسر جهان به حساب می‌آید.

در این مقاله روشی پیشنهاد شده است که به وسیله‌ی آن می‌توان حجم آب بیشتری را با صرف هزینه‌ای ناچیز صرفه جویی کرد. می‌توان این روش را در زمان بسیار کوتاهی اجرا کرد و نیازمند برنامه‌ریزی برای تغییرات بلند مدت و افزایش هزینه‌ی سرمایه‌گذاری نیست. در این روش با تغییر برنامه‌ی تولید نیروگاه‌های برق با لحاظ کردن قید آب مصرفی آن‌ها مطالعه‌ای بر مبنای هزینه‌های تحمیلی به سیستم برای کاهش مصرف آب و حجم آب صرفه جویی شده‌ی نیروگاه‌ها انجام شده است. به همین منظور محدودیت مصرف آب برای تولید برق همانند محدودیت مصرف سوخت نیروگاه‌ها، جدی در نظر گرفته شده است و در کنار سایر محدودیت‌های سیستم‌های انرژی الکتریکی وارد مساله شده است. با تغییر محدودیت این قید می‌توان به میزان هزینه‌ی صرف‌شده به ازای میزان آب صرفه‌جویی شده دست یافت. به بیان ساده‌تر با این عمل مشخص می‌شود بهره‌بردار شبکه‌ی قدرت برای صرفه‌جویی مقدار مشخصی از آب چه مقدار باید هزینه‌ی اضافی پرداخت کند. یا بر عکس با مصرف چه حجمی از آب، هزینه‌های بهره‌برداری چه مقدار کاهش می‌یابد.

در ادامه سایر بخش‌های مقاله به صورت زیر می‌باشند: در بخش ۲ مدل محاسبه کمی آب مصرفی انواع نیروگاه‌ها ارائه شده و در بخش ۳ مساله برنامه ریزی مشارکت واحدهای تولید معرفی شده و نحوه‌ی کاهش مصرف آب در تولید برق مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در بخش ۴ روش حل مساله و در نظر گرفتن محدودیت آب در برنامه‌ریزی تولید برق ارائه شده و نتایج حاصل از مدل سازی روش پیشنهاد شده در این مقاله در بخش ۵ نشان داده می‌شوند. در بخش آخر نیز نتیجه‌گیری حاصل از روش پیشنهادی قابل مشاهده است.

۲. مدل محاسبه‌ی میزان مصرف آب در نیروگاه

در این قسمت به طور خلاصه به تشریح انواع سیستم‌های خنک کننده‌ی نیروگاه‌ها پرداخته می‌شود. در ادامه مدلی ساده و در عین حال دقیق برای محاسبه‌ی میزان مصرف آب در نیروگاه‌های مختلف ارایه می‌شود.

۲. ۱. انواع مختلف سیستم‌های خنک کننده‌ی نیروگاه‌ها

بخش اعظمی از آب مصرفی نیروگاه‌ها در بخش مربوط به خنک کننده‌ها مصرف می‌شود. سیستم خنک کننده وظیفه‌ی انتقال حرارت بخار خروجی توربین به محیط را دارد. میزان این حرارت نیز به عواملی نظیر بازده، تکنولوژی و میزان توان تولید شده بستگی دارد. رایج‌ترین سیستم‌های خنک‌کننده به کار رفته در نیروگاه‌ها سیستم‌های یک‌بار گذر و سیستم‌های مدار بسته هستند، که در ادامه به توضیح اجمالی این سیستم‌ها پرداخته می‌شود.

۲. ۱. ۱. سیستم خنک‌کننده‌ی یک‌بار گذر

در این نوع سیستم‌ها آب از یک منبع طبیعی مانند دریاچه، رودخانه و یا دریا گرفته می‌شود و به‌وسیله‌ی پمپ در لوله‌های چگالنده جریان یافته، ضمن عبور از لوله گرم شده و سپس به همان منبع تخلیه می‌شود. بنابراین تقریبا تمام حرارت اضافی توسط آب دریافت شده و به منبع آب انتقال می‌یابد. این روش از لحاظ ترمودینامیکی مؤثرترین روش دفع گرما به شمار می‌رود. با این حال به دلیل مصرف آب قابل توجه در

این روش، در شرایطی که منبع آب به اندازه‌ی کافی در دسترس نیست یا مصرف آب توسط مقررات زیست محیطی محدود شده است، استفاده از سیستم‌های مدار بسته ناگزیر است.

