اکوهیدرولوژی

دورهٔ ۶، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۳۹۸، ص ۹۱۹-۹۱۳

رد پای آب آبی در برق تولیدی از نیروگاه‌های برق‌آبی ایران

محمدرضا گلابی[۱]، فریدون رادمنش[۲*]، علی‌محمد آخوندعلی[۳]، محمدحسین نیک‌سخن[۴]

۱. دانشجوی دکتری دانشکدهٔ مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲. دانشیار دانشکدهٔ مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

۳. استاد دانشکدهٔ مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

۴. دانشیار دانشکدهٔ محیط زیست، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۸/۰۲/۰۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۸/۰۵/۲۴)

چکیده

نیروگاه‌های برق‌آبی یکی از منابع اصلی تولید برق در جهان هستند و معمولاً کنار سدها ساخته می‌شوند، جایی که آب رودخانه در مخازن جمع‌آوری می‌شود. مقدار زیادی از آب، از سطح این مخازن تبخیر شده و از دسترس خارج می‌شود که این موضوعی اساسی در هیدرولوژی و منابع آب است و از دسترس خارج شدن منابع آب را در پی دارد و تأثیر درخور توجهی روی کمبود آب می‌گذارد. به این منظور، برای محاسبهٔ آب مصرف‌شده در فرایند تولید برق توسط این نیروگاه‌ها، در مطالعهٔ حاضر از مفهوم رد پای آب استفاده شد. به منظور محاسبهٔ رد پای آب در برق تولیدی از نیروگاه‌های برق‌آبی کشور، از داده‌های حجم تبخیر سالانه (مترمکعب) و برق تولیدی سالانه (تراژول) از ۱۷ نیروگاه برق‌آبی در ایران برای دورهٔ آماری ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۵ استفاده شد. نتایج نشان داد به طور متوسط بیشترین رد پای آب در برق تولیدی مربوط به نیروگاه درودزن و برابر (m^3/TJe) ۲۸۷۶۴۹ و کمترین مقدار آن، مربوط به نیروگاه مسجد سلیمان و برابر (m^3/TJe) ۴۰۵ بوده است. همچنین، متوسط سالانهٔ رد پای آب در برق تولیدی از نیروگاه‌های برق‌آبی ایران برابر (m^3/TJe) ۳۶۹۴/۸۲ برآورد شد.

کلیدواژگان: آب آبی، ایران، برق، رد پای آب، نیروگاه برق‌آبی.

