

## تخمین میزان آب مجازی و هزینه آب مجازی برای تولید انرژی الکتریکی در نیروگاه‌های منتخب فسیلی و تجدیدپذیر کشور

ندا رضایی<sup>۱</sup>، رخشاد حجازی<sup>۲\*</sup>، حسین یوسفی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری مدیریت محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران، ایران

۲. استادیار گروه محیط زیست، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران، ایران

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

(تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۰۸/۱۰؛ تاریخ بازنگری ۱۴۰۰/۰۹/۳۰ تاریخ تصویب ۱۴۰۰/۱۰/۱۰)

### چکیده

محاسبه آب مجازی در فرایند تولید برق از مهم‌ترین و جدیدترین مسائل حوزه محیط زیستی است که جایگاه ویژه‌ای در امنیت پیوند آب و انرژی دارد. در ایران به واسطه داشتن منابع فسیلی نیروگاه‌های فسیلی سهم عمده‌ای در تأمین نیاز برقی کشور دارند. از طرفی، محدودیت منابع آب از اصلی‌ترین چالش‌های تولید الکتریسیته در آینده برای کشورمان محسوب خواهد شد. بنابراین، هدف این تحقیق، محاسبه میزان مصرف آب مجازی در برق تولیدی در انواع نیروگاه‌های فسیلی و همچنین، هزینه آب مجازی مصرف‌شده برای تولید برق است. برای محاسبه مقادیر آب مصرفی در فرایند تولید برق، از روش حل مخصوص به آن که بر پایه مشخصات فنی نیروگاه‌ها و بازده تولید برق آنهاست، استفاده شد. نتایج نشان داد میزان آب مجازی مصرفی در نیروگاه‌های مختلف تابع نوع نیروگاه و نوع سیستم خنک‌کننده آن است. مصرف آب در نیروگاه‌های بخاری، سیکل ترکیبی و گازی به ترتیب برابر است با ۱/۳۸، ۰/۲۹ و ۰/۲۵ لیتر بر کیلووات‌ساعت و در نیروگاه‌های فتوولتاییک و بادی ناچیز است. 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 به دلیل ارزان بودن قیمت هر واحد آب خام صنعتی، شرب مراکز دولتی و آبیاری فضای سبز، مقدار هزینه آب مجازی ناچیز و قابل چشم‌پوشی است، اما مصرف زیاد آب در فرایندهای نیروگاهی برای تولید برق به عنوان یک صنعت آب‌بر نشان می‌دهد با انتخاب آگاهانه در مسیر توسعه انرژی می‌توان مقدار قابل توجهی از هدررفت منابع آب و نیز کاهش آلودگی حرارتی منابع آبی (در سیستم‌های خنک‌کننده یک‌بارگذر) جلوگیری کرد.

**واژه‌های کلیدی:** آب مجازی، تولید برق، نیروگاه تجدیدپذیر، نیروگاه فسیلی.

**مقدمه**

وابستگی میان آب و انرژی که گاهی اوقات پیوند آب و انرژی نیز نامیده می‌شود، به دلیل روند رو به افزایش تقاضای آب و انرژی اهمیت ویژه‌ای یافته است. ارتباط جدایی‌ناپذیر این دو فاکتور در شکل ۱ نشان داده شده

است. انرژی برای استخراج آب از منابع و تصفیه و خالص‌سازی آن برای مصرف عموم مورد نیاز است و از طرفی، تمامی فرایندهای تولید انرژی به وجود آب وابسته است [۱]. پس می‌توان بیان کرد که پیوند آب و انرژی یک موضوع چندجانبه و پراهمیت است [۲].



شکل ۱. ارتباط متقابل آب و انرژی [۲]

جدول ۱. معایب و محاسن فناوری‌های خنک‌کاری [۷]

| فناوری‌های خنک‌کاری     | قوت‌ها   | معایب  |
|-------------------------|--|--|
| حلقه باز / گردش باز آبی | مصرف آب کمتر<br>راندمان بالای خنک‌کاری<br>فناوری به‌بلوغ‌رسیده<br>هزینه سرمایه‌گذاری کمتر  | قوانین اجرایی آب تمیز برای جلوگیری از صدمات آبزبان<br>محدودیت‌های تخلیه‌ی حرارتی   |
| حلقه بسته / برج تر      | برداشت آب بسیار کمتر نسبت به گردش باز آبی<br>گزینه استاندارد برای بیشتر نیروگاه‌های تازه‌ساخت<br>فناوری به‌بلوغ‌رسیده                                | مصرف آب بیشتر نسبت به گردش باز آبی<br>بار اغتشاشی بیشتر<br>راندمان کمتر سیستم<br>هزینه سرمایه‌گذاری بیشتر در مقایسه با گردش باز آبی                            |
| برج خشک                 | بدون مصرف یا مصرف آب ناچیز   | هزینه سرمایه‌گذاری زیاد<br>مصرف الکتریسیته بیشتر<br>راندمان پایین‌تر سیستم در فصل گرم<br>اشغال فضای گسترده   |
| ترکیبی                  | هزینه سرمایه‌گذاری کمتر از برج خشک<br>کاهش چشمگیر مصرف آب در قیاس با سیستم برج<br>تر<br>حذف مشکلات روزهای گرم<br>انعطاف‌پذیری: انرژی در مقایسه با آب | هزینه سرمایه‌گذاری بیشتر در قیاس با سیستم برج تر<br>نیاز همیشگی به آب<br>نمونه‌های پیاده‌سازی شده محدود<br>مواجه بودن با چالش‌های مشابه سیستم برج تر و برج خشک |

و خنک‌کاری صرف می‌شود که بیشتر این آب‌ها به حوضه‌های آبریز برگردانده می‌شود [۳]. از نظر محیط زیستی مقدار آلاینده‌گی و افزایش دمای مجاز آنها باید کنترل شود [۴]. از انواع کاربردهای عمده آب در بخش

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 حائز اهمیت می‌شود. همچنین، مقدار زیادی آب در فرایندهای شیمیایی

شبکه با استفاده از روش آب مجازی» مفهوم آب مجازی را گسترش داده و جریان آب مجازی را در یک سیستم شبکه برق به هم پیوسته برای تخمین دقیق منافع منابع آب و انتقال انرژی پاک از دو سمت تولید و مصرف پیشنهاد می‌دهند. به عنوان نمونه، در سناریوی «اتصال آفریقا - آسیا - اروپا»، ذخیره کلی آب به ۸۸/۹۵ میلیون متر مکعب تا سال ۲۰۳۰ و ۳۳۷/۸۵ تا سال ۲۰۵۰ خواهد رسید. این مطالعه نشان می‌دهد اتصالات شبکه می‌تواند توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر و مزایای منابع آب موجود را گسترش دهد [۱۰]. لیاو و همکاران (۲۰۱۸) در مقاله‌ای با عنوان «طبقه‌بندی انتقال آب مجازی از طریق بخش برق چین»، به این موارد می‌پردازند که مصرف آب در نیروگاه‌های حرارتی و برقی از ۱/۶۲ و ۶/۱۴ میلیارد متر مکعب به ترتیب به ۳/۸۰ تا ۱۴/۶۳ میلیارد متر مکعب از ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۰ افزایش یافته است. از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ میزان مصرف آب مجازی در بخش برق از ۱/۹ تا ۷/۳۵ بلیون متر مکعب افزایش یافته است. در حالی که آب مجازی استفاده شده در صنایع از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ از ۵/۸۲ به ۱۱/۳۳ بلیون متر مکعب افزایش یافته است. معاملات آب مجازی بین استانی تا سال ۲۰۳۰ احتمالاً به ترتیب افزایش از ۵/۲۷ و ۱۴/۸۹ میلیارد متر مکعب به ۷/۱۹ و ۲۰/۳۳ بلیون متر مکعب خواهند داشت. کاهش تغییرات آب‌وهوایی اقدامات حفاظت از آب در بخش برق می‌تواند کمک به خلاص شدن از فشارهای منطقه‌ای در منابع آب تحمیلی به وسیله بخش برق باشد [۱۱].

مارتین (۲۰۱۲) در تحقیقی با تأکید بر رد پای آب در تولید برق، مصرف آب در نیروگاه‌های حرارتی را بررسی کرد و خاطرنشان کرد که موضوع مصرف آب در نیروگاه‌ها به ویژه در مناطقی که با کمبود آب روبه‌رو هستند، بسیار حائز اهمیت است. همچنین، وی مدعی بود که در نیروگاه‌های حرارتی مصرف آب در بخش خنک‌کاری به حداکثر خود می‌رسد، بنابراین نوع سیستم خنک‌کننده بر مصرف آب بسیار تأثیرگذار است [۲]. مقاله‌ای دیگر توسط تناکیس و کیم (۲۰۱۰) به مرور سایر مراجع پرداخته است و میزان مصرف آب در انواع مختلف نیروگاه‌ها با تکنولوژی‌های متفاوت را بررسی می‌کند. در این مقاله انواع نیروگاه‌ها اعم از فسیلی و تجدیدپذیر مورد مطالعه قرار گرفته و مشخص شده است که حرکت به سمت

تولید انرژی برق می‌تواند 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 نیاز نام برد، بنابراین انواع تجهیزات مانند برج‌های خنک‌کن، مبادله‌کن‌های حرارتی، واکنش‌گرهای شیمیایی و غیره از آب استفاده می‌کنند [۵]. سیستم خنک‌کاری اصلی‌ترین عامل تعیین‌کننده میزان مصرف آب در نیروگاه‌ها است. سیستم‌های خنک‌کاری در میزان مصرف آب، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و هزینه‌های سالانه متغیرند [۶]. قوت‌ها و ضعف‌های هر یک از فناوری‌های خنک‌کاری در جدول ۱ طبقه‌بندی شده است.

