

بررسی رد پای آب در تولید برق با تأکید بر انرژی‌های تجدیدپذیر

سیّده مهسا موسوی رینه^۱، حسین یوسفی^{۲*}

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. دانشیار، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۰۵/۱۵، تاریخ تصویب ۱۳۹۹/۰۸/۱۲)

چکیده

با افزایش جمعیت، استفاده از منابع طبیعی بیشتر شد و با وجود محدودیت‌های این منابع، مشکلات زیست‌محیطی به وجود آمد. از سویی دیگر، تغییرات اقلیمی نیز نگرانی‌ها را در حوزه تأمین آب و انرژی دو چندان می‌کند. شاید تنها دو راه حل برای مقابله با بحران آب موجود باشد: ایجاد و کشف منابع جدید، حفظ منابع فعلی در دسترس و استفاده برنامه‌ریزی‌شده از آن. پژوهش پیش رو با هدف بررسی رد پای آب صنعت برق صورت گرفت. ابتدا تعدادی از نیروگاه‌های کشور به عنوان نمونه مطالعه شد. سپس، میزان آب مجازی مصرفی به ازای تولید هر کیلووات ساعت برق از نیروگاه‌های حرارتی و انرژی‌های تجدیدپذیر بررسی و محاسبه شد. نتایج نشان داد میزان آب مجازی مصرفی در نیروگاه‌های مختلف تابع نوع نیروگاه و نوع سیستم خنک‌کننده آن است. مصرف آب در انواع نیروگاه‌ها به این ترتیب است: بخاری < سیکل ترکیبی < گازی < فتولتائیک < بادی. میزان مصرف آب برای نیروگاه‌های بخاری با سیستم خنک‌کننده برج تر برابر با ۲/۲ لیتر بر کیلووات ساعت، ۱/۵ لیتر بر کیلووات ساعت برای نیروگاه‌های بخاری و سیکل ترکیبی با سیستم خنک‌کننده یک‌بارگذر، ۰/۲ لیتر بر کیلووات ساعت برای نیروگاه‌های بخاری و سیکل ترکیبی با سیستم خنک‌کننده خشک، ۰/۲۵ لیتر بر کیلووات ساعت برای نیروگاه‌های گازی و ۰/۰۷ لیتر بر کیلووات ساعت برای نیروگاه‌های فتولتائیک است. با توجه به ارزش آب کشور در بخش‌های مختلف شرب، صنعت و آبیاری، هزینه‌های ناشی از آب مصرفی به‌ترتیب در نیروگاه بادی، گازی و فتولتائیک نسبت به بخاری و سیکل ترکیبی به‌صرفه‌تر است. بنابراین، برای توسعه و رشد صنعت نیروگاهی کشور، انتخاب نوع نیروگاه و به‌ویژه نوع سیستم خنک‌کننده در صرفه‌جویی مصرف آب کارکرد زیادی دارد.

کلیدواژگان: آب مجازی، تولید برق، رد پای آب.

مقدمه

افزایش روزافزون جمعیت کره زمین، منابع طبیعی محدود و تأثیرات زیست‌محیطی سوخت‌های فسیلی، توجه همه کشورهای را به انواع مختلف منابع انرژی جلب کرده است [۱]. بنابراین، برخی کشورها به گسترش انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی و بادی پرداخته‌اند. وابستگی انکارناپذیری بین مسئله آب و انرژی وجود دارد که به اصطلاح آن را «پیوند آب و انرژی» می‌نامند. آب لازم برای تولید انرژی، روی میزان آب در دسترس تأثیر می‌گذارد. برای مثال، ذخیره آب در مخازن نیروگاه‌های برق‌آبی، به مدت طولانی می‌تواند روی مصارف پایین‌دست آن نیروگاه و بوم‌سامانه پیرامون نیروگاه تأثیر بگذارد. همچنین، کیفیت آب به صورت فیزیکی و شیمیایی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. از طرف دیگر، مقدار آب در دسترس می‌تواند به مثابه ریسکی برای طرح‌های انرژی تلقی شود که نیاز به مقادیر زیادی آب دارند [۲]. اظهار نظر سازمان جهانی بهداشت در مورد بحران آب چنین است: «بحران آب

بیش از هر جنگی در تاریخ بشر، جان انسان‌ها را تهدید خواهد کرد.» شاید فقط دو راه حل برای مقابله با بحران آب موجود باشد: ایجاد و کشف منابع جدید، حفظ منابع فعلی در دسترس و استفاده برنامه‌ریزی شده از آن [۳].

نباید فراموش کرد که ذخایر انرژی‌های فسیلی جهان نیز در حال خالی شدن هستند و کاهش منابع آب شیرین و آلوده شدن آنها، که ارتباط تنگاتنگی با انرژی دارد نیز تهدیدآمیز شده است. خشک شدن چشمه‌ها، عمیق‌تر شدن چاه‌ها، کاهش سطح دریاچه‌ها و تالاب‌ها، افزایش دامنه‌های آلودگی آب، پر نشدن و سرریز نکردن هیچ‌یک از سدهای مخزنی و کاهش بازده محصولات دیم، ناپدید شدن زمین‌های مرطوب و... از نشانه‌های فنی بحران آب است. برای تصفیه، تثبیت و افزایش ذخایر آبی، نیاز گریزناپذیری به انرژی وجود دارد. همچنین، تمام فرایندهایی که در انرژی سهم دارند، مصرف‌کننده آب هستند [۴ و ۵]. شکل ۱ پیوند درهم‌تنیده آب و انرژی را بیان می‌کند [۶].



شکل ۱. ارتباط متقابل آب و انرژی [۶]

و خنک‌کاری صرف می‌شود. بنابراین، تجهیزات و فناوری‌هایی که در زنجیره تولید انرژی در بخش‌های استخراج، فرآوری، تصفیه و تبدیل انرژی به کار می‌روند، نیاز به مصرف آب دارند. از انواع کاربردهای عمده آب می‌توان به سیستم‌های تولید بخار برای مصارف گرمایش، آب برای تأمین بار سرمایش، آب برای شست‌وشوی تجهیزات، آب در جایگاه یک ماده شیمیایی در واکنش‌های شیمیایی مورد

انرژی مورد نیاز برای تأمین آب، بیشتر برای تصفیه، انتقال و توزیع آب استفاده می‌شود [۷]. از طرف دیگر، آب برای استخراج، تولید، تبدیل، انتقال و مصرف انرژی ضروری است. با افزایش جمعیت و افزایش توسعه اقتصادی، نیاز به انرژی افزایش می‌یابد. بنابراین، سطح و نرخ آب مورد نیاز برای تأمین انرژی و ارزش آن در تولید انرژی اهمیت می‌یابد. همچنین، مقدار زیادی آب در فرایندهای شیمیایی

سیستم‌های خنک‌کاری نیروگاه‌ها شامل سیستم‌های باز (یک‌بارگذر)، سیستم‌های بسته (که به برج‌های خنک‌کننده تر نیز مرسوم هستند) و کندانسورهای هوا به عنوان سیستم خنک‌کننده خشک طبقه‌بندی می‌شوند [۹]. قوت‌ها و ضعف‌های هر یک از فناوری‌های خنک‌کننده در جدول ۱ طبقه‌بندی شده است.