* نویسندهٔ مسئول

Email: Radmanesh@scu.ac.ir

مقدمه

کمبود آب، سبب شده است سدسازی به عنوان شیوه‌ای مهندسی برای تنظیم جریان آب توسعه یابد. مهم‌ترین اهداف سازندگان سدها، مهار سیلاب‌ها و ذخیرهٔ آب‌های سطحی برای تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت و در کنار آن، تولید برق است [۱]. نیروگاه‌های برق‌آبی یکی از منابع مهم تولید برق هستند و در حال حاضر حدود ۲۰ درصد برق جهان توسط انرژی برق‌آبی تأمین می‌شود و حدود ۶۰ کشور جهان بیش از ۵۰ درصد نیازهای برق خود را با استفاده از نیروی برق‌آبی تأمین می‌کنند [۲]. در این نیروگاه‌ها، حجم زیادی آب از سطح آزاد آنها و به وسیلهٔ تبخیر از دست می‌رود، بنابراین اگر منابع آب در شرایط خاصی مانند خشکسالی یا تغییر اقلیم قرار بگیرد، تولید برق در این نیروگاه‌ها با مشکل مواجه می‌شود [۳]. با توجه به کارکرد نیروگاه‌های برق‌آبی در برق تولیدی ایران و از آنجا که بخش وسیعی از سطح ایران اقلیم خشک و نیمه‌خشک دارد، این کشور با افزایش تقاضا برای برق و آب، در دهه‌های اخیر با چالش بزرگی در تأمین آب و انرژی روبه‌رو بوده است. بنابراین، باید روی حجم آب مصرف‌شده در فرایند تولید برق توسط این نیروگاه‌ها مطالعه شود. به این منظور، باید حجم آب مصرف‌شده در فرایند تولید برق کمی‌سازی شود. برای رسیدن به این هدف، از رویکرد رد پای آب استفاده می‌شود تا حجم آب مصرف‌شده برای تولید یک واحد برق به دست آید. در زمینهٔ مطالعات رد پای آب در کشور می‌توان به مطالعاتی اشاره کرد که بیشتر تمرکز بر رد پای آب در تولید محصولات کشاورزی دارند. برای مثال، علیقلی‌نیا و همکاران (۲۰۱۶) به تخمین و ارزیابی رد پای آب محصولات عمدهٔ کشت‌شده در حوضهٔ آبریز دریاچهٔ ارومیه پرداختند. نتایج پژوهش آنها بیان می‌کند که در بین محصولات مطالعه شده، گندم و یونجه بیشترین رد پای آب را دارند [۴]. یوسفی و همکاران (۲۰۱۸) به منظور تعیین مطلوب‌ترین شهرستان استان تهران برای کاشت محصولات باغی و زراعی از شاخص رد پای آب استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد بیشترین میانگین رد پای آب مربوط به محصول گندم و کمترین میانگین رد پای آب، مربوط به محصول سیب بوده است. همچنین، برای محصولات زراعی به‌خصوص گندم و جو، شهرستان‌های ورامین و اسلامشهر نسبت به سایر شهرستان‌ها در اولویت هستند، ولی برای محصولات باغی، شهرستان دماوند در اولویت است [۵]. اما در زمینهٔ محاسبهٔ رد پای آب در برق تولیدی از نیروگاه‌های برق‌آبی، در کشور مطالعه‌ای انجام نشده و در سطح بین‌المللی می‌توان به مطالعات هرت و همکاران (۲۰۱۱)، میکونن و هوکسترا (۲۰۱۲)، ژائو و لیو (۲۰۱۵) و میگلیتا و همکاران (۲۰۱۸) اشاره کرد [۶ـ ۹]. برای مثال، میکونن و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی رد پای آب مصرفی در تولید برق و حرارت در نیروگاه‌های مختلف تولید برق در جهان پرداختند. آنها رد پای آب در نیروگاه‌های برق‌آبی را بین ۳۰۰ (m^3/TJe) تا ۸۵۰ (m^3/TJe) هزار برآورد کردند [۱۰]. بکن و همکاران (۲۰۱۷) روش‌ها و برآوردهایی که دربارهٔ آب مصرفی در تولید برق از نیروگاه‌های برق‌آبی در مقالات بود را بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها بیان‌کنندهٔ این مطلب بود که مقدار خالص تخمین آب مصرفی اغلب کمتر از ۴۰ درصد از مقدار ناخالص آن برآورد شده است [۱۱]. هوگبوم و همکاران (۲۰۱۸) رد پای آب از مخازن مصنوعی در جهان را تخمین زدند و آن را به اهداف مختلفی همچون برق‌آبی براساس ارزش اقتصادی آن نسبت دادند [۱۲].

از آنجا که هیچ تحقیقی در این زمینه در ایران انجام نشده است، هدف از مطالعهٔ حاضر ابتدا، محاسبهٔ متوسط رد پای آب در برق تولیدی[1] (WFe) توسط هر یک از ۱۷ نیروگاه برق‌آبی در دورهٔ ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۵ است. سپس، رد پای آب در تولید برق برای هر سال به دست می‌آید و متوسط آن برای دورهٔ مطالعه شده، به عنوان مقدار متوسط رد پای آب در تولید برق از نیروگاه‌های برق‌آبی ایران برحسب مترمکعب به‌ازای تراژول برق تولیدی بیان می‌شود.

مواد و روش‌ها

افزایش شهرنشینی و توسعهٔ اقتصادی در ایران به افزایش مصرف انرژی منجر شده است [۱۳]. با توجه به اینکه نیروگاه‌های برق‌آبی در ایران تأثیر زیادی بر تولید و تأمین برق دارند، در مطالعهٔ حاضر برای محاسبهٔ رد پای آب در برق تولیدی این نیروگاه‌ها، داده‌های برق تولیدی سالانه

1. Water Footprint of Electricity

(تراژول) و حجم تبخیر سالانه (مترمکعب) از ۱۷ نیروگاه برق‌آبی در ایران از گزارش‌های سالانهٔ صنعت برق ایران برای دورهٔ آماری ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۵ استخراج شد و اطلاعات مورد نیاز دیگر نیز از مقالهٔ میکونن و همکاران (۲۰۱۵) گرفته شد [۱۰]. در جدول ۱ مختصات جغرافیایی و اطلاعات آماری مخزن هر نیروگاه برق‌آبی نشان داده شده است. همچنین، در جدول ۲ مقدار برق تولیدی کشور از نیروگاه‌های برق‌آبی برای دورهٔ ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۵ آمده است.