چینیو استیل ویل (۲۰۲۰) در مقاله‌ای با عنوان «تغییر شبکه تجارت آب مجازی شبکه برق اروپا» بیان می‌کنند که در تولید انرژی، آب مصرف می‌شود، این آب از طریق سرد کردن نیروگاه‌های حرارتی و تبخیر پشت سدهای هیدروالکتریک قبل از جریان در سرتاسر شبکه برق فیزیکی همانند یک منبع تعبیه شده است. از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۷، تجارت آب مجازی از ۴۳ میلیون متر مکعب به ۴۹ میلیون متر مکعب افزایش یافته است. در این مقاله بیشتر تجارت آب مجازی از طریق آنالیز تغییرات سیاست‌های برق در سه کشور (ایتالیا، انگلستان و آلمان) و تأثیرات بعدی آنها روی تجارت آب مجازی مورد تحلیل بوده است [۸]. ژانگ و همکاران (۲۰۲۰) مقاله‌ای با عنوان «تکامل جریان‌های آب مجازی در شبکه انتقال برق چین و نیروهای محرک آن» را مورد مطالعه قرار دادند. این مقاله با ذکر این نکته شروع می‌شود که انتقال برق از راه دور می‌تواند تنش آبی مرتبط با تولید برق را از سمت مصرف به سمت تولید منتقل کند. در چین، مقیاس در حال رشد سریع انتقال برق از غرب به شرق به افزایش تنش آبی در مناطق خشک شمال غربی کمک می‌کند. طی دوره مطالعه شده (۲۰۰۶-۲۰۱۶) صادرات آب مجازی با تنش وزنی از استان‌های شمال غربی کم‌آب ۱۲ درصد افزایش یافته است. بهبود بهره‌وری آب در تولید برق حرارتی ۳۵ درصد از رشد بالقوه کل انتقال آب مجازی حجمی و بیش از ۵۰ درصد انتقالات با آب مجازی با تنش وزنی را جبران کرده است [۹].

چن و همکاران (۲۰۱۹) در مقاله‌ای با عنوان «تجزیه و تحلیل مزایای منابع آب ناشی از قدرت اتصال

فناوری‌هایی مانند استفاده فتوولتائیک و بادی بهترین گزینه برای کاهش مصرف آب در تولید انرژی الکتریکی هستند [۱۲].

حسینیان و نظام‌الاسلامی (۱۳۹۸) در مقاله‌ای با عنوان «ردپای آب و ارزیابی آب مجازی در صنعت سیمان»، بیان می‌کنند که هدف این مقاله یک مدل جامع برای ارزیابی ردپای آب محصولات سیمان است. این ارزیابی براساس نوع مصرف انرژی، حمل‌ونقل و اثرات انسانی با استفاده از تجزیه‌وتحلیل مرز سیستم ارائه شده است. این مقاله نشان می‌دهد محاسبه کل ردپای آب انتخاب‌شده از کارخانه سیمان  $۱۰^۶ \times ۳/۶۱$  متر مکعب است. در سال ۱۳۹۸ با شدت مصرف آب  $۲/۱۲۶$  متر مکعب در هر تن از محصول سیمان، نشان‌دهنده خطر بقایای صنعت سیمان در مناطق خشک است. این مقاله همچنین نشان می‌دهد در کارخانه سیمان منتخب مصرف آب مجازی به ۹۰ درصد از کل مقدار ردپای آب کمک می‌کند. به‌علاوه، این مقاله نشان می‌دهد حداکثر آب مجازی مصرفی مرتبط است با منابع انرژی که  $۹/۳$  بیشتر از مصرف مستقیم آب در کارخانه مطالعه موردی است. به‌علاوه، این مقاله نشان می‌دهد ردپای آب می‌تواند با بیشترین کارایی توسط مشارکت‌های انرژی بادی و خورشیدی کاهش یابد [۱۳].

مرتضی تهمی‌پور زرنندی و همکاران (۱۳۹۶) مقاله‌ای با عنوان «ارزیابی تجارت محصولات صنعتی ایران با کشورهای مختلف از دیدگاه آب مجازی» را تألیف کردند. نتایج پژوهش یادشده بیانگر آن است که روند خالص صادرات آب مجازی وضعیت مطلوبی را نشان نمی‌دهد؛ چنان که خالص صادرات آب مجازی از ۱۱۲- میلیون مترمکعب در سال ۱۳۹۰ به ۱۱۵ میلیون مترمکعب در سال ۱۳۹۳ رسیده است. به بیان دیگر، بخش صنعت از واردکننده خالص آب مجازی به صادرکننده خالص آب تبدیل شده است [۱۴]. مرتضی تهمی‌پور زرنندی (۱۳۹۵) در مقاله‌ای با عنوان «آب مجازی» به بررسی تجارب و مطالعات انجام‌شده در ایران و جهان می‌پردازد. نتایج بررسی مطالعات انجام‌شده داخلی و خارجی نشان داد حجم تجارت‌شده آب مجازی سهم بسیار زیادی از کل منابع آب تجدیدپذیر ندارد، ولی برخی کشورها براساس آینده‌نگری‌ای که دارند، درصد خودکفایی از آب‌های

داخلی را کاهش داده و به واردات محصولات آب‌بر کشاورزی روی آورده‌اند [۱۵].

با توجه به این موضوع که محاسبه آب مجازی در تولید انرژی در تمام دنیا امر ضروری و مهم تلقی می‌شود و تحقیقات بسیاری در این زمینه صورت گرفته است، متأسفانه در کشور ایران به صورت تخصصی در زمینه آب مجازی در تولید انرژی مطالعه‌ای صورت نگرفته است. این موضوع نویسندگان را بر آن داشت به محاسبه میزان آب مصرفی هر نیروگاه در مقیاس متر مکعب در سال بپردازند و میزان آب مجازی مصرف‌شده و هزینه این آب برای تولید یک کیلووات ساعت برق تولیدی در نیروگاه‌ها را محاسبه کنند.

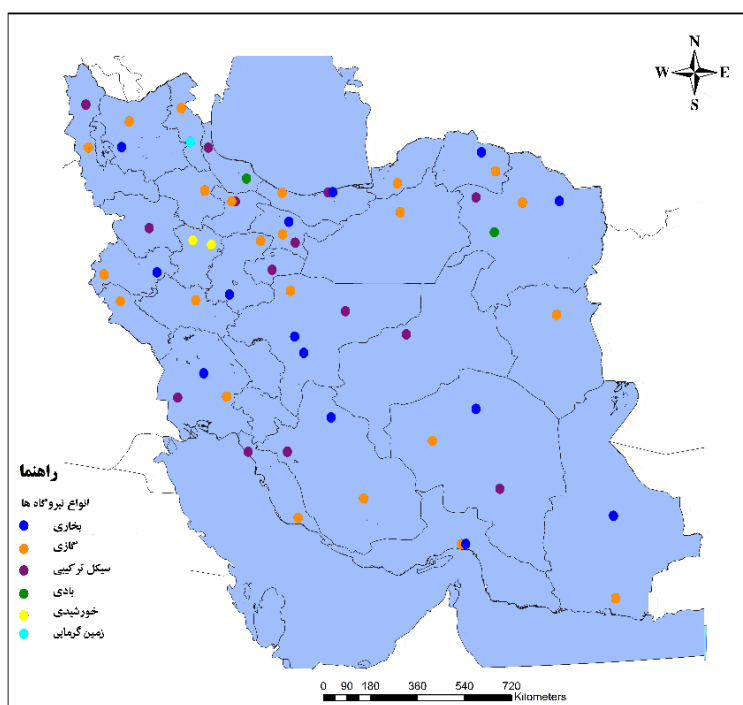
## مواد و روش‌ها

### منطقه مطالعه‌شده

در این تحقیق مطالعات روی ۵۰ نیروگاه بخاری، گازی، سیکل ترکیبی، بادی و خورشیدی به صورت نمونه صورت گرفت. بر اساس تقسیم‌بندی کشور به طبقات اقلیمی مختلف، انواع نیروگاه‌ها به طریقی انتخاب شدند که بیشتر طبقات اقلیمی کشور را تحت پوشش قرار دهند، چرا که بازدهی و عملکرد نیروگاه‌ها در شرایط آب‌وهوایی و اقلیم‌های مختلف با هم متفاوت است. همچنین، در این تحقیق سعی شد در هر استان حداقل یک نیروگاه به عنوان نمونه انتخاب شود. محل استقرار نیروگاه‌ها در شکل ۲ آورده شده است و همچنین، در جدول ۲ نام و استان قرارگیر هر نیروگاه مشخص شده است.