۲. ۱. ۲. سیستم‌های بسته

آب در سیستم‌های مدار بسته از چگالنده گرفته می‌شود و پس از گذشتن از دستگاه خنک‌کن دوباره به چگالنده باز می‌گردد. سیستم مدار بسته نسبت به سیستم یک‌بار گذر از کارایی کمتری برخوردار است. سیستم بسته در مقایسه با سیستم‌های یکبار گذر به آب بسیار کمتری نیاز دارد و در مقابل ملزم به سرمایه‌گذاری بیشتر، هزینه‌ی بهره‌برداری بیشتر و فضای بیشتری است. برج‌های خنک کننده در سیستم بسته به دو نوع کلی تر و خشک تقسیم می‌شود. در سیستم بسته با برج خنک کننده‌ی تر آب گرم به طور یکنواخت به برج خنک کننده تزریق می‌شود، پس از مخلوط شدن آب گرم و هوا عمل تبخیر شدت گرفته و آب سرد و بخار آب از هم جدا می‌شوند. آب سرد از برج خنک کننده به سمت چگالنده هدایت می‌شود. بین دستگاه خنک کن و چگالنده نیز، منبعی برای تامین اتلاف آب تبخیر شده در فرایند خنک شدن تعبیه می‌شود. در حالی که در برج خنک‌کننده‌ی خشک آب گرم ورودی به برج از داخل یک سری لوله‌هایی می‌گذرد که از روی آن‌ها هوای خنک‌کن عبور می‌کند. به این ترتیب گرمای آب به هوای خنک‌کن انتقال می‌یابد. در این سیستم آب مصرفی در این مرحله صفر می‌باشد.

۲. ۲. میزان آب مصرفی در نیروگاه‌های حرارتی

میزان آب مصرفی در هر نیروگاه از طریق محاسبه‌ی آب ورودی به بخش‌های مختلف آن قابل محاسبه است، هرچند این روش می‌تواند پیچیده باشد. از طرف دیگر برای محاسبه‌ی میزان آب مصرفی کل نیازی به استخراج این جزئیات نیست. استخراج رابطه‌ی بین آب مصرفی و میزان حرارتی که باید از نیروگاه خارج شود، به ما کمک می‌کند تا از روشی ساده، متفاوت و با دقت مناسب میزان آب مصرفی نیروگاه‌ها را تخمین بزنیم. این روش در مرجع [۷] به صورت کامل تشریح شده است. رابطه‌ی محاسبه‌ی میزان آب مصرفی نیروگاه به این صورت است:

$$I = A(HR - B) + C \qquad (۱)$$

در این رابطه $I(\frac{L}{kWh})$ میزان آب مصرفی نیروگاه بر حسب لیتر به ازای هر کیلووات ساعت انرژی الکتریکی تولیدی را نشان می‌دهد. پارامتر $HR(\frac{kJ}{kWh})$ نشانگر نرخ حرارتی یا میزان حرارت ورودی مورد نیاز حاصل از سوخت نیروگاه بر حسب کیلوژول، جهت تولید یک کیلووات توان الکتریکی به مدت یک ساعت می‌باشد. پارامتر $B(\frac{kJ}{kWh})$ کل نرخ حرارتی ورودی از سمت سوخت نیروگاه به جز نرخ حرارتی ورودی به سیستم خنک‌کننده را شامل می‌شود. همچنین پارامتر $A(\frac{L}{kJ})$ میزان آب مورد نیاز جهت دفع یک کیلوژول حرارت موجود در سیستم خنک‌کننده را نشان می‌دهد که به نوع سیستم خنک‌کننده وابسته است. در نهایت پارامتر $C(\frac{L}{kWh})$ آب مورد نیاز در سایر بخش‌های نیروگاه جز بخش خنک‌کننده را نشان می‌دهد.