جدول ۱. مختصات جغرافیایی و داده‌های آماری مخزن هر نیروگاه برق‌آبی

سد	رودخانه	ارتفاع سد (m)	ظرفیت مخزن (million m^3)	متوسط تبخیر سالانه (million m^3)	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
امیرکبیر	کرج	۱۸۰	۲۰۵	۳/۷۳	۳۵/۹۵	۵۱/۰۹
ارس	ارس	۴۲	۱۳۵۰	۱۱۷	۳۹/۰۹	۴۵/۴۱
دز	دز	۲۰۳/۵	۲۸۵۶	۸۱/۸۷	۳۲/۶۰	۴۸/۴۶
درودزن	کر	۶۰	۹۹۳	۴۶/۰۷	۳۰/۲۱	۵۲/۴۱
جیرفت	هلیل‌رود	۱۳۳	۴۰۰	۱۴/۹۵	۲۸/۸۵	۵۷/۴۸
کرخه	کرخه	۱۲۷	۵۵۷۵	۱۵۸/۹۴	۳۲/۴۹	۴۸/۱۲
کارون ۱	کارون	۲۰۰	۳۱۳۹	۶۰/۴۰	۳۲/۰۵	۴۹/۶۰
کارون ۳	کارون	۲۰۵	۲۹۷۰	۶۱/۹۶	۳۱/۸۰	۵۰/۰۹
کارون۴	کارون	۱۹۲	۲۱۹۰	۵۶/۲۶	۳۱/۶۰	۵۰/۴۷
لتیان	جاجرود	۱۰۷	۹۵	۳/۹۸	۳۵/۷۸	۵۱/۶۷
مهاباد	مهاباد	۴۷/۵	۲۳۰	۱۰/۹۶	۳۶/۷۶	۴۵/۷۰
مارون	مارون	۱۶۵	۱۲۰۰	۲۵/۹۶	۳۰/۷۱	۵۰/۳۵
مسجد سلیمان	کارون	۱۷۷	۲۳۰	۱۱/۶۶	۳۲/۰۲	۴۹/۴۰
ملاصدرا	کر	۷۵	۴۴۰	۴/۸۷	۳۰/۶۴	۵۲/۰۸
سفیدرود	سفیدرود	۱۰۶	۱۸۰۰	۵۰/۵۳	۳۶/۷۵	۴۹/۳۸
شهید رجایی	تجن	۱۳۸	۱۶۰	۲/۱۹	۳۶/۲۵	۵۳/۲۴
زاینده‌رود	زاینده‌رود	۱۰۰	۱۴۵۰	۳۳/۷۳	۳۲/۷۳	۵۰/۷۳

جدول ۲. مقدار برق تولیدی کشور از نیروگاه‌های برق‌آبی در دورهٔ ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۵ (تراوات ساعت)

سال	۱۳۸۳	۱۳۸۴	۱۳۸۵	۱۳۸۶	۱۳۸۷	۱۳۸۸	۱۳۸۹	۱۳۹۰	۱۳۹۱	۱۳۹۲	۱۳۹۳	۱۳۹۴	۱۳۹۵
برق تولیدی	۱۱	۱۶	۱۸	۱۸	۵	۷	۱۰	۱۲	۱۲	۱۴	۱۴	۱۴	۱۶

با توجه به جدول یادشده مشاهده می‌شود که بیشترین میزان برق تولیدی توسط نیروگاه‌های برق‌آبی ایران در سال ۱۳۹۵ و برابر ۱۶ تراوات ساعت و کمترین میزان در سال ۱۳۸۷ و برابر ۵ تراوات ساعت بوده است و متوسط میزان برق تولیدی از نیروگاه‌های برق‌آبی در دورهٔ مطالعه‌شده برابر ۱۲/۸۴ تراوات ساعت است.