### محاسبه آب مجازی در نیروگاه‌ها

در حقیقت، برداشت و مصرف آب توسط انسان به میزان آب مصرفی خانگی آن محدود نمی‌شود. مقدار زیادی آب به صورت آب جاسازی‌شده در مراحل تولید، انتقال و توزیع غذایی که به سفره ما می‌آید (هرچند که با چشم دیده نمی‌شود)، وجود دارد [۱۶]. در هر سه مرحله تولید، انتقال و توزیع، آب نقش اساسی به صورت مستقیم و غیر مستقیم ایفا می‌کند. برای مثال، برای فراهم آوردن یک فنجان قهوه، ۱۴۰ لیتر؛ یک عدد تخم‌مرغ، ۱۳۵ لیتر و یک ساندویچ همبرگر، ۲۴۰۰ لیتر آب مورد نیاز است [۱۷]. بنابراین، مفهوم آب مجازی با پایه‌ای‌ترین مسائل زندگی انسان گره خورده و تمامی فعالیت‌های موجود در زندگی انسان به این مفهوم وابسته است [۱۸].

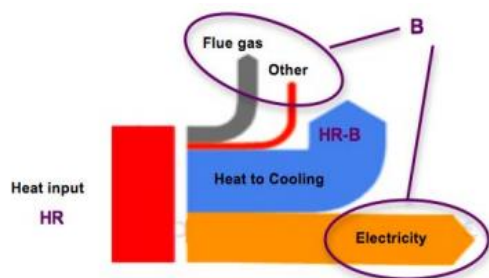


شکل ۲. نقشه موقعیت نیروگاه‌ها

جدول ۲. مشخصات نیروگاه‌های مطالعه شده

| استان             | نام                         | استان             | نام                   | نوع نیروگاه |
|-------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------|-------------|
| کرمان             | مس سرچشمه                   | آذربایجان شرقی    | سهند                  | بخاری       |
| قزوین             | شهید رجایی                  | اصفهان            | شهید منتظری           |             |
| کرمان             | زرنند                       | اصفهان            | اسلام‌آباد            |             |
| کرمانشاه          | بیستون                      | تهران             | بعثت                  |             |
| مازندران          | نکا (شهید سلیمی)            | خراسان رضوی       | طوس                   |             |
| مرکزی             | شازند                       | خراسان شمالی      | پتروشیمی خراسان       |             |
| هرمزگان           | بندرعباس                    | خوزستان           | رامین                 |             |
|                   |                             | سیستان و بلوچستان | ایرانشهر              |             |
| سیستان و بلوچستان | چابهار                      | آذربایجان شرقی    | صوفیان                | گازی        |
| خوزستان           | افق ماهشهر                  | آذربایجان غربی    | ارومیه                |             |
| فارس              | چهرم                        | اردبیل            | سبلان                 |             |
| کرمان             | سمنگان                      | اصفهان            | کاشان                 |             |
| کرمانشاه          | اسلام‌آباد غرب              | ایلام             | پالایشگاه گاز ایلام   |             |
| گلستان            | علی‌آباد                    | بوشهر             | عسلویه                |             |
| لرستان            | درود                        | تهران             | ری                    |             |
| مازندران          | نوشهر                       | خراسان جنوبی      | شهید کاوه             | سیکل ترکیبی |
| مرکزی             | رودشور                      | خراسان رضوی       | فردوسی                |             |
| هرمزگان           | بندرعباس                    | خراسان شمالی      | شیروان                |             |
| سمنان             | شهید بسطامی                 | زنجان             | سلطانیه               |             |
| کرمان             | شوباد                       | آذربایجان غربی    | خوی                   |             |
| گیلان             | پره سر                      | اصفهان            | زواره                 |             |
| مازندران          | نکا (شهید سلیمی)            | بوشهر             | گناوه                 |             |
| یزد               | سرو (چادرملو)               | تهران             | شهدای پاکدشت (دماوند) | بادی        |
| قزوین             | شهید رجایی                  | خراسان رضوی       | نیشابور               |             |
| قم                | قم                          | خوزستان           | آبادان                |             |
| کردستان           | سنندج                       | فارس              | کازرون                | فتولتاییک   |
| خراسان رضوی       | بینالود                     | گیلان             | منجیل                 |             |
| کرمان             | سولار انرژی آرکا (امیرکبیر) | همدان             | خلیج فارس             |             |

پارامتر B برحسب  $(\frac{kJ}{kWh})$  کل نرخ حرارتی ورودی از سمت سوخت نیروگاه به جز نرخ حرارتی ورودی به سیستم خنک کننده را شامل می شود. پارامتر B نشان دهنده تمام جریان گرما خروجی از نیروگاه به جز جریان گرمایی است که توسط آب در بخش خنک کننده دفع می شود. همچنین، پارامتر A برحسب  $(\frac{L}{kJ})$  میزان آب مورد نیاز برای دفع یک کیلوژول حرارت موجود در سیستم را نشان می دهد که این مقدار آب مورد نیاز به نوع سیستم خنک کننده وابسته است. در نهایت، پارامتر C برحسب  $(\frac{L}{kWh})$  آب مورد نیاز در سایر بخش های نیروگاه (شست و شوی گردوغبارها) به جز بخش خنک کننده را نشان می دهد که در واقع مقدار آن بسیار کمتر از آب مورد نیاز بخش خنک کننده است. از آنجا که مقدار پارامتر C کم است، مشخص کردن مقدار دقیق آن کار دشواری است. برای درک بهتر موضوع در شکل ۳ نمایی ساده از تعادل حرارتی در نیروگاه های فسیلی آورده شده است.



شکل ۳. تصویر ساده شده تعادل حرارتی در نیروگاه حرارتی تولید برق [۲]

مقدار آب مصرف شده در هر نیروگاه با توجه به سیستم خنک کننده و نوع نیروگاه متفاوت است. بازه پارامترهای انواع نیروگاه ها برای محاسبه آب مصرفی آنها در جدول های ۳ و ۴ آمده است.

واژه مجازی از آنجا به کار می رود که محصول مورد نظر حاوی آن مقدار آب درون خود نیست و آب حقیقی که در محصول وجود دارد، در مقایسه با آب مجازی آن مقدار بسیار ناچیزی است. آب مجازی تنها مقدار فیزیکی آب جاسازی شده در محصولات و کالاهای معامله شده نیست، بلکه یک مزیت اقتصادی است که ارزش آن طی زمان با توجه به کیفیت و مکان آن تغییر می کند [۱۹]. در صنعت برق آب مجازی شامل آب مصرفی در مراحل مختلف تولید، به ویژه خنک کاری در نیروگاه های حرارتی، تمیزکاری در نیروگاه های خورشیدی و مصرف داخلی کارکنان نیروگاه و آبیاری فضای سبز داخل نیروگاه ها است.

میزان آب مصرفی در هر نیروگاه از طریق محاسبه آب ورودی به بخش های مختلف آن قابل محاسبه است. از آنجا که بین مقدار آب مصرفی و میزان حرارت قابل دفع از نیروگاه ها ارتباط وجود دارد، می توان از روشی ساده و با دقت مناسب استفاده کرد و میزان آب مصرفی نیروگاه ها را تخمین زد. رابطه محاسبه میزان آب مصرفی نیروگاه به شرح زیر است [۲] (رابطه ۱):

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

در این رابطه I برحسب لیتر بر کیلووات ساعت  $(\frac{L}{kWh})$  میزان آب مصرفی نیروگاه بر حسب لیتر به ازای هر کیلووات ساعت انرژی الکتریکی تولیدی است. پارامتر HR برحسب کیلوژول بر کیلووات ساعت  $(\frac{kJ}{kWh})$  نشان دهنده نرخ حرارتی یا میزان حرارت ورودی مورد نیاز حاصل از سوخت نیروگاه بر حسب کیلوژول، برای تولید یک کیلووات توان الکتریکی به مدت یک ساعت است. میان بازده نیروگاه و نرخ حرارتی نیروگاه ها رابطه معکوس برقرار است و بازده در هر نیروگاه یک مقدار مشخص و تعیین شده است، برای محاسبه HR از رابطه ۲ می توان بهره جست [۲]:

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

جدول ۳. پارامترهای مربوط به میزان آب مصرفی نیروگاه ها [۲]

| نوع نیروگاه   | HR نرخ حرارتی $(\frac{kJ}{kWh})$ | B گرمای خروجی $(\frac{kJ}{kWh})$ | C آب مورد نیاز در سایر بخش ها $(\frac{L}{kWh})$ |
|---------------|----------------------------------|----------------------------------|---|
| نیروگاه گازی  | ۷۲۰۰                             | ۵۱۹۵                             | ۰/۰۲۵   |
| نیروگاه بخاری | ۹۵۰۰ - ۹۰۰۰                      | ۵۶۵۰                             | ۰/۱۵  |

جدول ۴. پارامتر مربوط به میزان آب مصرفی سیستم‌های خنک‌کننده [۲]

| نوع سیستم خنک‌کننده | A آب برداشتی ( $\frac{L}{KJ}$ ) | A آب مصرفی ( $\frac{L}{KJ}$ ) |
|---------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| گردش باز آبی        | ۰/۰۳۴ - ۰/۰۲۲                   | ۰/۰۰۰۴۵                       |
| برج تر              | ۰/۷۷۰۰۰ - ۰/۰۰۰۳۴               | ۰/۰۰۰۴۲                       |
| برج خشک             | .                               | .                             |

می‌برند. مطابق با محاسبات انجام‌شده مصرف آب در نیروگاه‌های فسیلی قابل توجه است. در مقابل نیروگاه‌هایی که بر پایه انرژی تجدیدپذیر (که در این تحقیق نیروگاه بادی و فتوولتائیک در نظر گرفته شده‌اند) هستند، میزان آب مصرفی بسیار ناچیزی دارند. به عنوان مثال، نیروگاه‌های بادی در پروسه تولید برق مصرف آب ندارند و یا نیروگاه‌های فتوولتائیک نیز از آب فقط برای نظافت و نگهداری صفحات سلول و یا به عنوان سیال درون سلول خورشیدی استفاده می‌کنند [۲۰ و ۲۱].