آب مصرفی در نیروگاه‌ها به دو قسمت تعریف می‌شود: آب خروجی[1] آب تعریق[2]. آب خروجی به مقدار آبی که از سطح زمین برداشته شود یا از منبع خود برای استفاده منحرف شود، گفته می‌شود. آب مصرفی به مقدار آبی گفته می‌شود که تبخیر، تعرق و یا برای محصولات کشاورزی استفاده شود [۸]. مقدار آب مصرف شده در هر نیروگاه با توجه به سیستم خنک‌کننده و نوع نیروگاه متفاوت می‌باشد. بازه‌ی پارامترهای انواع نیروگاه‌ها برای محاسبه‌ی آب مصرفی آن‌ها در جداول ۱ و ۲ آمده است.

جدول۱: پارامترهای مربوط به میزان آب مصرفی نیروگاه‌ها [۷]

نوع نیروگاه	$HR(\frac{kJ}{kWh})$	$B(\frac{kJ}{kWh})$	$C(\frac{L}{kWh})$
نیروگاه گازی	7200	5160-5230	0/02-0/03
نیروگاه بخاری	9000-9500	5500-5800	0/10-0/20
نیروگاه هسته‌ای	10000-12400	4100-4420	0/02-0/03
نیروگاه زغال‌سنگ	8900-9800	5100-5400	0/20-0/30

جدول۲: پارامتر مربوط به میزان آب مصرفی سیستم‌های خنک‌کننده [۷]

نوع سیستم خنک‌کننده	$A(\frac{L}{kJ})$ (خروجی)	$A(\frac{L}{kJ})$ (مصرفی)
یک‌بار گذر	0/022-0/034	0/00022-0/00068
برج خنک‌کننده تر	/00034-0/00077	0/00033-0/00050
برج خنک‌کننده خشک	0	0

از آن‌جایی که پارامترهای معرفی شده در رابطه‌ی (۱) برای هر نیروگاه متفاوت می‌باشد به منظور تخمین دقیق‌تر میزان آب مصرفی یک نیروگاه، این پارامترها به صورت دقیق برای نیروگاه مورد نظر به صورت مجزا باید در دسترس باشند که به نظر مسأله‌ی دشواری می‌باشد. از این رو با پذیرفتن این‌که پارامترهای مربوط به نیروگاه‌ها در بازه‌ی محاسبه شده قرار دارند، می‌توان از راندمان هر نیروگاه برای محاسبه‌ی آب مصرفی آن بهره جست. واضح است که هرچه راندمان نیروگاه بیشتر شود میزان حرارت تلف شده کمتر شده و در نتیجه‌ی آن میزان آب مصرف‌شده در آن کم‌تر می‌باشد. بنابراین می‌توان بازه‌ی آب مصرفی را به بازه‌ی راندمان هر نوع نیروگاه ارتباط داد. به بیان ساده اگر رابطه‌ی بیان شده به صورت تقریبی، خطی در نظر گرفته شود، کمترین راندمان با بیشترین میزان مصرف آب و بیشترین راندمان با کمترین میزان مصرف آب متناظر خواهد بود. بنابراین میزان مصرف آب نیروگاهی با راندمان η از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

---

[1] Withdrawal
[2] Consumption

$$I = I_{max} + \frac{I_{min}-I_{max}}{\eta_{max}-\eta_{min}} \times (\eta - \eta_{min}) \qquad (2)$$

۳. برنامه ریزی مشارکت واحدهای تولید با قیود امنیتی

برنامه ریزی مشارکت واحدهای تولید و یا برنامه ریزی واحدهای تولید برای روز بعد، یکی از عمده‌ترین مسائل در سیستم‌های قدرت می‌باشد که شامل بهینه سازی منابع تولید برق از جمله نیروگاه‌های حرارتی برای حداقل سازی هزینه تولید توان و یا تامین تقاضای انرژی الکتریکی با رعایت قیود مربوطه می‌باشد که پتانسیل کافی برای صرفه جویی میلیون‌ها دلار در سال، به عنوان فعالیت اقتصادی را دارا می‌باشد. از آنجایی که بارهای الکتریکی نوسان بزرگی در طول روز دارند مساله مهمی که بهره بردار با آن رو به رو می‌شود این است که کدام واحدها را باید برای تولید در مدار نگه داشت و یا از آن‌ها برق خرید و کدام واحدها را برای چه مدت زمانی باید از مدار خارج کرد [۹].