مفهوم رد پای آب

مفهوم رد پای آب برای نخستین‌بار توسط هواکسترا (۲۰۰۲) وارد حوزهٔ مدیریت آب شد تا براساس آن مجموع میزان آب مجازی و واقعی در مرزهای سازمانی، جغرافیایی و سیاسی یا برای فعالیت‌های مشخص قابل بحث و بررسی باشد [۱۴]. شاخص رد پای آب نیز همانند سایر شاخص‌ها، سبب پیدایش مفاهیم متفاوتی شده است. مفاهیم برگرفته از شاخص رد پای آب بیشتر مفاهیمی مدیریتی در حوزهٔ منابع و مصارف آب هستند. به این معنا که آنها را می‌توان برای برنامه‌ریزی‌های منابع و مصارف آب در یک کشور یا محدودهٔ جغرافیایی به کار بست. همچنین، ابزارهای تعریف‌شده به کمک این شاخص، می‌توانند از طریق کنترل جابه‌جایی آب در سطح بین‌المللی چه به صورت حقیقی و چه به صورت مجازی و یا از طریق ایجاد تغییراتی در الگوی مصارف افراد یک جامعه میزان آب مصرفی آن جامعه را با رعایت اصول توسعهٔ پایدار، تا حد ممکن کاهش دهند. هوکسترا و هانگ (۲۰۰۲) با معرفی شاخص رد پای آب توانستند اطلاعات مفیدی را در زمینهٔ الگوی مصرفی افراد،

به دنبال آن میزان آب مصرفی در تولید محصولات مختلف، مبادلات جهانی آب و مدیریت منابع آبی ارائه دهند [۱۵]. زیرا شاخص‌هایی که تا قبل از رد پای آب بررسی می شدند، بر مبنای میزان تولیدات یک منطقه بودند و نمی‌توانستند نیاز واقعی یک منطقه را به منابع آبی نشان دهند. این در حالی است که شاخص رد پای آب، مقدار واقعی آب مصرفی را براساس اقلیم و شرایط منطقه محاسبه می‌کند. در سال‌های اخیر با ظهور شاخص رد پای آب که نمایشی از مجموع مصارف مستقیم و غیرمستقیم در بخش‌های مختلف جامعه است، دریچه‌ای جدید برای انجام تحقیقات به منظور مدیریت نوین منابع آب با رویکرد یکپارچه باز شده است.

اجزای رد پای آب

رد پای آب از سه بخش آب آبی، آب سبز و آب خاکستری تشکیل شده است. منظور از آب آبی، همان آب‌های زیرزمینی و سطحی است که قابل استحصال هستند. آب سبز به بخشی از باران که در خاک ذخیره شده و در فاصلهٔ دو باران متوالی تبخیر و یا تعرق می‌شود، می‌گویند. آب‌های آلوده‌شده در چرخهٔ تولید را آب خاکستری می‌نامند. در زنجیرهٔ تولید ممکن است همه یا یکی از این انواع آب به مصرف برسد. رد پای آب در تولید برق یک مقیاس حجمی از آب مصرف‌شده و آب آلوده‌شده در فرایند تولید برق است و در مطالعهٔ حاضر و به طور خاص در عمل، اشاره به رد پای آب‌آبی دارد [۱۶].

رد پای آب در برق تولیدی از نیروگاه‌های برق‌آبی

بیشتر نیروگاه‌های برق‌آبی انرژی مورد نیاز خود را از انرژی پتانسیل آب پشت یک سد تأمین می‌کنند. کل رد پای آب در برق تولیدی ($WF_{e,total}$) از رابطهٔ ۱ به دست می‌آید [۱۰]. در رابطهٔ ۱ دو مرحلهٔ اصلی در نظر گرفته شده است: رد پای آب در مرحلهٔ ساخت سد و نیروگاه ($WF_{e,c}$) و رد پای آب در مرحلهٔ بهره‌برداری ($WF_{e,o}$).

$$WF_{e,total=}WF_{e,c}+WF_{e,o} \quad (۱)$$

که در این رابطه، $WF_{e,c}$: آب مصرفی در ساختمان سد و نیروگاه است که این مقدار از مقالهٔ میکونن و همکاران (۲۰۱۵) گرفته شد و برابر (m3/TJe) ۰/۳ بود [۱۰]. $WF_{e,o}$: آب مصرف‌شده در مرحلهٔ بهره‌برداری است که این مقدار با استفاده از یکی از سه روش زیر به دست می‌آید.