برای به‌کارگیری معادلات ۱ و ۲، و محاسبه آب مجازی مصرفی در نیروگاه حرارتی اطلاعات جدول ۵ مورد نیاز است.

همان‌طور که در جدول ۵ آمده است، نیروگاه‌های گازی فاقد سیستم خنک‌کننده‌اند و در نیروگاه‌های بخاری ۴۰ درصد سیستم خنک‌کننده برج خشک، ۴۰ درصد برج تر و ۲۰ درصد سیستم گردش باز آبی و یا چرخه باز وجود دارد. همچنین، این آمار در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی به دو بخش تقسیم می‌شود. واحد گازی نیروگاه‌های سیکل ترکیبی فاقد سیستم خنک‌کننده و واحد بخاری آن به گونه‌ای است که ۸۵ درصد متعلق به سیستم خنک‌کننده برج خشک و ۱۵ درصد متعلق به سیستم گردش باز آبی است. با توجه به مکان جغرافیایی نیروگاه‌ها منبع تأمین آب مورد نیاز نیروگاه‌ها نیز متفاوت است. در مکان‌هایی که سطح آب زیرزمینی بالاست، از چاه فلن؛ در مکان‌هایی که نیروگاه نزدیک به رودخانه و یا آب دریا و دریاچه واقع شده، از آب سطحی؛ در مکان‌های دیگر آب از طریق حفر چاه‌های نسبتاً عمیق و یا از طریق خط لوله فراهم می‌شود.

با استفاده از اطلاعات موجود در جدول‌ها و روابط یادشده، آب مصرف‌شده حین تولید برق در تک‌تک نیروگاه‌ها محاسبه شده و میانگین نتایج آن در جدول ۶ آورده شده است.

همچنین، می‌توان از راندمان هر نیروگاه نیز برای محاسبه آب مصرفی آن بهره جست. واضح است که هرچه راندمان نیروگاه بیشتر شود، میزان حرارت تلف‌شده در آن کمتر است. بنابراین، می‌توان بازه آب مصرفی را به بازه راندمان هر نوع نیروگاه ارتباط داد. به بیان ساده، اگر رابطه بیان‌شده 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  $\eta$  از رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$I = I_{max} + \frac{I_{min} - I_{max}}{\eta_{max} - \eta_{min}} \times (\eta - \eta_{min}) \quad (3)$$

در ادامه خواهیم دید که با استفاده از این روش میزان آب مصرفی سالانه در انواع نیروگاه‌ها محاسبه خواهد شد. سپس، با توجه به هزینه هر واحد آب در بخش‌های مختلف (آب خام صنعتی، آب آبیاری و شرب) و میزان مصرف به‌دست‌آمده به برآورد هزینه‌های ناشی از مصرف آب خواهیم پرداخت.

#### یافته‌ها

از آنجا که در این تحقیق مجال بررسی کلیه چرخه زندگی یک نیروگاه برق و مصرف آب در آن (از گهواره تا گور) میسر نبوده است، به تحلیل و بررسی میزان آب مصرفی تنها در بخش‌های قابل محاسبه یعنی در فرایند تولید برق، مصرف آب در بخش تأسیسات و ادارات و نیز میزان آب مصرفی برای آبیاری فضای سبز نیروگاه‌ها پرداخته شده است.

#### آب در فرایند تولید برق

در این تحقیق تجزیه و تحلیل‌ها پیرامون انواع نیروگاه‌های بخار، گاز، سیکل ترکیبی، بادی و فتوولتائیک انجام گرفته است. سرمنشأ و منبع آب مورد نیاز در نیروگاه‌های حرارتی مورد مطالعه بسته به مکان جغرافیایی آن نیروگاه، از خط لوله، چاه عمیق، آب دریا و یا آب جاری رودخانه بهره

جدول ۵. اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه آب مجازی مصرفی در فرایند تولید برق نیروگاه حرارتی

| نیروگاه        | نام نیروگاه         | نوع خنک کننده | A<br>( $\frac{L}{kJ}$ ) | HR<br>( $\frac{kJ}{kWh}$ ) | B<br>( $\frac{kJ}{kWh}$ ) | C<br>( $\frac{L}{kWh}$ ) | Efficiency<br>(درصد) |
|----------------|---------------------|---------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------|
| بخاری          | سهند                | برج خشک       | ۰                       | ۹۴۷۳/۶۸                    | ۵۶۵۰                      | ۰/۱۵                     | ۰/۳۸                 |
|                | شهید منتظری         | برج خشک       | ۰                       | ۱۰۵۸۸/۲                    | ۵۶۵۰                      | ۰/۱۵                     | ۰/۳۴                 |
|                | اسلام آباد اصفهان   | برج تر        | ۰/۰۰۰۴۲                 | ۱۰۰۰۰                      | ۵۶۵۰                      | ۰/۱۵                     | ۰/۳۶                 |
|                | بعثت                | برج تر        | ۰/۰۰۰۴۲                 | ۱۱۶۱۲/۹                    | ۵۶۵۰                      | ۰/۱۵                     | ۰/۳۱                 |
|                | طوس                 | برج خشک       | ۰                       | ۹۷۲۹/۷                     | ۵۶۵۰                      | ۰/۱۵                     | ۰/۳۷                 |
|                | پتروشیمی خراسان     | گردش آب باز   | ۰/۰۰۰۴۵                 | ۵۳۷۳/۱۳                    | ۵۶۵۰                      | ۰/۱۵                     | ۰/۶۷                 |
|                | رامین               | برج تر        | ۰/۰۰۰۴۲                 | ۱۰۰۰۰                      | ۵۶۵۰                      | ۰/۱۵                     | ۰/۳۶                 |
|                | ایران شهر           | برج خشک       | ۰                       | ۱۱۶۱۲/۹                    | ۵۶۵۰                      | ۰/۱۵                     | ۰/۳۱                 |
|                | مس سرچشمه           | برج تر        | ۰/۰۰۰۴۲                 | ۱۴۴۰۰                      | ۵۶۵۰                      | ۰/۱۵                     | ۰/۲۵                 |
|                | شهید رجایی          | برج خشک       | ۰                       | ۱۰۰۰۰                      | ۵۶۵۰                      | ۰/۱۵                     | ۰/۳۶                 |
|                | زرند                | برج تر        | ۰/۰۰۰۴۲                 | ۱۳۳۳۳/۳                    | ۵۶۵۰                      | ۰/۱۵                     | ۰/۲۷                 |
|                | بیستون              | برج تر        | ۰/۰۰۰۵                  | ۹۴۷۳/۷                     | ۵۶۵۰                      | ۰/۱۵                     | ۰/۳۸                 |
|                | نکا (شهید سلیمی)    | گردش آب باز   | ۰/۰۰۰۴۵                 | ۹۷۲۹/۷۳                    | ۵۶۵۰                      | ۰/۱۵                     | ۰/۳۷                 |
|                | شازند               | برج خشک       | ۰                       | ۹۷۲۹/۷۳                    | ۵۶۵۰                      | ۰/۱۵                     | ۰/۳۷                 |
| بندرعباس       | گردش آب باز         | ۰/۰۰۰۴۵       | ۱۰۲۸۵/۷۱                | ۵۶۵۰                       | ۰/۱۵                      | ۰/۳۵                     |                      |
| گازی           | صوفیان              | -             | ۰                       | ۱۶۳۶۳/۶۴                   | ۵۱۹۵                      | ۰/۰۲۵                    | ۰/۲۲                 |
|                | ارومیه              | -             | ۰                       | ۱۷۱۴۲/۸۶                   | ۵۱۹۵                      | ۰/۰۲۵                    | ۰/۲۱                 |
|                | سیلان               | -             | ۰                       | ۱۱۶۱۲/۹                    | ۵۱۹۵                      | ۰/۰۲۵                    | ۰/۳۱                 |
|                | کاشان               | -             | ۰                       | ۱۱۲۵۰                      | ۵۱۹۵                      | ۰/۰۲۵                    | ۰/۳۲                 |
|                | پالایشگاه گاز ایلام | -             | ۰                       | ۱۲۰۰۰                      | ۵۱۹۵                      | ۰/۰۲۵                    | ۰/۳۰                 |
|                | عسلویه              | -             | ۰                       | ۱۱۲۵۰                      | ۵۱۹۵                      | ۰/۰۲۵                    | ۰/۳۲                 |
|                | ری                  | -             | ۰                       | ۱۶۳۶۳/۶۴                   | ۵۱۹۵                      | ۰/۰۲۵                    | ۰/۲۲                 |
|                | شهید کاوه           | -             | ۰                       | ۱۰۹۰۹/۰۹                   | ۵۱۹۵                      | ۰/۰۲۵                    | ۰/۳۳                 |
|                | فردوسی              | -             | ۰                       | ۱۲۰۰۰                      | ۵۱۹۵                      | ۰/۰۲۵                    | ۰/۳۰                 |
|                | شیروان              | -             | ۰                       | ۱۰۹۰۹/۰۹                   | ۵۱۹۵                      | ۰/۰۲۵                    | ۰/۳۳                 |
|                | سلطانیه             | -             | ۰                       | ۱۱۶۱۲/۹                    | ۵۱۹۵                      | ۰/۰۲۵                    | ۰/۳۱                 |
|                | شهید بسطامی         | -             | ۰                       | ۱۱۲۵۰                      | ۵۱۹۵                      | ۰/۰۲۵                    | ۰/۳۲                 |
|                | افق ماهشهر          | -             | ۰                       | ۱۳۳۳۳/۳                    | ۵۱۹۵                      | ۰/۰۲۵                    | ۰/۲۷                 |
|                | چابهار              | -             | ۰                       | ۱۲۴۱۲/۸                    | ۵۱۹۵                      | ۰/۰۲۵                    | ۰/۲۹                 |
| چهرم           | -                   | ۰             | ۱۱۲۵۰                   | ۵۱۹۵                       | ۰/۰۲۵                     | ۰/۳۲                     |                      |
| سمنگان         | -                   | ۰             | ۱۰۵۸۸/۲                 | ۵۱۹۵                       | ۰/۰۲۵                     | ۰/۳۴                     |                      |
| اسلام آباد غرب | -                   | ۰             | ۱۲۰۰۰                   | ۵۱۹۵                       | ۰/۰۲۵                     | ۰/۳۰                     |                      |
| علی آباد       | -                   | ۰             | ۱۲۰۰۰                   | ۵۱۹۵                       | ۰/۰۲۵                     | ۰/۳۰                     |                      |
| درود           | -                   | ۰             | ۱۶۷۴۴/۱۹                | ۵۱۹۵                       | ۰/۰۲۵                     | ۰/۲۱                     |                      |
| نوشهر          | -                   | ۰             | ۱۶۳۶۳/۶۴                | ۵۱۹۵                       | ۰/۰۲۵                     | ۰/۲۲                     |                      |
| رودشور         | -                   | ۰             | ۹۰۰۰                    | ۵۱۹۵                       | ۰/۰۲۵                     | ۰/۴۰                     |                      |
| بندرعباس       | -                   | ۰             | ۲۱۱۷۶/۴۷                | ۵۱۹۵                       | ۰/۰۲۵                     | ۰/۱۷                     |                      |
| سیکل ترکیبی    | خوی واحد گازی       | -             | ۰                       | ۱۱۶۹۰/۹                    | ۵۱۹۵                      | ۰/۰۲۵                    | ۰/۳۱                 |
|                | خوی واحد بخاری      | برج خشک       | ۰                       | ۸۱۸۱/۸۲                    | ۵۶۵۰                      | ۰/۱۵                     | ۰/۴۴                 |
|                | زواره واحد گازی     | -             | ۰                       | ۱۰۵۸۸/۲۴                   | ۵۱۹۵                      | ۰/۰۲۵                    | ۰/۳۴                 |