نیاز نام برد. بنابراین، انواع تجهیزات مانند برج‌های خنک‌کننده، مبادله‌کننده‌های حرارتی و واکنش‌گرهای شیمیایی از آب استفاده می‌کنند [۸]. سیستم خنک‌کننده اصلی‌ترین عامل تعیین‌کننده میزان مصرف آب در نیروگاه‌ها است. سیستم‌های خنک‌کننده در میزان مصرف آب، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و هزینه‌های سالانه متغیرند.

جدول ۱. فناوری‌های سیستم خنک‌کننده - معایب و محاسن [۱۰]

فناوری‌های خنک‌کاری	قوت‌ها	معایب
حلقه باز / یک‌بارگذر	مصرف آب کمتر بازده زیاد خنک‌کاری فناوری به بلوغ رسیده هزینه سرمایه‌گذاری کمتر	قوانین اجرایی آب تمیز برای جلوگیری از صدمات آبریزان محدودیت‌های تخلیه حرارتی
حلقه بسته / تر	برداشت آب بسیار کمتر نسبت به یک‌بارگذر گزینه استاندارد برای بیشتر نیروگاه‌های جدید الاحداث فناوری به بلوغ رسیده	مصرف آب بیشتر نسبت به یک‌بارگذر بار اغتشاشی بیشتر بازده کمتر سیستم هزینه سرمایه‌گذاری بیشتر در مقایسه با یک‌بارگذر
خشک	بدون مصرف یا مصرف آب ناچیز	هزینه سرمایه‌گذاری زیاد مصرف الکتریسیته بیشتر بازده کمتر سیستم در فصل گرم اشغال فضای گسترده
ترکیبی	هزینه سرمایه‌گذاری کمتر از خشک کاهش چشمگیر مصرف آب در قیاس با سیستم تر حذف مشکلات روزهای گرم	هزینه سرمایه‌گذاری بیشتر در قیاس با سیستم تر نیاز همیشگی به آب نمونه‌های پیاده‌سازی شده محدود مواجه بودن با چالش‌های مشابه سیستم تر و خشک

اهمیت درخور توجهی یافته است [۱۱]. در فرایند تولید برق تمامی نیروگاه‌های حرارتی اعم از زغال سنگ، گاز طبیعی، هسته‌ای، زمین‌گرمایی، زیست‌توده و سیکل ترکیبی از آب به عنوان یک مایع خنک‌کننده استفاده می‌کنند. آب زیادی در فرایند خنک‌سازی نیروگاه‌های حرارتی مورد نیاز است. فرایندهای تولید برق حرارتی ناگزیر مقادیر درخور توجهی گرما تولید می‌کنند که سیستم‌های خنک‌کننده تأثیر زیادی بر منع ورود این گرما به محیط زیست دارند [۱۲]. هرچه نیروگاه اتلاف گرمای بیشتری تولید کند، عملیات خنک‌سازی نیروگاه باید پررنگ‌تر انجام شود. با توجه به نوع سیستم خنک‌کننده در انواع نیروگاه‌ها، میزان مصرف آب برای انجام فرایند خنک‌سازی متفاوت است [۱۲]. بنابراین، تنظیم و به حداقل رساندن میزان آب مصرفی در سیستم تولید برق از مسائل مهم محیط زیستی به شمار می‌آید [۱۳ و ۱۴]. ارزش‌گذاری آب مصرفی کار پیچیده‌ای به شمار می‌رود، چرا که قیمت‌های موجود در کشورهای مختلف ممکن است اختیاری باشد و ارزش واقعی این منبع گرانبمایه را نشان

رد پای آب در تولید برق

ایده در نظر گرفتن استفاده از آب طی زنجیره‌های تأمین پس از معرفی مفهوم «رد پای آب» توسط Hoekstra در سال ۲۰۰۲ مورد توجه قرار گرفت. رد پای آب شاخصی از استفاده از آب است که نه تنها به مصرف مستقیم آب بلکه به مصرف غیر مستقیم آن نیز اشاره دارد. در تعریف مصرف غیر مستقیم رد پای آب می‌توان به اصطلاح آب مجازی نیز اشاره کرد. آب مجازی، به آب مصرف‌شده طی مراحل تولید، حمل، توزیع و... یک محصول و یا ارائه یک خدمت گفته می‌شود و به دلیل اینکه آب مصرف‌شده در محصول یا خدمت نهایی دیده نمی‌شود، به آن آب مجازی گفته می‌شود [۲۹]. استفاده بیش از حد آب در انواع نیروگاه‌های حرارتی به منظور تولید برق یکی از تأثیرات بارز محیط زیستی این مراکز است. با افزایش میزان آب برداشتی^۱ در نیروگاه‌ها، پدیده آب جاسازی‌شده، آب مجازی یا رد پای آب در فرایند تولید و تجارت برق

1. Withdrawal

در کشور آمریکا را تخمین زد. یافته‌های عمده این تحقیق شامل موارد زیر می‌شود. میزان برداشت و مصرف آب در فناوری‌های سوختی مختلف بسیار متفاوت است، اما باید گفت که انواع سیستم‌های خنک‌کننده تأثیر بیشتری در مصرف آب نسبت به انواع فناوری‌های نیروگاه‌ها دارد. سیستم خنک‌کننده یک‌بارگذر ۱۰-۱۰۰ برابر بیشتر نسبت به خنک‌کننده برج تر در واحد تولید برق آب برداشت می‌کند، در خنک‌کننده‌های با سیستم بسته، مصرف آب برج خنک‌کننده خشک نسبت به خنک‌کننده برج تر کمتر است. همچنین، نتایج تحقیق وی نشان داد سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر اعم از خورشیدی و بادی کمترین میزان مصرف آب را دارند [۱۲]. مارتین (۲۰۱۲) در تحقیقی با تأکید بر رد پای آب در تولید برق، مصرف آب در نیروگاه‌های حرارتی را بررسی کرد. او از یک مدل ساده برای درک استفاده از آب در نیروگاه‌ها بهره برد. از دیدگاه او موضوع مصرف آب در نیروگاه‌ها به‌ویژه در مناطقی که با کمبود آب روبه‌رو هستند، بسیار اهمیت دارد. نتایج تحقیق او نیز نشان داد انواع مختلف سیستم‌های خنک‌کننده به مقادیر مختلفی از آب احتیاج دارند. مدل پیشنهادی او میزان مصرف آب را در تمامی نیروگاه‌های حرارتی تخمین می‌زند. از مزایای این مدل می‌توان به سادگی محاسبه و در دسترس بودن اطلاعات اولیه اشاره کرد [۶].

به طور کلی، این تحقیق به بررسی میزان مصرف آب در سه حوزه اصلی فرایندی، شامل تولید، بخش اداری و بخش آبیاری فضای مشجر نیروگاه پرداخته است. میزان مصرف آب و هزینه‌های مصرف آب به عنوان آب مجازی تولید برق اندازه‌گیری می‌شود. این مقاله در چهار بخش اصلی ارائه شده است: بخش اول، مقدمه به تعاریف کلی و مطالعات پیشین این موضوعات می‌پردازد. در مرحله بعد، در بخش مواد و روش‌ها، منطقه بررسی شده و مجموعه داده‌ها و روش‌ها بررسی می‌شود. بحث و نتیجه، متشکل از یافته‌های اصلی و همبستگی آن‌ها با مقالات مشابه و در آخر به نتیجه‌گیری می‌پردازد.