مسئله برنامه ریزی جهت تعیین ترتیب اقتصادی ورود و خروج واحدهای حرارتی در اصل یک مساله بهینه سازی است که هم در فضاهای تجدید ساختار یافته و هم در فضاهای با ساختار عمودی یا یکپارچه‌ی صنعت برق کاربرد دارد. همواره ISO به وسیله‌ی بهینه‌سازی این مسئله، نحوه‌ی خرید انرژی الکتریکی از نیروگاه‌های شرکت کننده در بازار را تعیین می‌کند. وارد کردن یک واحد به مدار به این معناست که باید واحد را روشن، با شبکه سنکرون و به شبکه متصل نمود. هم چنین تفاوت مسئله‌ی برنامه ریزی مشارکت واحدها و پخش اقتصادی بار بین واحدها را می‌توان اینگونه بیان کرد که برنامه ریزی مشارکت واحدها یک مرحله عقب‌تر از پخش اقتصادی بار بین واحدها می‌باشد به این صورت که در آن ابتدا واحدهایی که باید از آن ها انرژی الکتریکی خریداری شود، مشخص شده و سپس پخش بار برای آن‌ها انجام می‌گردد. به عبارتی در مساله‌ی پخش بار اقتصادی واحدها متغیری مرتبط با خاموش و یا روشن بودن واحد وجود ندارد. بنابراین این موضوع منجر به تمایز و پیچیدگی مساله‌ی برنامه ریزی مشارکت واحدهای تولید، می‌شود [۱۰].

مدل سازی تابع هدف و به ترتیب قیود مجموع توان تولیدی واحدها، محدودیت نرخ افزایشی و کاهشی توان تولیدی هر واحد، حداقل زمان روشن و خاموش بودن هر واحد، محدودیت حداقل و حداکثر توان تولیدی هر واحد حرارتی، مجموع سوخت اختصاص یافته به همه واحدها و سوخت اختصاص یافته به هر واحد در زیر آورده شده است.

$$Min \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N}\lambda_t((b_{i,t}P_{i,t}+c_{i,t}I_{i,t})+ST_{i,t}+SD_{i,t}) \qquad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{N} P_{i,\max} I_{i,t} \geq P_{D,t} + R_t \qquad (2)$$

$$P_{i,t} - P_{i,t+1} \leq DR_i(1-z_{i,t}) + z_{i,t}P_{i,\min} \quad \forall i, \forall t \qquad (3)$$

$$P_{i,t+1} - P_{i,t} \leq UR_i(1-y_{i,t}) + y_{i,t}P_{i,\min} \quad \forall i, \forall t \qquad (4)$$

$$y_{i,t} \leq I_{i,t+TU(i,e)} \quad \forall i, \forall t \qquad (5)$$

$$TU(i,e) = \begin{cases} e & e \leq T_i^{on} \\ 0 & e > T_i^{on} \end{cases} \quad \forall i \qquad (6)$$

$$z_{i,t} + I_{i,t+TD(i,e)} \leq 1 \quad \forall i, \forall t \qquad (7)$$

$$TD(i,e) = \begin{cases} e & e \leq T_i^{off} \\ 0 & e > T_i^{off} \end{cases} \quad \forall i \qquad (8)$$

$$P_{i,\min} I_{i,t} \leq P_{i,t} \leq P_{i,\max} I_{i,t} \quad \forall i, \forall t \qquad (9)$$

$$\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N} b_i P_{i,t} + c_i I_{i,t} + ST_{i,t} + SD_{i,t} \leq F^{Tot\max} \qquad (10)$$

$$b_i P_{i,t} + c_i I_{i,t} + ST_{i,t} + SD_{i,t} \leq F_{i,t}^{\max} \quad \forall i, \forall t \qquad (11)$$