ادامه جدول ۵. اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه آب مجازی مصرفی در فرایند تولید برق نیروگاه حرارتی

| Efficiency<br>(درصد) | C<br>( $\frac{L}{kWh}$ ) | B<br>( $\frac{kJ}{kWh}$ ) | HR<br>( $\frac{kJ}{kWh}$ ) | A<br>( $\frac{L}{kJ}$ ) | نوع خنک‌کننده | نام نیروگاه            | نیروگاه |
|----------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------------|---------------|------------------------|---------|
| ۰/۴۸                 | ۰/۱۵                     | ۵۶۵۰                      | ۷۵۰۰                       | ۰                       | برج خشک       | زواره واحد بخاری       |         |
| ۰/۳۱                 | ۰/۰۲۵                    | ۵۱۹۵                      | ۱۱۶۱۲/۹                    | ۰                       | -             | گناوه واحد گازی        |         |
| ۰/۴۵                 | ۰/۱۵                     | ۵۶۵۰                      | ۸۰۰۰                       | ۰                       | برج خشک       | گناوه واحد بخاری       |         |
| ۰/۳۳                 | ۰/۰۲۵                    | ۵۱۹۵                      | ۱۰۹۰۹/۰۹                   | ۰                       | -             | شهدای پاکدشت گازی      |         |
| ۰/۴۶                 | ۰/۱۵                     | ۵۶۵۰                      | ۷۸۲۶/۰۹                    | ۰                       | برج خشک       | شهدای پاکدشت بخاری     |         |
| ۰/۳۰                 | ۰/۰۲۵                    | ۵۱۹۵                      | ۱۲۰۰۰                      | ۰                       | -             | نیشابور واحد گازی      |         |
| ۰/۴۶                 | ۰/۱۵                     | ۵۶۵۰                      | ۷۸۲۶/۰۹                    | ۰                       | برج خشک       | نیشابور واحد بخاری     |         |
| ۰/۳۲                 | ۰/۰۲۵                    | ۵۱۹۵                      | ۱۱۰۷۶/۹۲                   | ۰                       | -             | آبادان واحد گازی       |         |
| ۰/۴۴                 | ۰/۱۵                     | ۵۶۵۰                      | ۸۱۸۱/۸                     | ۰                       | برج خشک       | آبادان واحد بخاری      |         |
| ۰/۴۴                 | ۰/۰۲۵                    | ۵۱۹۵                      | ۸۱۸۱/۸                     | ۰                       | -             | کازرون واحد گازی       |         |
| ۰/۴۴                 | ۰/۱۵                     | ۵۶۵۰                      | ۸۱۸۱/۸                     | ۰                       | برج خشک       | کازرون واحد بخاری      |         |
| ۰/۳۰                 | ۰/۰۲۵                    | ۵۱۹۵                      | ۱۲۰۰۰                      | ۰                       | -             | شهیدرجایی واحد گازی    | سیکل    |
| ۰/۳۲                 | ۰/۱۵                     | ۵۶۵۰                      | ۱۱۲۵۰                      | ۰                       | برج خشک       | شهیدرجایی واحد بخاری   | ترکیبی  |
| ۰/۲۹                 | ۰/۰۲۵                    | ۵۱۹۵                      | ۱۲۴۱۳/۸                    | ۰                       | -             | قم واحد گازی           |         |
| ۰/۳۰                 | ۰/۱۵                     | ۵۱۹۵                      | ۱۲۰۰۰                      | ۰                       | برج خشک       | قم واحد بخاری          |         |
| ۰/۳۲                 | ۰/۰۲۵                    | ۵۱۹۵                      | ۱۱۲۵۰                      | ۰                       | -             | سنندج واحد گازی        |         |
| ۰/۴۷                 | ۰/۱۵                     | ۵۶۵۰                      | ۷۶۵۹/۵۷                    | ۰                       | برج خشک       | سنندج واحد بخاری       |         |
| ۰/۳۳                 | ۰/۰۲۵                    | ۵۱۹۵                      | ۱۰۹۰۹/۰۹                   | ۰                       | -             | شوباد واحد گازی        |         |
| ۰/۳۳                 | ۰/۱۵                     | ۵۶۵۰                      | ۱۰۹۰۹/۰۹                   | ۰                       | برج خشک       | شوباد واحد بخاری       |         |
| ۰/۳۴                 | ۰/۰۲۵                    | ۵۱۹۵                      | ۱۰۵۸۸/۲۴                   | ۰                       | -             | پره سر واحد گازی       |         |
| ۰/۵۰                 | ۰/۱۵                     | ۵۶۵۰                      | ۷۲۰۰                       | ۰/۰۰۰۴۵                 | گردش باز آبی  | پره سر واحد بخاری      |         |
| ۰/۳۱                 | ۰/۰۲۵                    | ۵۱۹۵                      | ۱۱۶۱۲/۹                    | ۰                       | -             | نکا (شهید سلیمی) گازی  |         |
| ۰/۴۶                 | ۰/۱۵                     | ۵۶۵۰                      | ۷۸۲۶/۰۹                    | ۰/۰۰۰۴۵                 | گردش باز آبی  | نکا (شهید سلیمی) بخاری |         |
| ۰/۲۹                 | ۰/۰۲۵                    | ۵۱۹۵                      | ۱۲۴۱۳/۸                    | ۰                       | -             | سرو (چادرملو) گازی     |         |
| ۰/۴۷                 | ۰/۱۵                     | ۵۶۵۰                      | ۷۶۵۹/۵۷                    | ۰                       | برج خشک       | سرو (چادرملو) بخاری    |         |

منبع: محاسبات نگارنده و [۲]

جدول ۶. میانگین مقدار آب مصرف شده (L/Kwh) هنگام تولید برق به تفکیک انواع نیروگاه‌ها (نتایج محاسبات نگارنده)

| نیروگاه     | مقدار مصرف آب (L/Kwh) |
|-------------|-----------------------|
| بخاری       | ۱/۳۸                  |
| گازی        | ۰/۰۲۵                 |
| سیکل ترکیبی | ۰/۲۹                  |

بعدی قرار خواهند گرفت. همچنین، برای اثبات این ادعا که نوع سیستم خنک‌کننده نیروگاه‌ها نیز نقش کلیدی در تعیین میزان آب مصرفی نیروگاه‌ها در این مرحله دارند، جدول ۷ ترسیم شده است.