مواد و روش‌ها

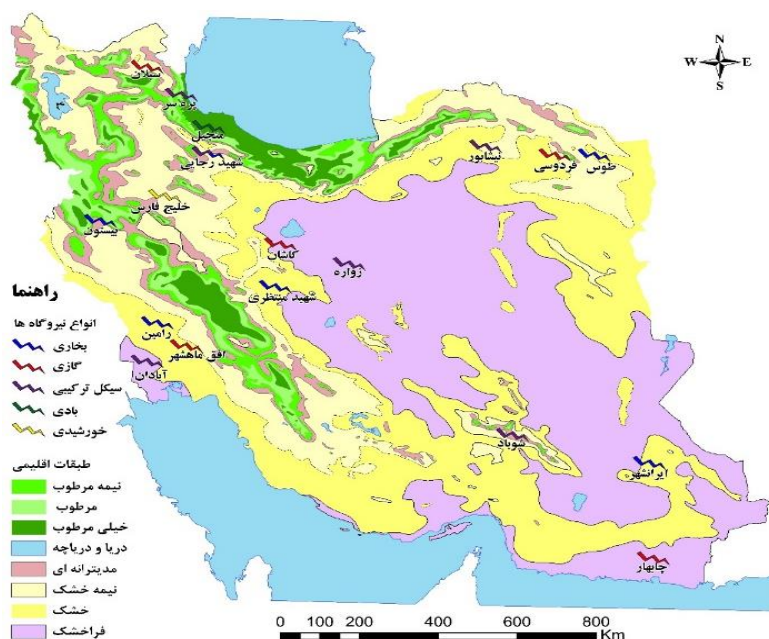
منطقه مطالعه شده

ایران کشوری وسیع و گسترده به مساحت ۱/۶ میلیون کیلومترمربع است. بخش شرقی این کشور بیابانی است، نیمه شرقی آن دشت کویر و نیمه جنوبی آن را دشت لوت

ندهند [۱۵]. بسیاری از مطالعات موجود به موضوع آب مجازی در تولید برق پرداخته‌اند. برای مثال، در مقاله‌ای جورجیف و سانساوینی (۲۰۱۸) تأثیر محدودیت‌های سیاست آب بر تولید برق تحت شرایط تغییرات اقلیمی را مطالعه کردند. در این تحقیق یک رودخانه و حوضه آبخیز مربوط به آن شبیه‌سازی شده است. تحقیقات مقاله یادشده تحت شرایط خشکسالی که منجر به افت دبی جریان رودخانه‌ها و افزایش دمای آنها شده، انجام شد. نتایج به‌وضوح نشان داد رابطه نزدیکی میان نیروگاه‌های حرارتی بزرگ و سیستم‌های خنک‌کننده یک‌بارگذر با دمای آب و میزان جریان وجود دارد، اما سیستم خنک‌کننده برج تر نسبت به دمای غیرطبیعی آب و میزان جریان مقاوم‌تر است. سیستم خنک‌کننده یک‌بارگذر به تغییرات جریان آب و دمای فضای باز بسیار حساس است و باید از تکنولوژی‌هایی با حساسیت کمتر مانند سیستم خنک‌کننده برج تر به عنوان جایگزینی پایدار استفاده کرد. تحولات آینده می‌توانند روی مدل‌های جامع‌تری از سیستم خنک‌کننده برج تر تمرکز کنند که مصرف آب کمتری داشته باشند [۱۶]. ژانگ و آنادون (۲۰۱۳) آب مصرفی، آب برداشتی و فاضلاب خروجی از نیروگاه‌های چین را پایش کردند. آنها همچنین، تأثیرات محیطی مرتبط با آنها را با استفاده از یک مدل ورودی خروجی چندمنطقه‌ای و روش ارزیابی اثر چرخه زندگی تجزیه و تحلیل کردند. تولید انرژی مسئولیت برداشت ۶۱/۴ میلیارد متر مکعب آب و مصرف ۱۰/۸ میلیارد متر مکعب آب را به عهده دارد. همچنین، مسئولیت خروج ۰/۵ میلیارد متر مکعب آب فاضلاب نیروگاهی در چین به عهده این بخش است. مهم‌ترین ویژگی پیوند انرژی-آب در چین، توزیع مکانی تقریباً نابرابر آب و منابع در قسمت‌های مختلف آن است. تأثیرات زیست‌محیطی ناشی از اختلاف بین ذخایر سوخت‌های فسیلی، منابع آب و فعالیت‌های اقتصادی بخش‌های مختلف این کشور است. مناطق ساحلی شرقی و جنوبی منابع آب بیشتری دارند و نیمی از برداشت‌های آب مربوط به بخش انرژی است، این در حالی است که منطقه خشک شمالی با در اختیار داشتن منابع آبی کمتر مصرف آب بسیار بیشتری در بخش انرژی دارد. بنابراین، تأثیرات زیست‌محیطی ناشی از برداشت آب در برخی مناطق شمالی چین خودنمایی می‌کند [۱۷]. مکنیک (۲۰۱۲) در گزارشی ضریب مصرف و برداشت آب برای تکنولوژی‌های تولید برق

شرقی واقع شده است. ظرفیت اسمی نیروگاه‌های کشور در سال ۲۰۱۷ به ۷۶/۵ گیگاوات رسید که نسبت به سال قبل ۳/۱ درصد افزایش یافته است. از کل ظرفیت اسمی نیروگاه‌های کشور، ۲۰/۷ درصد متعلق به نیروگاه بخاری، ۳۶/۴ درصد متعلق به نیروگاه گازی، ۲۵/۵ درصد متعلق به سیکل ترکیبی، ۱۵/۱ درصد متعلق به نیروگاه برق‌آبی و ۲/۳ درصد متعلق به نیروگاه‌های دیگر (هسته‌ای، بیوگاز، بازیافت حرارتی، باد و خورشیدی) است. وزارت نیرو در نظر دارد ظرفیت تولید سیستم تولید برق کشور را با استفاده از نیروگاه‌های سیکل ترکیبی پیشرفته و انرژی تجدیدپذیر، افزایش دهد. هدف از این کار، تأمین مصرف محلی، کاهش تلفات شبکه توزیع و دستیابی به بازده بیشتر در تولید برق بود. شکل ۲ ایستگاه‌های نمونه مطالعه‌شده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

پوشانده است. ایران تنوع آب‌وهوایی درخور توجهی دارد. به همین دلیل، برای انجام مطالعات باید به صورت منطقه‌ای در نظر گرفته شود. ایران از منظر گوناگونی وضعیت توپوگرافی و پوشش گیاهی، متنوع است و به سبب این امر الگوی متنوع اقلیمی در آن ایجاد شده است. آب‌وهوای بسیار گرم و خشک مناطق داخلی به طور ناگهانی با برخورد به رشته کوه البرز به آب‌وهوای مرطوب و معتدل مناطق ساحلی دریای خزر تبدیل می‌شود [۱۸]. همچنین، آب‌وهوای سرد زاگرس در غرب با آب‌وهوای کویری گرم مناطق داخلی جایگزین می‌شود. اگر بپذیریم که آب‌وهوا عامل بسیار مهمی در توسعه و رشد کشور است، شناخت آن و منظور کردن آن در هرگونه برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری سیاسی، امری مهم تلقی می‌شود [۱۹]. ایران در ۳۲ درجه شمالی و ۵۳ درجه



شکل ۲. نقشه طبقات اقلیمی ایران به همراه موقعیت نیروگاه‌های مطالعه‌شده

طبقات اقلیمی کشور را تحت پوشش قرار دهند، چرا که بازدهی و عملکرد نیروگاه‌ها در شرایط آب‌وهوایی و اقلیم‌های متفاوت با هم تفاوت دارد.