برای در نظر گرفتن امنیت مطالعات از روش پخش بار DC به دلیل خطی بودن آن استفاده شده است. بنابراین توان جاری در خطوط انتقال به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$\begin{aligned} Pf_m &= \frac{1}{x_{rq}}(\theta_r - \theta_q - \gamma_{rq}) \quad \forall m, (r,q \in m) \\ -Pf_m^{\max} &\leq Pf_m \leq Pf_m^{\max} \qquad \forall m \\ \gamma_{\min} &\leq \gamma \leq \gamma_{\max} \end{aligned} \qquad (12)$$

در مرجع [۱۱] مسئله‌ی برنامه ریزی مشارکت واحدها با محدودیت انتقال توان الکتریکی به روش AC حل و ارائه شده است.

در برخی از نیروگاه‌ها به دلیل مصرف میزان قابل ملاحظه‌ی آب، محدودیت مصرف آب از محدودیت سوخت مصرفی جدی‌تر شده و باعث خاموش شدن واحد می‌شود. از طرفی صرفه جویی در مصرف آب در تولید انرژی الکتریکی می‌تواند مسأله‌ای قابل اهمیت و اجتناب‌ناپذیر به منظور حفظ منابع آب زیر زمینی باشد. به این منظور و برای مدل سازی این محدودیت در مساله‌ی برنامه‌ریزی مشارکت واحدها، روابط زیر به محدودیت‌های مساله اضافه شده است.

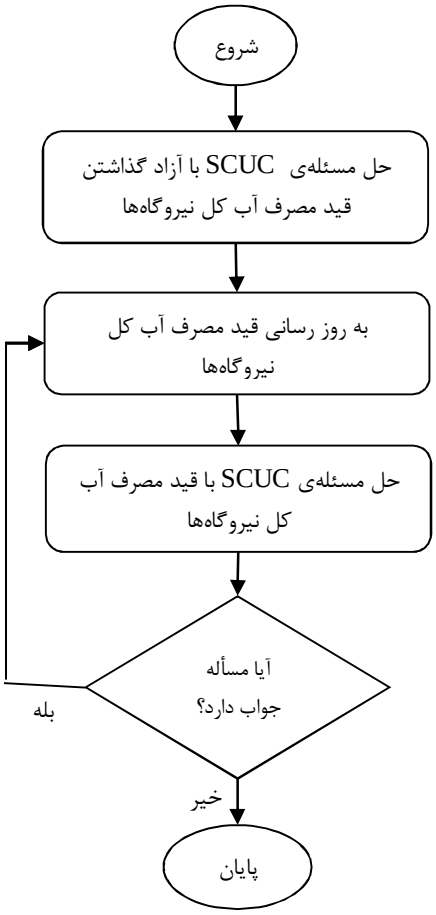
$$W_{i,t} = P_{i,t} \times I_i \quad \forall i, \forall t \qquad (13)$$

$$\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N} W_{i,t} \le W_{\mathrm{mod}} \qquad (14)$$

این روابط میزان آب مصرفی کل نیروگاه را نشان می‌دهد که باید از یک مقدار مشخصی کمتر باشند تا نسبت به حالت عادی صرفه‌جویی انجام شود.

۴. روند حل مساله

در این بخش به بررسی اثر صرفه‌جویی آب در قیمت تمام شده‌ی برق پرداخته می‌شود. به همین منظور قصد داریم به استخراج منحنی قیمت نسبت به میزان آب مصرفی کل نیروگاه بپردازیم. مراحل استخراج این نمودار در روندنمای شکل ۱ نشان داده شده است.