روش نخست:

$$WF_{e,o}=\frac{E_o}{P} \quad (۲)$$

که در این روش، E_o: آب تبخیرشده از سطح مخزن (تبخیر سالانه از سطح آزاد آب) (m^3)، P: انرژی تولیدشده از نیروگاه برق‌آبی (انرژی تولیدشدهٔ سالانه) (TJ) و WF: رد پای آب (m^3/TJ) است.

روش دوم:

با استفاده از آب مصرفی، در این حالت فرض می شود که قبل از احداث سد در آن منطقه پوشش گیاهی بوده و در پی آن، تبخیر و تعرقی وجود داشته است که با ایجاد سد، آن تبخیر و تعرق حذف شده است، بنابراین داریم:

$$WF_{e,o}=\frac{E_0-ET_c}{P} \quad (۳)$$

که در این رابطه، WF: رد پای آب (m^3/TJ)، ET_c: تبخیر و تعرق گیاهان موجود در منطقه قبل از احداث سد (m^3)، E_o: آب تبخیرشده از سطح مخزن (تبخیر سالانه از سطح آزاد آب) (m^3) و P: انرژی تولیدشده از نیروگاه برق‌آبی (انرژی تولیدشدهٔ سالانه) (TJ) است.

روش سوم:

در این روش از تعریف سادهٔ رد پای آب فراتر می‌رود و از یک معادلهٔ بیلان آب برای تخمین رد پای آب با در نظر گرفتن ورودی (بارش) و خروجی مخزن (تبخیر) استفاده می‌شود.

$$WF_{e,o}=\frac{E_\circ-RF}{P} \quad (۴)$$

که در این رابطه، RF: حجم بارش سالانهٔ روی مخزن (m^3)، WF: رد پای آب (m^3/TJ)، P: انرژی تولیدشده از نیروگاه برق‌آبی (انرژی تولیدشدهٔ سالانه) (TJ) و E_o: آب تبخیرشده از سطح مخزن (تبخیر سالانه از سطح آزاد آب) (m^3) است.

در مطالعهٔ حاضر، با توجه به اطلاعات موجود، از روش نخست برای محاسبهٔ آب مصرف‌شده در مرحلهٔ بهره‌برداری استفاده شد. اما باید به این نکته توجه کرد که بیشتر مخازن برای اهداف مختلفی ایجاد شده‌اند مانند: برق‌آبی، کشاورزی یا کنترل سیلاب و غیره. بنابراین با استفاده از رابطهٔ ۲ همهٔ

تبخیر از سد به هدف برق‌آبی نسبت داده می‌شود که این اتفاق برآوردهای بیش از حدی در پی دارد. بنابراین، باید سهمی از تبخیر را برای این هدف در نظر گرفت. برای به دست آوردن این سهم، از رابطهٔ ۵ که توسط سشر و پفیستر (۲۰۱۶) پیشنهاد شده است، استفاده شد که براساس رتبهٔ هدف برق‌آبی یا هر هدف دیگر در بین تمام اهداف مخزن است [۱۷]. برای مثال، اگر مخزن پنج هدف داشته باشد و هدف برق‌آبی در رتبهٔ سوم باشد، سهم تبخیری که به هدف برق‌آبی نسبت داده می‌شود، برابر ۰/۲ حجم کل تبخیر است.

$$f_A = \frac{n+1-r}{\sum_{i=1}^{n} i} \qquad (۴)$$

که در این رابطه، f_A: فاکتور تخصیص، n: تعداد اهداف و r: رتبهٔ هدف برق‌آبی بین اهداف است.

نتایج و بحث

در جدول ۳ نتایج محاسبهٔ متوسط رد پای آب در برق تولیدی توسط هر یک از نیروگاه برق آبی در دورهٔ آماری ۱۳۸۳- ۱۳۹۵ آورده شده است.