روش تحقیق

در تحقیق حاضر رد پای آب غیر مستقیم در سه حوزه فرایندی، شامل بخش تولید انرژی، بخش اداری نیروگاه‌ها و بخش آبیاری فضای سبز نیروگاه‌های حرارتی بر حسب

در تحقیق حاضر مطالعات روی ۲۰ نیروگاه به طور نمونه صورت گرفت. به دلیل در دسترس نبودن اطلاعات تمامی نیروگاه‌ها و محدودیت‌های دریافت اطلاعات، نمونه‌گیری به روش غیراحتمالی انجام شد. در این روش به جای تکیه بر عامل شانس، نمونه‌ها به مدد قضاوت و علم انسان انتخاب شدند. بر اساس تقسیم‌بندی کشور به طبقات اقلیمی مختلف، انواع نیروگاه‌ها طوری انتخاب شدند که هم اطلاعات آنها قابل دسترس باشد و هم تمامی

یک طرفه، برج تر، برج خشک و...). در نهایت، پارامتر C آب مورد نیاز در سایر بخش‌های نیروگاه (شست‌وشوی گردوغبارها) به جز بخش خنک‌کننده را نشان می‌دهد که در واقع مقدار آن بسیار کمتر از آب مورد نیاز بخش خنک‌کننده است. از آنجا که ممکن است این مقدار آب در فرایندهای متفاوت جزئی مصرف شود مشخص کردن مقدار دقیق آن کار دشواری است. بنابراین، مقدار کل آب مورد نیاز نیروگاه (I) به میزان گرمایی که باید توسط سیستم خنک‌کننده (HR-B) دفع شود، به شکل سیستم خنک‌کننده (A) و دیگر نیازهای آبی نیروگاه (C) بستگی دارد. بین بازده و نرخ حرارتی رابطه معکوس وجود دارد و بازده هر نیروگاه یک مقدار مشخصی است. برای محاسبه نرخ حرارتی از رابطه ۲ استفاده شده است.

$$Efficiency = 3600/HR \quad (2)$$

نرخ حرارتی به نوع سوخت مصرفی نیروگاه و ماهیت نیروگاه بستگی دارد. هرچه نرخ حرارتی کمتر باشد، مقدار آب کمتری به ازای هر کیلووات ساعت برق تولیدی نیاز است [۴]. اطلاعات مربوط به پارامترهای به کار گرفته شده در روابط ۱ و ۲ در انواع نیروگاه‌های مطالعه شده، در جدول ۲ آورده شده است.

لیتر بر کیلووات ساعت قابل بررسی است. در ادامه، به توضیح هر بخش به صورت مجزا پرداخته می‌شود.

رد پای آب در فرایند تولید برق

به منظور فهم بهتر و بررسی دقیق مسئله رد پای آب در نیروگاه‌های حرارتی، از یک مدل ساده و عمومی برای تخمین میزان آب مصرفی استفاده می‌شود. روش محاسبه مدل ساده و عمومی رد پای آب نیروگاه‌ها در این بخش معرفی می‌شود. ساختار آن در قالب رابطه ۱ شرح داده شده است. در این فرمول مقدار آب مصرفی I بر حسب L/kWh تابعی از نرخ حرارتی HR و سه پارامتر A بر حسب L/kJ، B بر حسب kJ/kWh و C بر حسب L/kWh است [۴].

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

پارامتر B کل نرخ حرارتی ورودی از سمت سوخت نیروگاه، به جز نرخ حرارتی ورودی به سیستم خنک‌کننده را شامل می‌شود. به بیانی، این پارامتر نشان‌دهنده تمام جریان گرمای خروجی از نیروگاه، به جز جریان گرمایی است که توسط آب بخش خنک‌کننده دفع می‌شود. پارامتر A میزان آب مورد نیاز برای دفع یک کیلوژول حرارت موجود در سیستم را نشان می‌دهد که به نوع سیستم خنک‌کننده وابسته است (برای مثال، سیستم خنک‌کننده

جدول ۲. اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه آب مصرفی در فرایند تولید برق نیروگاه حرارتی [۴ و ۲۰]

Efficiency	C	B	HR (kJ/kWh)	A	سیستم خنک‌کننده	نام نیروگاه	نوع نیروگاه
۰/۳۴	۰/۱۵	۵۶۵۰	۱۰۵۸۸/۲	۰	خشک	شهید منتظری	بخاری
۰/۳۷	۰/۱۵	۵۶۵۰	۹۷۲۹/۷	۰	خشک	طوس	
۰/۳۶	۰/۱۵	۵۶۵۰	۱۰۰۰۰	۰/۰۰۰۵	تر	رامین	
۰/۳۱	۰/۱۵	۵۶۵۰	۱۱۶۱۲/۹	۰	خشک	ایرانشهر	
۰/۳۶	۰/۱۵	۵۶۵۰	۱۰۰۰۰	۰	خشک	شهید رجایی	
۰/۳۸	۰/۱۵	۵۶۵۰	۹۴۷۳/۷	۰/۰۰۰۵	تر	بیستون	
۰/۳۱	۰/۰۲۵	۵۱۹۵	۱۱۶۱۲/۹	۰	-	سیلان	گازی
۰/۳۲	۰/۰۲۵	۵۱۹۵	۱۱۲۵۰	۰	-	کاشان	
۰/۳۰	۰/۰۲۵	۵۱۹۵	۱۲۰۰۰	۰	-	فردوسی	
۰/۲۷	۰/۰۲۵	۵۱۹۵	۱۳۳۳۳/۳	۰	-	افق ماهشهر	
۰/۲۹	۰/۰۲۵	۵۱۹۵	۱۲۴۱۳/۸	۰	-	چابهار	
۰/۳۴	۰/۰۲۵	۵۱۹۵	۱۰۵۸۸/۲	۰	-	سمنگان	
۰/۴۸	۰/۱۸	۵۶۵۰	۷۵۰۰	۰/۰۰۰۵	تر	زواره	سیکل ترکیبی
۰/۴۶	۰/۱۸	۵۶۵۰	۷۸۲۶/۰۹	۰	خشک	نیشابور	
۰/۴۴	۰/۱۸	۵۶۵۰	۸۱۸۱/۸	۰	خشک	آبادان	
۰/۳۲	۰/۱۸	۵۶۵۰	۱۱۲۵۰	۰	خشک	شهید رجایی	
۰/۳۳	۰/۱۸	۵۶۵۰	۱۰۹۰۹/۰۹	۰	خشک	شوباد	
۰/۵۰	۰/۱۸	۵۶۵۰	۷۲۰۰	۰/۰۰۰۶۵	یک‌بارگذر	پره سر	

رد پای آب در بخش اداری نیروگاه‌ها

در این بخش با توجه به استاندارد آب مصرفی روزانه هر فرد، میزان آب مصرفی کارکنان در هر نیروگاه تعیین می‌شود. مقدار آب مصرفی بخش اداری وابسته به تعداد افراد مشغول به کار در نیروگاه و مجموع ساعت‌های کارکرد هر نوع نیروگاه در یک سال است.

$$Z = \frac{S \times V \times 365 \times G}{8760} \quad (3)$$

در رابطه یادشده S برابر است با ساعت‌های کارکرد نیروگاه در سال (جدول ۵) و G برابر است با تعداد پرسنل (جدول ۵) و V برابر است با سرانه مصرف آب شرب هر فرد (۱۰۶ لیتر در روز) بر حسب لیتر یا متر مکعب و Z برابر است با آب مصرفی کل بخش اداری یک نیروگاه بر حسب لیتر یا متر مکعب در سال.