همان‌طور که در جدول ۶ آمده است، میانگین مصرف آب بر حسب لیتر بر کیلووات ساعت نشان می‌دهد نیروگاه بخاری بیشترین مصرف آب را هنگام تولید برق داشته و نیروگاه سیکل ترکیبی و گازی به ترتیب در جایگاه‌های

جدول ۷. مقدار آب صرف شده هنگام تولید برق به تفکیک انواع خنک‌کننده‌ها (نتایج محاسبات نگارنده)

| نوع سیستم خنک‌کننده  | میانگین مصرف آب (L/Kwh) |
|----------------------|-------------------------|
| برج تر               | ۲/۵۹                    |
| برج خشک              | ۰/۱۵                    |
| چرخه باز آبی         | ۱/۲۴                    |
| فاقد سیستم خنک‌کننده | ۰/۰۲۵                   |

همان‌طور که در جدول ۷ نشان داده شده است، نیروگاه‌های گازی و واحدهای گازی نیروگاه‌های سیکل ترکیبی که فاقد سیستم خنک‌کننده هستند از لحاظ صرفه‌جویی در مصرف آب بهترین گزینه‌اند. همچنین، نیروگاه‌هایی با سیستم خنک‌کننده برج تر از پرمصرف‌ترین مراکز به شمار می‌آیند. بنابراین، این ادعا که نوع سیستم خنک‌کننده نقش کلیدی در مصرف آب دارد، تأیید می‌شود و این پدیده که در زمان تصمیم‌گیری برای ساخت نیروگاه چه نوع سیستم خنک‌کننده‌ای در نظر گرفته شود، بسیار مسئله‌بااهمیتی است. از میان نیروگاه‌های تجدیدپذیر نیروگاه بادی در فرایند تولید برق هیچ مصرف آبی ندارد [۲۲] و نیروگاه فتوولتاییک فقط برای تمیز کردن سطوح جذب و بازتاب نور خورشید مانند آینه، هلیواستات<sup>۱</sup> و پانل‌های فتوولتاییک (PV) از آب استفاده می‌کنند [۲۳]

#### مصرف آب در بخش کارکنان

در این قسمت با توجه به استاندارد مصرف آب روزانه هر فرد، ساعت‌های کارکرد نیروگاه، تعداد افراد مشغول به کار و شیفت‌های فعال نیروی انسانی میزان مصرف آب محاسبه شده است. قبل از شروع محاسبات داده‌های پرت شناسایی و حذف شدند. مصرف آب در بخش اداری در انواع نیروگاه‌های تجدیدپذیر و فسیلی در جدول ۸ آورده شده است.

#### آب در بخش آبیاری فضای سبز و نهال‌کاری شده

بر اساس قانون هوای پاک شهرک‌ها، ایجاد فضای سبز و درختکاری به منظور جلوگیری از آلودگی هوا و کاهش صدمات به محیط زیست اهمیت بسیار زیادی دارد و بر اساس قوانین و مقررات محیط زیستی، واحدهای بزرگ

صنعتی موظف به ایجاد ۱۰ تا ۲۵ درصد از مساحت واحد صنعتی به فضای سبز و کشت نهال‌کاری هستند. از آنجا که نیروگاه‌های حرارتی تولید برق از جمله واحدهای صنعتی بزرگ محسوب می‌شوند، با ایجاد فضای سبز در این واحدهای صنعتی آلاینده باید میزان آلودگی این واحدها را به حداقل رساند. نیروگاه‌های انرژی تجدیدپذیر در پروسه تولید برق آلاینده‌ای منتشر نمی‌سازند، بنابراین ملزم به رعایت این قانون نیز نیستند. بر این اساس، محاسبات صورت‌پذیرفته در مورد میزان آب مصرفی برای آبیاری فضای مشجر نیروگاهی فقط برای نیروگاه‌های حرارتی انجام شده است.

در این تحقیق برای محاسبه میزان آب مورد نیاز به منظور آبیاری فضای مشجر اطراف فضای نیروگاهی فرض می‌شود که نیروگاه‌های واقع شده در اقلیم فراه خشک، خشک و نیمه‌خشک از نهال کاج و در سایر مناطق از نهال صنوبر استفاده کرده‌اند. مطابق با تحقیق انجام‌شده توسط دارابی و همکاران (۱۳۹۹) درخت کاج به عنوان یک گونه تاب‌آور در محیط‌های گرم و خشک با تنش آبی ذکر شده است [۲۵]. همچنین، مطالعات بسیاری از جمله مطالعات رستمی‌کیا و رحمتی (۱۳۹۴)، بلوکی و همکاران (۱۳۸۹) و قاسمی و همکاران (۱۳۹۰) نشان می‌دهد مناطق با تنش آبی کمتر محل مناسبی برای کاشت نهال صنوبر هستند [۲۶-۲۸].

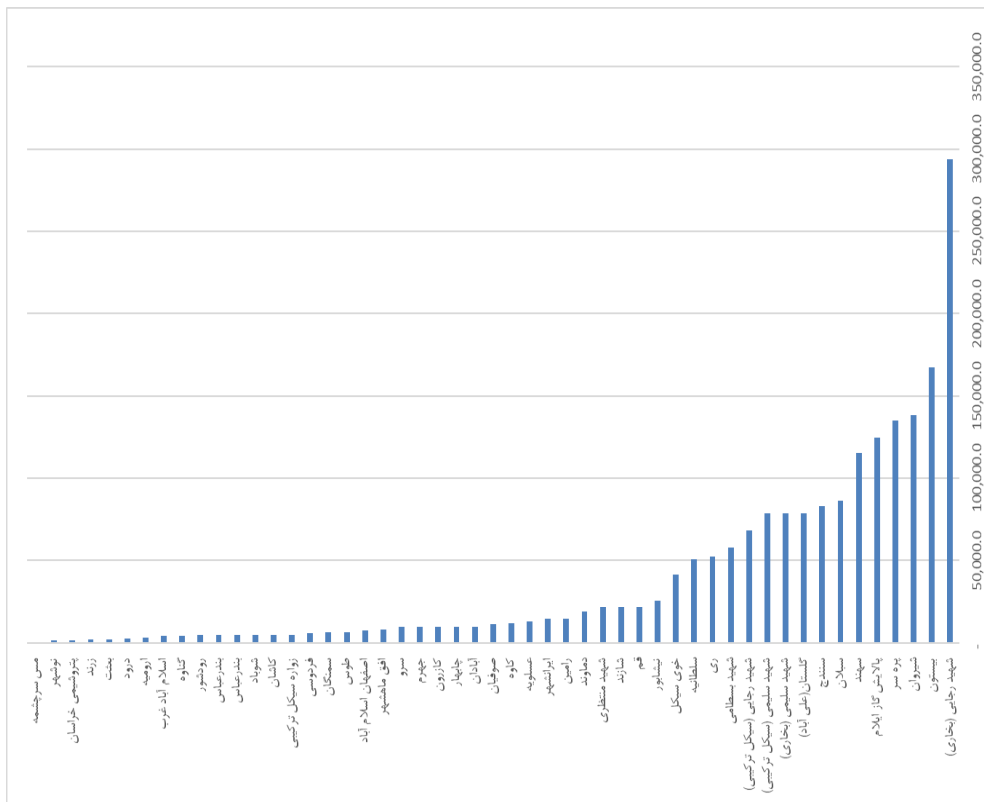
میانگین سالانه نیاز آبی گونه کاج در شرایط حداقل ممکن آبیاری ۳۹۷/۴۴ متر مکعب در هکتار است. این مقدار برای گونه صنوبر ۴۶۲۰ متر مکعب در هکتار بیان شده است [۲۹ و ۳۰]. با توجه به مساحت نیروگاه‌ها و نوع نهال کشت‌شده، میزان آب مصرفی در هر سال قابل محاسبه است. میزان آب مصرفی در این بخش وابسته به مساحت هر نیروگاه است، بنابراین فارغ از نوع نیروگاه میزان مصرف آب به بزرگی فضای متعلق به یک نیروگاه