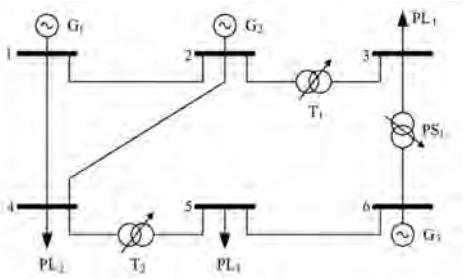


شکل ۱: روند نمای چگونگی اعمال سناریوهای مختلف

همان‌طور که از شکل (۱) مشخص است، در مرحله‌ی اول مسأله‌ی SCUC معرفی شده در بخش قبل، با آزاد گذاشتن قید مربوط آب مصرفی نیروگاه‌ها حل می‌شود و با استفاده از نتیجه‌ی آن میزان آب مصرفی نیروگاه‌ها با استفاده از روش ارایه شده در بخش دوم محاسبه می‌شود. این میزان حداکثر آب مصرفی برای تولید مقدار مشخصی از توان الکتریکی خواهد بود. در مرحله‌ی بعد محدودیت آب مصرفی نیروگاه اعمال می‌شود، این محدودیت در هر تکرار تغییر کرده و میزان آب مصرفی کل کاهش می‌یابد. میزان کاهش نیز کاملا اختیاری بوده و هدف از این کار نیز یافتن نقاطی از منحنی معرفی شده می‌باشد. با این کار در هر مرحله میزان هزینه‌ی صرف شده برای تولید برق محاسبه می‌شود. انتظار می‌رود با کاهش میزان آب مصرفی هزینه‌ی تولید برق همواره افزایش باید. طبق روندنما این عمل تا جایی ادامه می‌یابد که بهینه‌سازی در دست تحلیل دارای جواب باشد. با استفاده از نتایج به دست آمده می‌توان منحنی هزینه‌ی تأمین تقاضا نسبت به میزان آب مصرفی را ترسیم کرد.

۵. نتایج عددی

به منظور شبیه‌سازی مسأله‌ی ارایه شده از شبکه‌ی آزمون شش باس استاندارد استفاده شده است که تامین برق آن توسط مجموعه‌ای از نیروگاه‌های گازی انجام می‌شود. این شبکه شامل سه نیروگاه گازی، چهار خط انتقال توان، دو ترانسفورماتور و یک جا به جا کننده فاز و سه نقطه بار است. آرایش واحدها و خطوط در شکل ۲ آورده شده است. اطلاعات مربوط به پارامترهای شبکه و اندازه‌های آن در مرجع [۹] آورده شده است.



شکل ۲: شبکه انتقال انرژی الکتریکی و آرایش واحدهای تولید در آن

طبق روند معرفی شده در بخش قبل در ابتدا هیچ گونه محدودیتی در مصرف آب برای تولید برق نیروگاه‌ها و تامین انرژی الکتریکی در نظر گرفته نمی‌شود و برنامه ریزی مشارکت واحدهای تولید صرفا بر مبنای محدودیت‌های امنیتی شبکه برق و حداقل کردن هزینه تولید و سوخت نیروگاه‌ها انجام می‌شود. در این مرحله مقدار آب مصرفی نیروگاه‌ها محاسبه شده و مشخص می‌گردد که برای حداقل کردن هزینه بهره برداری از شبکه برق چه مقدار آب باید در نیروگاه‌ها مصرف شود. این مقدار به عنوان حداکثر آب مصرفی نیروگاه‌ها در برنامه ریزی تولید آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. در این حالت نتایج هزینه بهره برداری و حداکثر آب مصرفی در جدول ۳ آورده شده است.

جدول۳: برنامه ریزی بدون محدودیت در مصرف آب جهت محاسبه آب مصرفی

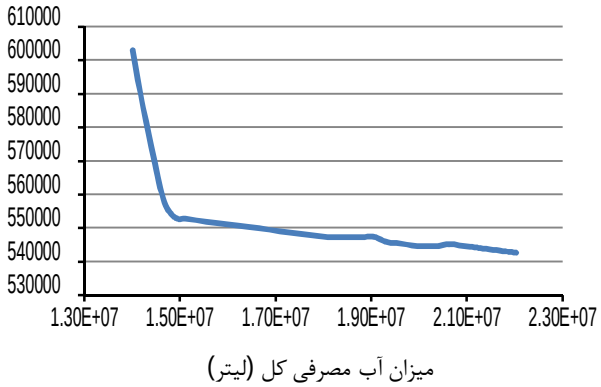
آب روزانه مصرف شده (Litter)	هزینه بهره برداری روزانه ($)
22025410	542690.066