جدول ۳. متوسط رد پای آب در برق تولیدی در نیروگاه‌های برق‌آبی کشور در دورهٔ آماری ۱۳۸۳- ۱۳۹۵ (مترمکعب بر تراژول)

ردیف	نام نیروگاه	رد پای آب (m3/TJe)
۱	ارس	۷۲۳۹۴/۶۳
۲	مهاباد	۵۳۱۶۱/۵۶
۳	زاینده‌رود	۱۳۱۵۷/۲۰
۴	دز	۲۳۲۳/۴۷
۵	عباسپور	۲۱۴۸/۰۹
۶	مارون	۱۳۷۹۰/۷۳
۷	مسجد سلیمان	۴۰۸/۹۸
۸	کارون ۳	۲۶۵۹/۲۵
۹	کارون ۴	۱۲۳۲۱/۶۷
۱۰	کرخه	۶۸۴۰۹/۳۶
۱۱	امیرکبیر	۱۴۷۴/۰۱
۱۲	لتیان	۲۸۹۰/۲۵
۱۳	ملاصدرا	۱۰۴۱۸/۴۲
۱۴	درودزن	۲۲۴۶۵۷/۸۳
۱۵	جیرفت	۹۳۱۲۴/۳۸
۱۶	سفیدرود	۱۱۱۵۵۳/۶۶
۱۷	تاکام	۹۰۰۵/۴۹

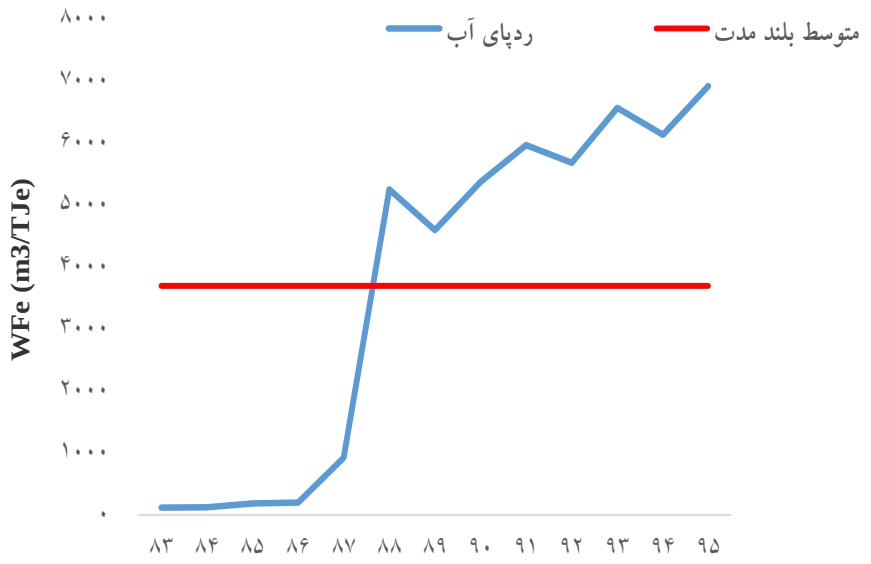
همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، در نیروگاه‌های برق‌آبی مطالعه شده، بیشترین متوسط رد پای آب در برق تولیدی مربوط به نیروگاه درودزن و برابر (m3/TJe) ۲۲۴۶۵۷ و کمترین متوسط رد پای آب در برق تولیدی مربوط به نیروگاه مسجد سلیمان و برابر (m3/TJe) ۴۰۹ است.

در جدول ۴ رد پای آب در برق تولیدی به صورت متوسط سالانه آورده شده است. همچنین، در شکل ۱ روند متوسط سالانهٔ رد پای آب در برق تولیدی در دورهٔ مطالعه‌شده نشان داده شده است.

جدول ۴. مقدار متوسط سالانهٔ رد پای آب در برق تولیدی توسط نیروگاه‌های برق‌آبی

سال	ردپای آب (m3/TJe)	رد پای آب (lit/ kWh)
۱۳۸۳	۱۱۴/۷۶	۰/۴۱
۱۳۸۴	۱۱۸/۹۲	۰/۴۳
۱۳۸۵	۱۸۲/۲۸	۰/۶۶
۱۳۸۶	۱۹۵/۵۲	۰/۷۰
۱۳۸۷	۹۲۰/۳۹	۳/۳۱
۱۳۸۸	۵۲۵۳/۹۰	۱۸/۹۱
۱۳۸۹	۴۵۹۴/۳۷	۱۶/۵۴
۱۳۹۰	۵۳۷۴/۷۰	۱۹/۳۵
۱۳۹۱	۵۹۶۸/۶۳	۲۱/۴۹
۱۳۹۲	۵۶۸۲/۵۸	۲۰/۴۶
۱۳۹۳	۶۵۶۹/۸۹	۲۳/۶۵
۱۳۹۴	۶۱۳۶/۲۶	۲۲/۰۹
۱۳۹۵	۶۹۲۰/۴۱	۲۴/۹۱
متوسط	۳۶۹۴/۸۲	۱۳/۳۰

همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین متوسط سالانهٔ رد پای آب در برق تولیدی توسط نیروگاه‌های برق‌آبی مربوط به سال ۱۳۹۵ و برابر (m3/TJe) ۶۹۲۰/۴۱ که معادل (lit/ kWh) ۲۴/۹۱ است و کمترین مربوط به سال ۱۳۸۳ و برابر (m3/TJe) ۱۱۴/۷۶ که معادل (lit/ kWh) ۰/۴۱ است و متوسط رد پای آب در برق تولیدی توسط نیروگاه‌های برق‌آبی در دورهٔ مطالعه‌شده برابر (m3/TJe) ۳۶۹۴/۸۲ که معادل (lit/ kWh) ۱۳/۳۰ است.



شکل ۱. روند سالانهٔ رد پای آب در برق تولیدی نیروگاه‌های برق‌آبی در ایران طی دورهٔ مطالعه‌شده

با توجه به شکل ۱ مشاهده می‌شود که از سال ۱۳۸۷ به بعد، مقدار رد پای آب در تولید برق نسبت به متوسط بلندمدت افزایش می‌یابد، چون متوسط تولید برق و متوسط تبخیر از مخازن نیروگاه‌های برق‌آبی از سال ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۵، نسبت به متوسط سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۸۷ به‌ترتیب ۹۶ درصد کاهش و ۳۷ درصد افزایش یافته است. با توجه به رابطهٔ استفاده‌شده برای محاسبهٔ رد پای آب در مطالعهٔ حاضر، این امر سبب افزایش رد پای آب در تولید برق می‌شود.

همچنین، با توجه به شکل ۱ مشاهده شد که روند رد پای آب در تولید برق به‌جز سال‌های ۱۳۸۹، ۱۳۹۲ و ۱۳۹۴، در بقیهٔ سال‌ها افزایشی بوده است.کاهش روند در سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۲ به این دلیل بوده است که اگرچه طی سال‌های یادشده تبخیر افزایش یافته است، اما نسبت افزایش تولید برق نسبت به سال‌های قبل خیلی بیشتر بوده است و این امر سبب کاهش رد پای آب در تولید برق شده است. در سال ۱۳۹۴ تبخیر نسبت به سال ۱۳۹۳ کاهش یافته است (۳/۷ درصد) و برق تولیدی افزایش یافته است (۳ درصد) و این علت کاهش رد پای آب در تولید برق بوده است.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، ملاحظه شد که با توجه به اینکه مقدار رد پای آب در برق تولیدی به اقلیم‌های مختلف و برق تولیدی از آن نیروگاه‌ها بستگی دارد، اما به طور کلی در نیروگاه‌های برق‌آبی به ازای تولید یک واحد برق، آب درخور توجهی مصرف می‌شود. بیشترین مقدار متوسط رد پای آب در برق تولیدی مربوط به نیروگاه درودزن و برابر (m3/TJe) ۲۲۴۶۵۷ بوده و کمترین متوسط آن، مربوط به نیروگاه مسجد سلیمان و برابر (m3/TJe) ۴۰۹ است. به طور متوسط، مقدار سالانهٔ رد پای آب در برق تولیدی در ایران توسط نیروگاه‌های برق‌آبی (m3/TJe) ۳۶۹۴/۸۲ به دست آمد که معادل ۱۳/۳۰ لیتر آب مصرفی به ازای هر کیلووات‌ساعت برق تولیدی است. امروزه، بحران آب در ایران و جنبه‌های مختلف آن بر کسی پوشیده نیست و با توجه به نتایج به‌دست‌آمده به نظر می‌رسد از دیدگاه منابع آبی، نیروگاه‌های برق‌آبی منابع پایداری برای تولید برق نیستند و فشار بسیار زیادی را بر منابع آب کشور وارد می‌کنند و ما نیاز داریم که برای تولید برق به سمت منابعی همچون انرژی خورشیدی و بادی حرکت کنیم. توصیه می‌شود با برنامه‌ریزی‌های کلان و صحیح در بخش صنعت برق، ضمن استفاده از پتانسیل‌های محیطی و اقلیمی منطقه، برای حفظ و ذخیرهٔ منابع ارزشمند آبی تلاش شود تا شاهد توسعه‌های سبز و پایدار در منطقه و کشور باشیم. نتایج تحقیق حاضر توسط تصمیم‌گیران و سیاست‌گذاران در صنعت آب و برق می‌تواند استفاده شود و مطالعهٔ حاضر می‌تواند گامی رو به جلو در تحقیقات منابع آب باشد.