1. heliostats

وابسته است. برای سهولت در مقایسه میزان آب مصرفی نمودار زیر ارائه شده است. بر اساس نتایج که در شکل ۴ نیز مشخص است، بیشترین آب مصرفی در این بخش به ترتیب مربوط به نیروگاه شهید رجایی (واحد بخاری)، بیستون (بخاری) و شیروان (گازی) است. در این تحقیق مقرر شد که هزینه آب مجازی مصرف شده نیز محاسبه شود. جدول ۹ نرخ قیمت آب در بخش‌های مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۸. مصرف آب بخش اداری در انواع نیروگاه‌ها

| نوع نیروگاه | ساعات کارکرد نیروگاه در سال [۲۴] | مقدار آب مصرفی بخش اداری (مترمکعب در سال) |
|-------------|----------------------------------|---|
| بخاری       | ۶۱۳۲                             | ۱۳۰۲/۵۳                                   |
| گازی        | ۷۳۵۸/۴                           | ۹۴۳/۹۰                                    |
| سیکل ترکیبی | ۷۳۵۸/۴                           | ۱۳۰۹/۹۴                                   |
| بادی        | ۸۴۹۷                             | ۱۰۷۴/۱۹                                   |
| فتوولتائیک  | ۸۴۹۷                             | ۱۰۷۴/۱۹                                   |



شکل ۴. مقایسه میزان آب مصرفی برای آبیاری به تفکیک نیروگاه‌ها (مترمکعب در سال)

جدول ۹. تعرفه آب مشترکان غیر خانگی در پایان سال ۱۳۹۹ (سنت بر لیتر) [۳۱]

| قیمت آب در بخش‌های مختلف                       | کاربری صنعتی | دستگاه‌های اجرایی | کاربری عمومی (فضای سبز) |
|--|--------------|-------------------|-------------------------|
| قیمت هر واحد آب (ریال بر مترمکعب)              | ۷۵۵۰         | ۱۱۷۲۰             | ۱۰۱۹۲                   |
| قیمت هر واحد آب (سنت بر مترمکعب <sup>۱</sup> ) | ۳/۴۳         | ۵/۳۳              | ۴/۶۳                    |

۱. با احتساب دلار اواسط سال ۱۳۹۹ (۲۲ هزار تومان)

مقادیر مصرف در بخش‌های مختلف را نشان می‌دهد. میانگین مصرف آب در نیروگاه‌های نمونه برای هر بخش نوشته شده است.

با توجه به میزان آب مصرفی در هر بخش و تعرفه قیمت آب و میزان تولید برق یک نیروگاه در یک سال، می‌توان هزینه آب مجازی را محاسبه کرد. جدول ۱۰

جدول ۱۰. میزان مصرف آب در انواع نیروگاه‌ها در بخش‌های مختلف بر حسب متر مکعب در سال

| نوع نیروگاه | فرایند تولید | بخش اداری و پرسنل | آبیاری فضای مشجر | مجموع      |
|-------------|--------------|-------------------|------------------|------------|
| بخاری       | ۵۹۵۳۱۵۳      | ۱۳۰۲/۵۳           | ۵۰۲۷۳            | ۶۰۰۴۷۲۸/۵۳ |
| گازی        | ۴۴۶۴۱        | ۹۴۳/۹۰            | ۳۰۴۶۰            | ۷۶۰۴۴/۹    |
| سیکل ترکیبی | ۱۰۳۹۲۲       | ۱۳۰۹/۹۴           | ۳۸۳۳۲            | ۱۴۳۵۶۳/۹۴  |
| بادی        | ۰            | ۱۰۷۴/۱۹           | ۰                | ۱۰۷۴/۱۹    |
| فتوولتائیک  | ۵۹۵۷         | ۱۰۷۴/۱۹           | ۰                | ۷۰۳۱/۱۹    |

است. اگرچه سیستم خنک‌کننده یک‌بارگذر آب کمتری نسبت به برج تر مصرف می‌کند، اما از نظر آلودگی حرارتی و تأثیراتی که با افزایش دمای آب به آبزیان وارد می‌کند نیز هزینه‌هایی برای محیط زیست دارد که محاسبه ارزش آن خسارت مورد بحث این تحقیق نیست. مصرف آب در بخش اداری تابع تعداد نیروی انسانی یک مرکز و در بخش آبیاری تابع مساحت یک نیروگاه است. بنابراین، بر اساس نتایج به‌دست‌آمده که در شکل ۵ مشخص است، کل مصرف آب در انواع نیروگاه‌ها به قرار زیر است:

بخاری < سیکل ترکیبی < گازی < فتوولتائیک < بادی

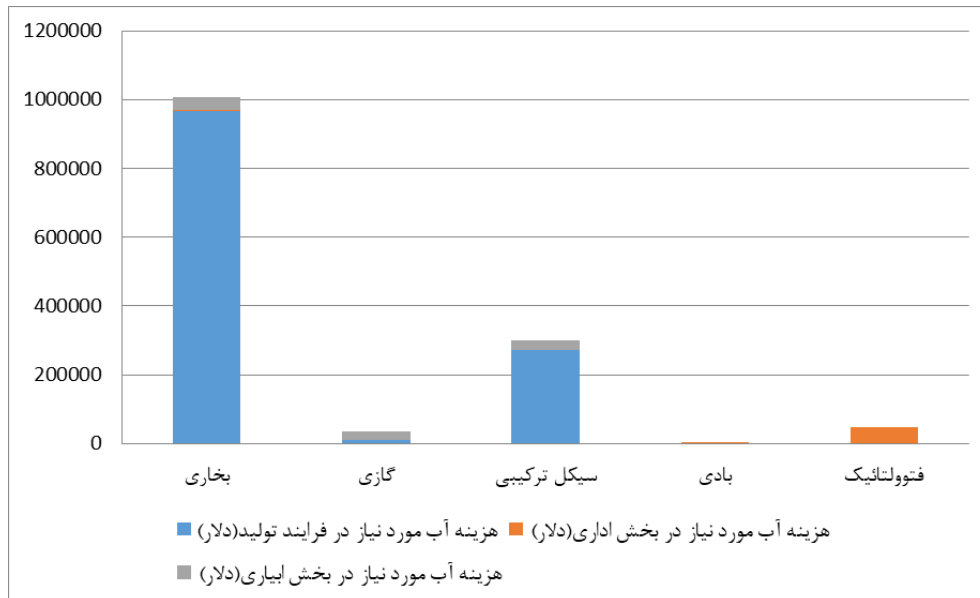
میزان مصرف آب در انواع نیروگاه‌ها تابع مشخصات فنی آن نیروگاه است. برای مثال، در بخش فرایند تولید برق میزان آب مصرفی تابع نوع نیروگاه است و حتی نوع سیستم خنک‌کننده در مصرف آب تأثیر به‌سزایی دارد، نیروگاه بخاری با اختلاف میانگین مصرف بیشتری نسبت به سایرین دارد. از بین ۱۵ نیروگاه بخاری ۵ نیروگاه اصفهان، بعثت، رامین، مس سرچشمه، زرنند و بیستون دارای سیستم خنک‌کننده برج تر و نیروگاه‌های پتروشیمی خراسان، شهید سلیمی و بندرعباس از نوع گردش آب باز بوده‌اند. در نتیجه، نوع سیستم خنک‌کننده موجب اختلاف شدید میانگین مصرف آب نیروگاه بخاری با سایرین شده



شکل ۵. مقدار آب مصرفی در تمامی فرایندهای تولید برق در نیروگاه (تولید، اداری، آبیاری)

نیروگاه طی یک سال فعالیت خود چه مقدار هزینه بابت آب مجازی مصرفی می‌پردازد. نتایج این محاسبات در شکل ۶ قابل ملاحظه است.

با توجه به ارزش هر واحد آب در کشور در جدول ۹ مقدار آب مصرف شده طی یک سال توسط یک نیروگاه را می‌توان محاسبه کرد. همچنین، مشخص می‌شود یک



شکل ۶: هزینه ناشی از آب مجازی (دولار در سال)

خنک‌کننده در صرفه‌جویی مصرف آب نقش مهمی ایفا می‌کند. هرچند که 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 ناچیز و قابل چشم‌پوشی است، اما مصرف زیاد آب در فرایندهای نیروگاهی برای تولید برق به عنوان یک صنعت آب‌بر نشان می‌دهد با انتخاب آگاهانه در مسیر توسعه انرژی می‌توان مقدار قابل توجهی از هدررفت منابع آب و نیز کاهش آلودگی حرارتی منابع آبی (در سیستم‌های خنک‌کننده یک‌بارگذر) جلوگیری کرد.

برای اطمینان به محاسبات میزان مصرف آب به ازای هر کیلووات ساعت در انواع تکنولوژی‌های تولید برق انجام شده روی نیروگاه‌های منتخب فسیلی و تجدیدپذیر داخل کشور، نتایج این تحقیق با دو مقاله معتبر زیر مقایسه و اعتبارسنجی شد.