در ادامه در هر مرحله، میزان محدودیت آب مصرفی کل در نیروگاه‌ها به اندازه‌ی دو درصد نسبت به حالت قبل، کاهش یافته و مسأله بار دیگر حل می‌شود. به دلیل تغییر مقدار محدودیت در مساله، آرایش تولید نیروگاه‌ها و هزینه‌ی بهره برداری از شبکه تغییر خواهد کرد. با تکرار این روند در مراحل بعد و هر بار کاهش مقدار آب مصرفی نیروگاه‌ها تاثیر آن بر هزینه‌های تولید برق نیروگاه‌ها بدست خواهد آمد. این روند تا جایی ادامه می‌یابد که دیگر حل مساله با محدودیت کمتر آب امکان‌پذیر نباشد. نتایج مربوط به این مطالعات در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ٤: نتایج حاصل از کاهش محدودیت آب مصرفی نیروگاه‌ها و افزایش هزینه‌های بهره برداری ناشی از آن

آب روزانه مصرف شده (Litter)	هزینه بهره برداری روزانه ($)
22025410	542690.066
21284901.8	544072.201
20844393.6	544894.401
20403885.4	544732.125
19963377.2	544732.125
19522869	545552.071
19082360.8	547393.334
18641852.6	547393.334
18201344.4	547393.334
17760836.2	547866.765
17320328	548688.965
16879819.8	549511.164
16439311.6	550333.363
15998803.4	551155.562
15558295.2	551977.761
15117787	552799.861
14677278.8	557736.157
14236770.6	585700.559
13796262.4	جواب ندارد

به منظور درک بهتر نتایج به دست آمده به صورت نمودار هزینه‌ی بهره‌برداری نسبت به اعمال کاهش مصرف آب در شکل ۳ آمده است. همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد با اعمال محدودیت بیشتر هزینه‌ی بهره‌برداری افزایش می‌یابد و این روال تا جایی ادامه می‌یابد که دیگر امکان صرفه‌جویی بیشتر وجود نخواهد داشت.



شکل ۳: اثر صرفه‌جویی در مصرف آب روی هزینه‌ی بهره‌برداری

با مشاهده‌ی هزینه‌ی تأمین تقاضا می‌توان به این نتیجه رسید که با کاهش مقدار محدودیت آب قیمت برق تولیدی بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر حساسیت هزینه‌ی بهره‌برداری نسبت به آب مصرفی با کوچک شدن مقدار محدودیت آب بالاتر می‌رود. در نظر گرفتن ارزش آب شاید در ابتدای امر صرفه‌جویی در مصرف آن امری مقرون به صرفه باشد ولی با محدودیت بیشتر در مصرف آن به قدری هزینه‌ی تولید انرژی بالا می‌رود که این کار صرفه‌ی اقتصادی نخواهد داشت. نقطه‌ای که در آن میزان بهینه‌ی صرفه‌جویی آب توجیه اقتصادی داشته باشد نیز توسط ارزش و قیمت آب تعیین می‌شود. علت وجود اعداد مساوی در جدول ۴ و عدم تغییر هزینه در برابر کاهش محدودیت مصرف آب را می توان در مدل مساله جستجو کرد. از آنجایی که مساله‌ی مورد نظر به صورت تلفیق شده با اعداد صحیح می باشد، مساله بعد یافتن یک جواب بهینه تا چندین مرحله نمی‌تواند جوابی کمتر پیدا کند.

هم چنین با نتایج به دست آمده مشخص می کند که صرفه جویی در هر لیتر آب هزینه ای حدود ۰/۵ سنت به شبکه تحمیل می‌کند به عبارت دیگر بهره بردار از شبکه می تواند با صرف هزینه ۰/۵ سنت یک لیتر آب صرفه جویی کند و یا با ۵ دلار هزینه یک متر مکعب آب صرفه جویی کند. با توجه به حجم آب صرفه جویی شده و هزینه مناسب آن به نظر می رسد این روش یک روش عقلانه و سریع برای حل مشکل کم آبی می باشد.