منابع

[1]. Nader H, Keikha AA, Sabouhi Sabouni M. Designing the Fuzzy Analytic Hierarchy Process to Determine Water Allocation Priority for Mahabad Dam. Water and Soil Science. 2013; 22(4): 147-159. [Persion]

[2]. Jangavar H, Noorollahi Y, Emami Meybodi A. Economic and Environmental Analysis of the Small Hydropower Plants Development. Ecohydrology. 2018; 4(4): 1255-1268. [Persion]

[3]. Meldrum J, Nettles-Anderson S, Heath G, Macknick J. Life cycle water use for electricity generation: a review and harmonization of literature estimates. Environ. Res. Lett. 2013 Mar 12; 8(1):015031.

[4]. Aligholinia T, Rezaie H, Behmanesh J, Montaseri M. Presentation of water footprint concept and its evaluationin Urmia lake watershed agricultural crops. Journal of Water and Soil Conservation. 2016; 23 (3): 337-344. [Persion]

[5]. Yousefi H, Mohammadi A, Noorollahi Y, Sadatinejad SJ. Water footprint evaluation of Tehran's crops and garden crops. Journal of Water and Soil Conservation. 2018; 24(6): 67-85. [Persion]

[6]. Herath I, Deurer M, Horne D, Singh R, Clothier B. The water footprint of hydroelectricity: A methodological comparison from a case study in New Zealand. J. Cleaner Prod. 2011 Sep 1; 19(14): 1582-1589.

[7]. Mekonnen MM, Hoekstra AY. The blue water footprint of electricity from hydropower. Hydrol. Earth Syst. Sci. 2012 Jan 20; 16: 179-187.

[8]. Zhao D, Liu J. A new approach to assessing the water footprint of hydroelectric power based on allocation of water footprints among reservoir ecosystem services. Phys. Chem. Earth. 2015 Mar 31; 79-82: 40-46.

[9]. Miglietta PP, Morrone D, Leo FD. The Water Footprint Assessment of Electricity Production: An Overview of the Economic-Water-Energy Nexus in Italy. Sustainability. 2018 Jan 17; 10(1): 228.

[10]. Mekonnen MM, Gerbens-Leenes PW, Hoekstra AY. The consumptive water footprint of electricity and heat: a global assessment. Environ. Sci. Water Res. Technol. 2015 May 1; 1(3): 285-297.

[11]. Bakken TH, Killingtveit Å, Alfredsen K. The Water Footprint of Hydropower Production—State of the Art and Methodological Challenges. Global Challenges. 2017 Jun 6; 1: 1600018.

[12]. Hogeboom RJ, Knook L, Hoekstra AY. The blue water footprint of the world's artificial reservoirs for hydroelectricity, irrigation, residential and industrial water supply, flood protection, fishing and recreation. Adv. Water Resour. 2018 Mar 1; 113: 285–294.

[13]. Rezaei M, Chaharsooghi S K, Abbaszadeh P. The Role of Renewable Energies in Sustainable Development: Case Study Iran. Iran. J. Energy Environ. 2013; 4 (4): 320-329.

[14]. Hoekstra AY. Virtual water trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, Delft, The Netherlands, 12-13 December 2002, Value of Water Research Report Series No.12, UNESCO-IHE, Delft, The Netherlands.

[15].Hoekstra AY, Hung PQ. Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade.2002. Value of Water Research Report Series No. 11, UNESCOIHE, Delft, the Netherlands.

[16]. Dai J, Wu S, Han G, Weinberg J, Xie X, Wu X, et al. Water- energy nexus: a review of methods and tools for macro-assessment. Appl. Energy. 2018 Jan 15; 210: 393–408.

[17]. Scherer L, Pfister S. Global water footprint assessment of hydropower. Renewable Energy. 2016; 99, 711–720.