رد پای آب در بخش فضای سبز نیروگاه‌ها

عطف به نامه شماره ۵۰۲۲۰/۷۳۹۹۳ مورخ ۱۳۹۳/۶/۳۱ در اجرای اصل ۱۲۳ قانون اساسی جمهوری اسلامی ایران، قانون هوای پاک با عنوان لایحه اصلاح قانون چگونگی جلوگیری از آلودگی هوا به مجلس شورای اسلامی تقدیم شد. بر اساس ماده ۱۵ قانون هوای پاک شهرک‌ها، ایجاد فضای سبز و درختکاری به منظور جلوگیری از آلودگی هوا و تخریب محیط زیست اهمیت بسیار زیادی دارد و بر اساس قوانین و مقررات زیست‌محیطی، واحدهای بزرگ صنعتی موظف به ایجاد ۱۰ تا ۲۵ درصد از مساحت واحد صنعتی به فضای سبز و کشت درخت هستند. نیروگاه‌های حرارتی از جمله واحدهای صنعتی بزرگ محسوب می‌شوند و با ایجاد فضای سبز در فازهای متعدد در این واحدهای صنعتی باید میزان آلودگی این واحدها را به حداقل رسانند. نیروگاه‌های انرژی تجدیدپذیر ملزم به رعایت این قانون نیستند، بنابراین محاسبات فقط برای نیروگاه‌های حرارتی انجام شده است.

نیاز آبی در درختان، تابع عوامل مختلفی همچون جنس و بافت خاک، دمای محیط، تبخیر و تعرق، سن درخت و... است، بنابراین برای سهولت در انجام محاسبات نیاز آبی درخت بادام به عنوان نمونه در نظر گرفته شده است. با فرض تراکم درختکاری برابر ۳۰۰ اصله در هکتار و سیستم آبیاری به صورت قطره‌ای، هر درخت سالانه حدود ۱۵ مترمکعب به آب نیاز دارد [۲۱].

یافته‌ها

رد پای آب در فرایند تولید برق

بسته به نوع نیروگاه و نوع سیستم خنک‌کننده، مقدار آب استفاده شده در فرایند تولید برق متفاوت است. انتخاب یک سیستم خنک‌کننده نقش مهمی در ارتقای کیفیت سبب انرژی آینده کشور خواهد داشت. تفاوت بین سیستم‌های خنک‌کننده می‌تواند تأثیرات زیست‌محیطی درخور توجهی در تأمین آب محلی و لزوم به دست آوردن حبابه نیروگاه‌ها داشته باشد [۲۲-۲۵].

مقدار آب مصرفی در هر نیروگاه با استفاده از اطلاعات و پارامترهای موجود در جدول ۲ محاسبه شده است. پس از قرار دادن مقادیر جدول ۲ (برای نیروگاه‌های حرارتی) در معادله ۱ و با توجه به ناچیز بودن مصرف آب در نیروگاه‌های بادی و فتوولتائیک، نتایج به شرح جدول ۳ حاصل می‌شود. مقدار آب مصرفی بر حسب لیتر بر کیلووات ساعت برق تولیدی بر اساس تولید ناویژه یک سال نیروگاه محاسبه شده است.

برای تسهیل مقایسه میزان مصرف آب انواع نیروگاه‌ها میانگین مصرف آب با توجه به نوع سیستم خنک‌کننده محاسبه شده و در جدول ۴ آورده شده است.

طبق نمودارهای یادشده، مصرف آب در نیروگاه بخاری در مقایسه با سایر انواع نیروگاه‌ها چشمگیر است. همچنین، نوع خنک‌کننده در نیروگاه‌های حرارتی بر میزان مصرف آب مؤثر است و طبق نتایج، خنک‌کننده‌های تر، موجب افزایش بسیار زیاد مصرف آب نسبت به سایر خنک‌کننده‌ها می‌شود. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، می‌توان از مصرف آب در منابع انرژی تجدیدپذیر چشم‌پوشی کرد (رجوع شود به جدول ۴ و شکل ۳). در حالی که نیروگاه حرارتی با سیستم خنک‌کننده تر مصرف زیادی دارد (رجوع شود به شکل ۳ راست). در نتیجه، توسعه فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر به حفظ منابع آب کمک می‌کند.

رد پای آب در بخش اداری

جدول ۵ اطلاعات مورد نیاز و نتایج محاسبات مربوط به آب مصرفی بخش اداری را نشان می‌دهد.

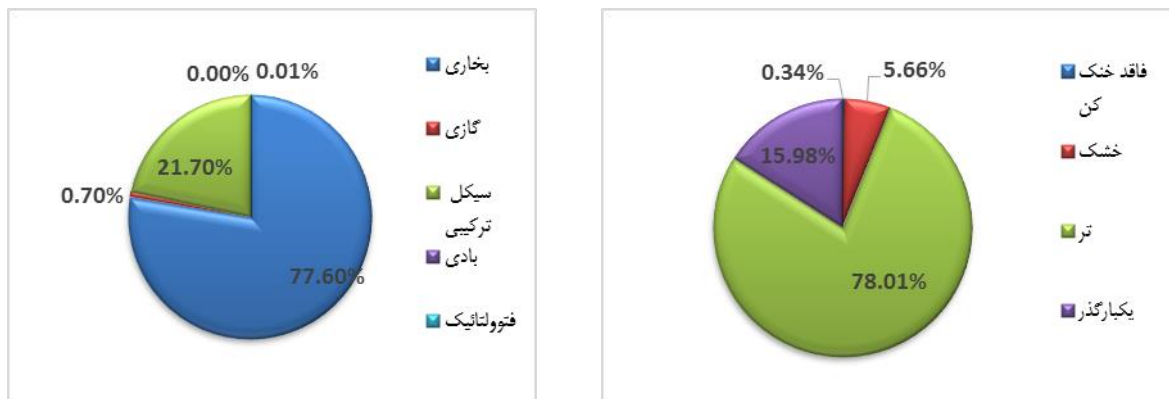
جدول ۳. نتایج مربوط به میزان آب مصرفی انواع نیروگاه‌ها