هم چنین این شبکه در ۲۴ ساعت روز بعد حدود ۵۰۶۰ مگا وات برق مصرف می‌کند که با توجه به اینکه در این مورد تمام نیروگاه ها گازی می باشد هر مگاوات ساعت برق تولیدی چیزی حدود ۵ لیتر آب مصرف می کند که صحت نتایج را مشخص می کند.

3. نتیجه گیری

در این مقاله مطالعه‌ی هزینه فایده برای صرفه‌جویی در مصرف آب نیروگاه‌ها انجام شده است. به عبارت دیگر برای صرفه جویی در مصرف آب در صنعت برق راه حلی فوری و موثر ارائه شده است. میزان آب مصرفی در نیروگاه‌ها در اکثر اوقات مقدار قابل توجهی بوده

که تا به حال اثر آن روی قیمت برق تولیدی بررسی نگشته است. در این مطالعه با معرفی و واردکردن محدودیت‌های مربوط به مصرف آب در واحدهای تولیدی، در مسئله‌ی برنامه ریزی تولید نیروگاه‌ها، مشاهده می‌شود که مقدار توان تولیدی یا برق خریداری شده از نیروگاه‌هایی که آب کمتری مصرف می‌کنند افزایش می‌یابد و نیروگاه‌هایی که آب بیشتری مصرف می‌کنند، توان کمتری از آن‌ها خریداری می‌شود. به این ترتیب بهره بردار سیستم می‌تواند با گران کردن برق تا هر اندازه در مصرف آب صرفه جویی کند. هم چنین در این مقاله مطالعه‌ای برای کاهش مصرف آب و به تبع آن افزایش هزینه‌های ناشی از آن انجام شده است که می‌توان از طریق آن حداکثر مقدار آب صرفه جویی شده در شبکه‌های برق را برای بهره برداری در روز بعد محاسبه کرد. به عبارت دیگر حساسیت قیمت تولید برق نسبت به میزان مصرف آب مشخص شده است. در انتها با ارائه یک مورد مطالعاتی صحت روش پیشنهادی به صورت آزمایشی اثبات شده است. در این قسمت نشان داده شده است که هر چه میزان آب مصرفی کمتر باشد هزینه‌ی بهره برداری افزایش می یابد تا جایی که دیگر کاهش مصرف آب به صرفه نبوده و حداکثر آب صرفه جویی شده در سیستم که منجر به تغییر ناچیز در هزینه های بهره برداری می شود به دست می آید.

مراجع

[1] P. H. Gleick, "Water and energy," *Annual Review of Energy and the environment*, vol. 19, pp. 267-299, 1994

[2] T. J. Feeley, T. J. Skone, G. J. Stiegel, A. McNemar, M. Nemeth, B. Schimmoller, *et al.*, "Water: A critical resource in the thermoelectric power industry," *Energy*, vol. 33, pp. 1-11, 2008

[3] R. Mendelsohn, Global warming and the American economy: a regional assessment of climate change impacts: Edward Elgar Publishing, 2001

[4] 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

[5] 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

[6] 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

[7] A. Delgado and H. J. Herzog, "Simple Model to Help Understand Water Use at Power Plants," *Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA*, 2012

[8] 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. 275-3000, 2011

[9] C. Liu, M. Shahidehpour, Y. Fu, and Z. Li, "Security-constrained unit commitment with natural gas transmission constraints," *Power Systems, IEEE Transactions on* ,vol. 24, pp. 1523-1536, 2009

[10] M. Shahidehpour, H. Yamin, and Z. Li, "Market Operations in Electric Power Systems, New York, NY: IEEE," ed: Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, Inc, 2002

[11] Y. Fu, M. Shahidehpour, and Z. Li, "Security-constrained unit commitment with AC constraints," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 20, pp. 1001-1013, 2005