در تحقیق جامعی پیترو و گلک [۳۲] به رابطه میان آب و انرژی پرداختند. در این تحقیق میزان آب مصرفی به ازای هر کیلووات ساعت برق تولیدی در انواع تکنولوژی‌های تولید برق و انواع سیستم‌های خنک‌کن بررسی شد. نتایج تحقیق آنها نشان داد مصرف آب در

### بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق میزان آب مجازی مصرف شده 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. میزان مصرف آب مجازی برابر با ۲/۲ لیتر بر کیلووات ساعت برای نیروگاه‌های بخاری با سیستم خنک‌کننده برج تر، 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، ۰/۰۲۵ 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 مصرف آب در انواع نیروگاه‌ها به این ترتیب است: بخاری < سیکل ترکیبی < گازی < فتوولتائیک < بادی

بنابراین، به منظور توسعه و رشد صنعت نیروگاهی کشور، انتخاب نوع نیروگاه و به‌ویژه نوع سیستم

- Commission. Public Interest Energy Research Google Scholar.2009
- [8].Chini C, Stillwell A. The changing virtual water trade network of the European electric grid. *Applied Energy*.2020; 260, 114151.
- [9].Zhang C, He G, Zhang Q, Liang S, Zipper S, Guo R, Zhao X, Zhong L, Wang J. The evolution of virtual water flows in China's electricity transmission network and its driving forces. *Journal of Cleaner Production*.2020;242, 118336.
- [10]. Chen X, Ma Z, Tan X, Zhao Y, Liu C, Tan F, Yang F. Analysis of water resource benefits due to power grid interconnections using the virtual water method. *Global Energy Interconnection*,2019; 2(3), 276–284.
- [11]. Liao X, Zhao X, Hall J, Guan D. Categorising virtual water transfers through China's electric power sector. *Applied Energy*.2018; 226, 252–260.
- [12]. Fthenakis V, Kim H. Life-cycle uses of water in US electricity generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, 2010;14(7), 2039–2048.
- [13]. Hosseinian M, nezam aslami R. A model for calculating the water footprint of cement production with the approach of reducing water consumption through energy efficiency (a case study in western Iran). *Sharif Civil Engineering*.1398;2 (3), 123–133.[ *Persian*]
- [14]. Tahami Pour Zarandi M, Dashtban Faroji S, Javaherdehi S. The Assessment of Iran's Industrial Products Trade with Other Countries from the Perspective of Virtual Water, *Journal of Economics and Modeling*.2017;8(30), pp. 143-187.[ *Persian*]
- [15]. Tahamipour M. Virtual water, review of experiences and studies conducted in Iran and the world. Deputy of Infrastructure Research and Production Affairs, Research Center of the Islamic Consultative Assembly.1395;[ *Persian*]
- [16]. Xin M, Wang J, Xing Z. Decline of virtual water inequality in China's inter-provincial trade: An environmental economic trade-off analysis. *Science of The Total Environment*.2022; 806, 150524.
- [17]. Han M, Guo S, Chen H, Ji X, Li J. Local-scale systems input-output analysis of embodied water for the Beijing economy in 2007. *Frontiers of Earth Science*.2014; 8(3), 414–426. <https://doi.org/10.1007/s11707-014-0430-2>.
- [18]. Aldaya M, Garrido A, Llamas M, Varela-Ortega C, Novo P, Casado R. Water footprint and virtual water trade in Spain. In *Water policy in Spain*.2009; pp. 69–80.
- انرژی‌های تجدیدپذیر قابل چشم‌پوشی و در نیروگاه‌های حرارتی (که گاز طبیعی سوخت آنها را تشکیل می‌دهد) ۲/۶ لیتر بر کیلووات ساعت برای سیستم‌های خنک‌کن برج تر و ۱/۱ لیتر بر کیلووات ساعت برای سیستم‌های خنک‌کن یک‌بارگذر بوده است. در این مطالعه نیز نتایج مصرف آب با این تحقیق مغایر نبوده و مقدار ۲/۲ لیتر بر کیلووات ساعت برای نیروگاه‌های حرارتی با سیستم خنک‌کن برج تر و ۱/۵ لیتر بر کیلووات ساعت برای سیستم خنک‌کن یک‌بارگذر حاصل شده است. همچنین، مصرف آب در نیروگاه‌های انرژی تجدیدپذیر نیز ناچیز و قابل چشم‌پوشی است. در ضمن، مکنیک [۳۳] نیز مصرف آب در نیروگاه بادی را صفر و فتولتاییک را ۰/۰۹ لیتر بر کیلووات ساعت و مقدار آب مصرفی در نیروگاه حرارتی با سیستم خنک‌کننده تر را ۲/۵ لیتر بر کیلووات ساعت و ۰/۹ لیتر بر کیلووات ساعت برای سیستم خنک‌کن یک‌بارگذر محاسبه کرده است.

#### منابع

- [1].Tsai Y, Chan Y, Ko F, Yang J. Integrated operation of renewable energy sources and water resources. *Energy Conversion and Management*, 2018;160, 439–454.
- [2].Delgado A. Water Footprint of Electric Power Generation: Modeling its use and analyzing options for a water-scarce future. Massachusetts Institute of Technology.2012;
- [3].Zhang Y, Hou S, Chen S, Long H, Liu J, Wang J. Tracking flows and network dynamics of virtual water in electricity transmission across China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021;137, 110475.
- [4].Graham N, Iyer G, Wise M, Hejazi M, Wild T. Future evolution of virtual water trading in the United States electricity sector. *Environmental Research Letters*, 2021;16(12), 124010.
- [5].YANG Y, LIN Z, HE J. Chosen Method of Optimum Cold Source Thermal-system Heater in Heat and Power Cogeneration System [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010;26, 1.
- [6].Loew A, Jaramillo P, Zhai H. Marginal costs of water savings from cooling system retrofits: a case study for Texas power plants. *Environmental Research Letters*, 2016;11(10), 104004.
- [7].OHagan J, Maulbetsch J. Water use for electricity generation. *California Energy*

- [19]. Antonelli M, Greco F. *The Water We Eat*. Springer.2015.
- [20]. Wu X, Chen G. Energy and water nexus in power generation: The surprisingly high amount of industrial water use induced by solar power infrastructure in China. *Applied Energy*,2017; 195, 125–136.
- [21]. Power plants. *Comprehensive book on management, development and production of thermal power and related industries*. Parent company specialized in thermal power generation.1396.
- [22]. Cucchiella F, D'Adamo I. Issue on supply chain of renewable energy. *Energy Conversion and Management*, 2013;76, 774-780.
- [23]. Moharram K, Abd-Elhady S, Kandil H, El-Sherif H. Influence of cleaning using water and surfactants on the performance of photovoltaic panels. *Energy Conversion and Management*.2013; 68, 266–272. [*Persian*]
- [24]. Amiri H, Karim M, Asadi F. Financial Appraisal of Meshkinshahr Geothermal Power Plant Assuming Feed in Tariff of Electricity. *Iranian Journal of Economic Studies*.2021.
- [25]. Darabi H, Ma'rab Y. Assessing the effective factors in environmental resilience of using plant species for the development of urban green spaces in hot and dry areas (Case study: Qom city). *Dry Canvas Scientific Journal*.1399; 10 (2), 19–35.
- [26]. Rostami Kia Y, modir Rahmati A. Investigation of 5-year growth of native and non-native poplar clones in the climatic conditions of Khalkhal city. *Second National Conference on Natural Resources Protection*.1394; [*Persian*]
- [27]. Ghasemi R, Director Rahmati A, Asadi F. Quantitative characterization of 5 poplar clones of Turkish origin in Karaj region. *Iranian Forest and Poplar Research*.1390; 19 (4491–500). [*Persian*]
- [28]. Lashkarbolouki E, Modirrahmati A, Rahmani R, Kahneh E, Mousavi Koopar S. 'Phenology and growth characteristics of seven clones of *Populus deltoides* in Astaneh Ashrafie, Guilan', *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*. 2010;18(4), pp. 538-527. [*Persian*]
- [29]. Ismaili R, Erfanian M. Determining the water needs of the dominant tree species in Mashhad green space, a step towards preserving the urban environment. *National Conference*.1392; [*Persian*]
- [30]. Farmani A, Hassanzadeh A. Comparison of vegetative growth of poplar seedlings with observational irrigation of water requirement in modern irrigation methods. *National Conference on Climate Change and its Impact on Agriculture and the Environment*.1398; [*Persian*]
- [31]. Ministry of Energy. Approved by the Ministry of Energy, water tariffs and sewage disposal services. *Ministry of Power*.P. H. Gleick, "Water and energy," *Annu. Rev. Energy Environ*.1400; vol. 19, no. 1, pp. 267–299. [*Persian*].
- [32]. Kumar S, Managi S, Jain R. CO2 mitigation policy for Indian thermal power sector: Potential gains from emission trading. *Energy Economics*.2020; 86, 104653.
- [33]. Macknick J, Newmark R, Heath G, Hallett KC. Operational water consumption and withdrawal factors for electricity generating technologies: a review of existing literature. *Environmental Research Letters*. 2012; Dec 20;7(4):045802.