نوع نیروگاه	نام نیروگاه	سیستم خنک‌کننده	تولید ناویژه (مگاوات ساعت)	آب مصرفی (لیتر بر کیلووات ساعت)	آب مصرفی (مترمکعب در سال)
بخاری	شهید منتظری	خشک	۱۱۰۰۰۰۰	۰/۱۵	۱۶۵۰۰۰۰
	طوس	خشک	۳۹۶۷۳۶۴	۰/۱۵	۵۹۵۱۰۴/۶
	رامین	تر	۱۰۵۰۰۰۰۰	۲/۳۳	۲۴۴۱۲۵۰۰
	ایرانشهر	خشک	۱۴۲۳۰۰۰	۰/۱۵	۲۱۳۴۵۰
	شهید رجایی	خشک	۶۴۰۰۰۰۰	۰/۱۵	۹۶۰۰۰۰
	بیستون	تر	۴۰۲۹۷۳۹	۲/۰۶	۸۳۰۸۶۸۵/۵
گازی	سلان	-	۲۵۰۰۰۰۰	۰/۰۲۵	۶۲۵۰۰
	کاشان	-	۱۳۰۰۰۰۰	۰/۰۲۵	۳۲۵۰۰
	فردوسی	-	۲۵۱۰۰۰۰	۰/۰۲۵	۶۲۷۵۰
	افق ماهشهر	-	۲۰۰۰۰۰۰	۰/۰۲۵	۵۰۰۰۰
	چابهار	-	۱۴۰۰۰۰۰	۰/۰۲۵	۳۵۰۰۰
	سمنگان	-	۳۲۵۰۰۰۰	۰/۰۲۵	۸۱۲۵۰
	زواره	تر	۲۹۶۶۹۵۷	۱/۳	۳۹۳۸۶۳۵/۴
	نیشابور	خشک	۶۰۲۵۷۱۴	۰/۲	۱۰۵۴۴۹۹/۹
سیکل	آبادان	خشک	۵۸۰۰۰۰۰	۰/۲	۱۰۱۵۰۰۰
	شهید رجایی	خشک	۵۸۰۰۰۰۰	۰/۲	۱۰۱۵۰۰۰
ترکیبی	شوباد	خشک	۳۴۰۰۰۰۰	۰/۲	۵۹۵۰۰۰
	پره سر	یکبارگذر	۱۶۲۶۸۷۸	۱/۵	۲۵۰۲۷۸۹
بادی	منجیل	-	۷۸۶۹۸	۰	۰
فتوولتائیک	خلیج فارس	-	۱۲۵۴۷	۰/۰۸	۹۴۸/۵

تولید ناویژه مندرج در جدول یادشده برابر انرژی سالیانه تولیدی به مأخذ سال ۱۳۹۶، از کتاب جامع مدیریت، توسعه و تولید نیروی حرارتی و صنایع وابسته استخراج شده است.

جدول ۴. میانگین مقدار آب مصرف‌شده در فرایند تولید برق در هر نوع نیروگاه

نوع نیروگاه	نوع خنک‌کننده	آب مصرفی (L/kWh)	آب مصرفی (m ³ /year)
بخاری	خشک	۰/۱۵	۸۵۴۶۳۹
	برج تر	۲/۱۹	۱۶۳۶۰۵۹۳
گازی	-	۰/۰۲۵	۵۴۰۰۰
سیکل ترکیبی	خشک	۰/۱۷۵	۹۱۹۸۷۵
	برج تر	۱/۳۳	۳۹۳۸۶۳۵
	یکبارگذر	۱/۵۳	۲۵۰۲۷۸۹
بادی	-	۰/۰	۰
فتوولتائیک	-	۰/۰۷۵	۹۴۹



شکل ۳. نتایج محقق از سهم مصرف آب در فرایند تولید برق به تفکیک نوع خنک‌کننده (راست) و به تفکیک نوع نیروگاه (چپ) به درصد

جدول ۵. محاسبهٔ آب مصرفی بخش اداری و پرسنل

مقدار آب مصرفی بخش اداری (مترمکعب در سال)	تعداد کارکنان [۲۸]	نام نیروگاه	ساعات‌های کارکرد نیروگاه در سال [۲۷]	نوع نیروگاه
۱۶۲۲۲/۷۲	۵۹۹	شهید منتظری		بخاری
۷۰۹۵/۷۵	۲۶۲	طوس		
۳۵۲۰/۷۹	۱۳۰	رامین	۶۱۳۲	
۷۵۸۳/۲۴	۲۸۰	ایران‌شهر		
۷۳۳۹/۴۹	۲۷۱	شهید رجایی		
۶۳۹۱/۵۹	۲۳۶	بیستون		
۵۵۲۴/۹۳	۱۷۰	سیلان		گازی
۸۸۰۷/۳۹	۲۷۱	کاشان		
۶۴۹۹/۹۲	۲۰۰	فردوسی	۷۳۵۸/۴	
۱۹۴۹/۹۸	۱۱۰	افق ماهشهر		
۳۵۷۵/۹۶	۶۰	چابهار		
۸۷۷۴/۸۹	۲۷۰	سمنگان		
۸۸۰۷/۳۹	۲۷۱	زواره		سیکل ترکیبی
۶۴۹۹/۹۲	۲۰۰	نیشابور		
۴۱۹۲/۴۵	۱۲۹	آبادان	۷۳۵۸/۴	
۸۸۰۷/۹۳	۲۷۱	شهید رجایی		
۱۵۹۲/۴۸	۴۹	شوباد		
۵۴۹۲/۴۳	۱۶۹	پره سر		
۳۴۵۲/۶۱	۹۲	منجیل	۸۴۹۷	بادی
۱۸۷۶/۴۲	۵۰	خلیج فارس	۸۴۹۷	فتولتائیک

بخش را نشان می‌دهد. این میزان مصرف تابع مساحت نیروگاه است.

بدیهی است که هرچه مساحت نیروگاه بزرگ تر باشد، مساحت مورد نظر برای کاشت درختان بیشتر است و در نتیجه، تعداد درخت فراوان تری کاشته می‌شود، بنابراین مصرف آب بیشتر خواهد شد. نیروگاه‌های گازی با توجه به اینکه وسعت کمتری نسبت به سایر نیروگاه‌ها دارند، فضای کمتری برای نهال‌کاری داشته و بنابراین، میزان آب مصرفی آبیاری در این نوع نیروگاه‌ها کمتر است.

در هر نیروگاه با توجه به ساعت کارکرد آن در یک سال و تعداد پرسنل، مقدار آب مصرفی محاسبه شده است. همان‌طور که جدول ۵ نشان می‌دهد، تعداد کارمندان نیروگاه شهید منتظری از سایر نیروگاه‌ها بیشتر است. در نتیجه، میزان آب مصرفی این بخش در این نیروگاه نسبت به سایرین بیشتر است.

رد پای آب در بخش آبیاری فضای مشجر

جدول ۶ نتایج حاصل از محاسبهٔ میزان مصرف آب در این

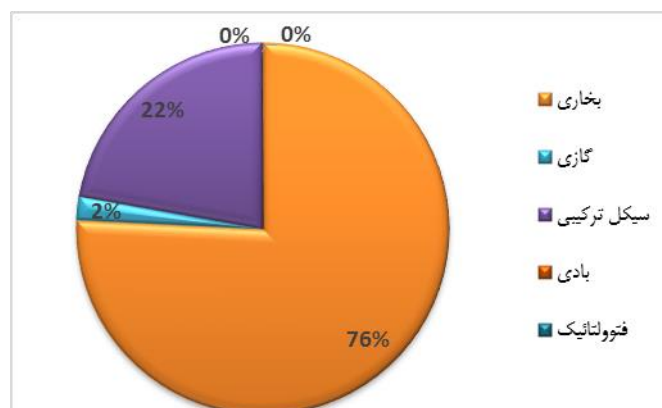
هزینه رد پای آب نیروگاهی

در ایران، قیمت آب خام برای مصارف صنعتی مانند نیروگاهها ۰/۰۲ سنت بر لیتر، قیمت آب شرب مراکز دولتی ۰/۰۲۵ سنت بر لیتر و آب مخصوص آبیاری ۰/۰۲۲ است. بنابراین، می‌توان ارزش اقتصادی آب استفاده شده در انواع نیروگاهها را چنین محاسبه کرد (شکل ۵).

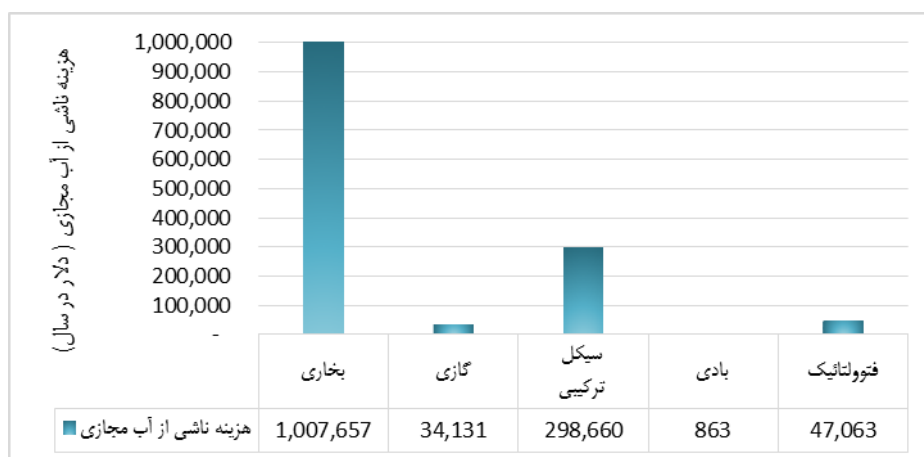
به منظور تسهیل در مقایسه رد پای آب کل در انواع نیروگاهها، میانگین مصرف آب به تفکیک نوع نیروگاه محاسبه شد. نمودار مربوطه در شکل ۴ نمایش داده شده است. در نمودار یادشده مجموع رد پای آبی در سه حوزه فرایندی نیروگاهها (تولید، اداری و آبیاری) در نظر گرفته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مصرف آب در نیروگاههای بخاری بسیار چشمگیر است.

جدول ۶. اطلاعات مورد نیاز و نتایج به دست آمده از محاسبه میزان آب مصرفی نیروگاهها در بخش آبیاری فضای مشجر

نوع نیروگاه	نام نیروگاه	مساحت نیروگاه (هکتار) [۲۰]	۲۵ درصد مساحت نیروگاه (هکتار)	تعداد اصله درخت	آب مصرفی (مترمکعب در سال)
بخاری	شهید منتظری	۲۱۸	۵۴/۵	۱۶۳۵۰	۲۴۵۲۵۰
	طوس	۶۶	۱۶/۵	۴۹۵۰	۷۴۲۵۰
	رامین	۱۵۰	۳۷/۵	۱۱۲۵۰	۱۶۸۷۵۰
	ایران شهر	۱۵۰	۲۵	۷۵۰۰	۱۱۲۵۰۰
	شهید رجایی	۲۵۴/۴	۶۳/۷	۱۹۰۹۵	۲۸۶۴۲۵
	بیستون	۶۴	۱۶	۹۷۵۰	۱۶۶۲۵۰
گازی	سیلان	۷۵	۱۸/۸	۵۶۲۵	۸۴۳۷۵
	کاشان	۵۰	۱۲/۵	۳۷۵۰	۵۶۲۵۰
	فردوسی	۵۸	۱۴/۵	۴۳۵۰	۶۵۲۵۰
	افق ماهشهر	۸۰	۲۰	۶۰۰۰	۲۸۶۴۲۵
	چابهار	۱۰۰	۲۵	۱۹۰۹۵	۹۰۰۰۰
	سمنگان	۱۱۷	۱۶	۴۸۰۰	۷۲۰۰۰
سیکل ترکیبی	زواره	۵۰	۱۲/۵	۳۷۵۰	۵۶۲۵۰
	نیشابور	۲۵۸	۶۴/۵	۱۹۳۵۰	۲۹۰۲۵۰
	آبادان	۱۰۰	۲۵	۷۵۰۰	۱۱۲۵۰۰
	شهید رجایی	۵۹/۳	۱۴/۸۳	۴۴۴۷/۵	۶۶۷۱۲/۵
	شوباد	۵۰	۱۲/۵	۳۷۵۰	۵۶۲۵۰
	پره سر	۱۳۰	۳۲/۵	۸۷۷۵	۱۳۱۶۲۵



شکل ۴. سهم کل رد پای آب به تفکیک انواع نیروگاه در یک سال (درصد)



شکل ۵. ارزش آب مصرف‌شده در انواع نیروگاه‌ها

* با توجه به اینکه اطلاعات تولید برق برای سال ۱۳۹۶ بوده است، تبدیل ریال به دلار نیز با دلار ۳۵۸۵ تومان صورت گرفته است.

کمترین شامل نیروگاه بخاری با خنک‌کن تر، بخاری با خنک‌کن خشک، سیکل ترکیبی و گازی است. در بین نیروگاه‌های انرژی تجدیدپذیر، نیروگاه بادی فقط مصرف آب در بخش اداری دارد و در سایر بخش‌ها تقریباً صفر است و نیروگاه فتوولتائیک سهم ناچیزی در مصرف آب دارد.

همچنین، در این تحقیق میزان آب مجازی مصرفی به ازای هر کیلووات ساعت برق محاسبه شد. نتایج نشان داد میزان آب مجازی مصرفی در نیروگاه‌های مختلف تابع نوع نیروگاه و نوع سیستم خنک‌کننده آن است. میانگین میزان مصرف آب برای نیروگاه‌های بخاری با سیستم خنک‌کننده برج تر برابر با ۲/۲ لیتر بر کیلووات ساعت، ۱/۵ لیتر بر کیلووات ساعت برای نیروگاه‌های بخاری و سیکل ترکیبی با سیستم خنک‌کننده یک‌بارگذر، ۰/۲ لیتر بر کیلووات ساعت برای نیروگاه‌های بخاری و سیکل ترکیبی با سیستم خنک‌کننده خشک، ۰/۲۵ لیتر بر کیلووات ساعت برای نیروگاه‌های گازی و ۰/۰۷ لیتر بر کیلووات ساعت برای نیروگاه‌های فتوولتائیک است. به طور متوسط مصرف آب در نیروگاه‌های حرارتی برابر با ۲ میلیون متر مکعب و در نیروگاه فتوولتائیک و بادی ۳ هزار مترمکعب در سال است. نتایج نشان داد که مصرف آب در انواع نیروگاه‌ها به این ترتیب است: بخاری < سیکل ترکیبی < گازی < فتوولتائیک < بادی. بنابراین، برای توسعه و رشد صنعت نیروگاهی کشور، انتخاب نوع نیروگاه و به‌ویژه نوع سیستم خنک‌کننده در صرفه‌جویی مصرف آب نقش مهمی ایفا می‌کند. هرچند که

همان‌طور که نمودار یادشده نشان می‌دهد، به لحاظ هزینه‌های ناشی از آب مصرفی به‌ترتیب نیروگاه بادی، گازی و فتوولتائیک نسبت به بخاری و سیکل ترکیبی به‌صرفه‌تر است.

بحث و نتیجه‌گیری

افزایش روزافزون جمعیت جهان و به دنبال آن تقاضای رو به رشد انرژی در جوامع امروزی موجب شد تا پیوند عمیق آب و انرژی در این تحقیق بررسی شود. ارزش انرژی و منابع تجدیدناپذیر در دنیای امروز سبب شده است که بسیاری از کشورها به تنوع منابع در سبب انرژی‌شان بیندیشند و علاوه بر استفاده از سوخت‌های فسیلی که محبوب‌ترین و البته، آلاینده‌ترین منابع انرژی در جهان نیز هستند، سهم منابع انرژی تجدیدپذیر را نیز افزایش دهند. ایران کشوری گسترده با پتانسیل درخور توجه منابع انرژی بادی و خورشیدی است. استفاده از این منابع می‌تواند بخش عمده‌ای از نیازهای انرژی کشور را در آینده تأمین کند. متأسفانه در سال‌های اخیر توجه کمی به توسعه انرژی تجدیدپذیر شده است. در این تحقیق سعی بر آن است که رد پای آب در انواع نیروگاه‌های حرارتی و تجدیدپذیر بررسی شود. با مقایسه سهم مصرف آب هر یک از فرایندهای سه‌گانه در انواع نیروگاه‌ها، درمی‌یابیم که نیروگاه‌های فسیلی میزان مصرف آب بیشتری نسبت به نیروگاه‌های انرژی تجدیدپذیر دارند. ترتیب نیروگاه‌های سوخت فسیلی به لحاظ میزان مصرف آب از بیشترین به

- Google Sch., 2009.
- [11]. Y.-D. Wang, J. S. Lee, L. Agbemabiese, K. Zame, and S.-G. Kang, "Virtual water management and the water-energy nexus: A case study of three Mid-Atlantic states," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 98, pp. 76–84, 2015.
- [12]. J. Macknick, R. Newmark, G. Heath, and K. C. Hallett, "Review of Operational Water Consumption and Withdrawal Factors for Electricity Generating Technologies." 2011.
- [13]. T. A. DeNooyer, J. M. Peschel, Z. Zhang, and A. S. Stillwell, "Integrating water resources and power generation: The energy-water nexus in Illinois," *Appl. Energy*, vol. 162, pp. 363–371, 2016.
- [14]. H. H. G. Savenije, "Why water is not an ordinary economic good, or why the girl is special," *Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C*, vol. 27, no. 11, pp. 741–744, 2002.
- [15]. A. Dinar and A. Subramanian, "Policy implications from water pricing experiences in various countries," *Water Policy*, vol. 1, no. 2, pp. 239–250, 1998.
- [16]. B. Gjorgiev and G. Sansavini, "Electrical power generation under policy constrained water-energy nexus," *Appl. Energy*, vol. 210, pp. 568–579, 2018.
- [17]. I. W. H. Parry, R. C. Williams, and L. H. Goulder, "When Can Carbon Abatement Policies Increase Welfare? The Fundamental Role of Distorted Factor Markets," *J. Environ. Econ. Manage.*, vol. 37, no. 1, pp. 52–84, 1999.
- [18]. A. Keyhani, M. Ghasemi-Varnamkhasti, M. Khanali, and R. Abbaszadeh, "An assessment of wind energy potential as a power generation source in the capital of Iran, Tehran," *Energy*, vol. 35, no. 1, pp. 188–201, 2010.
- [19]. G. Joselin Herbert, S. Iniyan, E. Sreevalsan, and S. Rajapandian, "A review of wind energy technology," *Renew Sustain Energy*, vol. 11, 2007.
- [20]. Development and production of thermal power and related industries," *Comprehensive book on management*, "Specialized company for thermal power generation, 2017. [Persian]
- [21]. A. Naghshi, "Irrigation Management in Gardens," *East Azerbaijan Agricultural Jihad Organization*, vol. 139, no. 1, 2016. [Persian]
- [22]. H. H. Carter, J. R. Schubel, R. E. Wilson, and P. M. J. Woodhead, "Thermally induced biological effects caused by once-through cooling systems: A rationale for evaluation," *Environ. Manage.*, vol. 3, no. 4, pp. 353–368, 1979.
- به دلیل ارزان بودن قیمت هر واحد آب خام صنعتی، شرب مراکز دولتی و آبیاری فضای سبز (۰/۰۲ سنت بر لیتر)، مقدار هزینه آب مجازی به ازای هر کیلووات ساعت ناچیز و قابل چشم‌پوشی است، اما مصرف زیاد آب در فرایندهای نیروگاهی برای تولید برق به عنوان یک صنعت آب‌بر نشان می‌دهد که با انتخاب آگاهانه در مسیر توسعه انرژی می‌توان مقدار درخور توجهی از هدررفت منابع آب و نیز کاهش آلودگی حرارتی منابع آبی (در سیستم‌های خنک‌کننده یک‌بارگذر) جلوگیری کرد.
- ### منابع
- [1]. A. Mostafaeipour, M. Qolipour, and K. Mohammadi, "Evaluation of installing photovoltaic plants using a hybrid approach for Khuzestan province, Iran," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 60, pp. 60–74, 2016.
- [2]. A. Avani, "Water and energy Nexus in Industry," 2018 [Persian]
- [3]. N. Poursadegh, T. Mahdizadeh, "Virtual water export reduction management strategy," *Strategic defense studies.*, 36, 2008 [Persian]
- [4]. A. Delgado and H. J. Herzog, "Simple model to help understand water use at power plants," Cambridge, MA Massachusetts Inst. Technol., 2012.
- [5]. K. Averyt, Freshwater use by US power plants: Electricity thirst for a precious resource. Union of Concerned Scientists., 2011.
- [6]. A. Delgado Mart, "Water Footprint of Electric Power Generation: Modeling its use and analyzing options for a water-scarce future," Massachusetts Institute of Technology, 2012.
- [7]. Y. Tsai, Y. Chan, F. Ko, J. Yang, and others, "Integrated operation of renewable energy sources and water resources.," *Energy Convers. Manag.*, vol. 160, pp. 439–454, 2018.
- [8]. Y. YANG, Z. LIN, and J. HE, "Chosen Method of Optimum Cold Source Thermal-system Heater in Heat and Power Cogeneration System [J]," *Proc. CSEE*, vol. 26, p. 1, 2010.
- [9]. A. Loew, P. Jaramillo, and H. Zhai, "Marginal costs of water savings from cooling system retrofits: a case study for Texas power plants," *Environ. Res. Lett.*, vol. 11, no. 10, p. 104004, 2016.
- [10]. J. Hagan and J. Maulbetsch, "Water use for electricity generation. California Energy Commission," *Public Interes. Energy Res.*

- [23]. J. Z. Reynolds, "Power plant cooling systems: policy alternatives," *Science* (80-.), vol. 207, no. 4429, pp. 367–372, 1980.
- [24]. E. Laws, "Aquatic Pollution 3rd edn (Hoboken, NJ." Wiley, 2000.
- [25]. C. A. Scott, S. A. Pierce, M. J. Pasqualetti, A. L. Jones, B. E. Montz, and J. H. Hoover, "Policy and institutional dimensions of the water--energy nexus," *Energy Policy*, vol. 39, no. 10, pp. 6622–6630, 2011.
- [26]. <https://www.seia.org/initiatives/water-use-management>, "Water Use Management," Solar energy Industries Association, 2019. [Online]. Available:
- <https://www.seia.org/initiatives/water-use-management>.
- [27]. H. Asadi, K. Feshari, "Competitiveness of geothermal electricity in comparison with conventional methods of electricity generation in Iran," *Iranian Journal of Energy Economics*, vol. 5, no.18, 2016. [Persian]
- [28]. Tavanir, Detailed statistics of the country's electricity industry, 2018. [Persian]
- [29]. Hoekstra AY, Chapagain AK, Mekonnen MM, Aldaya MM. The water footprint assessment manual: Setting the global standard. Routledge; 2011.