نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی ایران
سال دهم/ شماره سی و پنجم/ پاییز ۱۴۰۲

Journal of Iranian Dam and Hydroelectric Power Plant
10th Year/ No. 35/ December 2023

تحلیل تولید نیروی برق‌آبی در خطوط انتقال آب از منظر آب مجازی مطالعه موردی: سامانه خط انتقال سد صفارود به کرمان

مرضیه ثمره هاشمی*[۱]

چکیده

طرح‌های انتقال آب در سال‌های اخیر روند رو به افزایشی در کشور داشته‌اند. با این وجود، مسأله انرژی برق مرتبط با این طرح‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. موضوع مهم دیگر در مورد مسأله نیروی برق، مقدار آب مجازی برای تولید هرکیلووات ساعت تولید نیروی برق است. در این راستا مقاله حاضر، مقدار آب مجازی برای تولید نیروی برق را مورد بررسی قرار داده است و در سامانه خط انتقال آب از سد صفارود به کرمان، پتانسیل تولید نیروی برق‌آبی و در نتیجه مقدار آب مجازی صرفه‌جویی شده به واسطه این مقدار تولید نیروی برق بررسی و محاسبه شده است. به این منظور، ابتدا خط انتقال در نرم‌افزار واترجمز شبیه‌سازی و بر اساس آن، پتانسیل تولید نیروی برق‌آبی، محاسبه شده است. از سوی دیگر با محاسبه‌ی متوسط میزان آب مجازی برای تولید هر کیلو وات ساعت برق، مقدار آب مجازی صرفه‌جویی شده، در صورت تولید این مقدار نیروی برق‌آبی محاسبه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد ۷۲/۵ گیگاوات‌ساعت قابلیت تولید نیروی برق‌آبی در این سامانه وجود دارد که در صورت تولید این مقدار نیروی برق‌آبی، ۴۵۶۳۹ مترمکعب آب مجازی در سال صرفه‌جویی خواهد شد.

واژه‌های کلیدی

سامانه‌های انتقال آب، نیروی برق‌آبی، آب مجازی

[۱]* استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، samare@uk.ac.ir

علمی-پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۰۵

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-07-05]

مقدمه

برای مواجهه با مسأله کمبود آب، در مناطق مرکزی کشور، راه‌حل‌های مختلفی از جمله انتقال آب مطرح شده است، اما انتقال آب، خود چالش‌هایی را به همراه دارد. هر طرح انتقال آب، شامل هزینه‌های ثابت از جمله تجهیزات و مسیرسازی و هزینه‌های متغیر از جمله هزینه مصرف انرژی برای انتقال آب است. یکی از مهمترین این چالش‌ها، مربوط به بحث انرژی است. با توجه به فواصل عمدتاً طولانی مبدا به مقصد، انرژی لازم برای پمپاژ، به صورت قابل توجهی ابعاد مختلف طرح را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین انرژی لازم برای پمپاژ، هم از منظر اقتصادی و هم از منظر آب مجازی لازم برای تولید این انرژی، باید مورد توجه قرار گیرد. در برخی از این طرح‌ها، جهت پمپاژ آب ممکن است ده‌ها مگاوات، توان لازم باشد که در طول سال چند میلیون کیلووات ساعت می‌شود که اگر به مصارف آب برای تولید این انرژی توجه شود، عدد مصارف آب، جهت تولید این مقادیر انرژی یا همان آب مجازی، عددی قابل توجه خواهد بود که باید مورد بررسی قرار گیرد. چنانچه بررسی آب مجازی در پروژه‌ی رهاسازی توپ روی مخزن سدکالیفرنیا برای جلوگیری از تبخیر، نشان داد، مقدار آب مجازی مصرف شده برای تولید این توپ‌ها، قابل ملاحظه بوده و می‌تواند مفید بودن کل پروژه را زیرسوال ببرد (حقیقی[1] و همکاران، ۲۰۱۸). مفاهیم آب مجازی و ردپای آب در علم مدیریت آب به منظور نشان دادن اهمیت الگوهای مصرف و ابعاد جهانی آن در حکمرانی بهتر آب، در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند (یونپ[2]، ۲۰۱۰؛ هوکسترا[3]، ۲۰۱۱؛ هوکسترا و همکاران، ۲۰۱۱؛ گالی[4] و همکاران، ۲۰۱۲). مفهوم آب مجازی می‌تواند در راه‌حل‌های پایداری، برای سیاست‌گذاری‌های در سطوح مختلف ملی از جمله پروژه‌ها نقش داشته باشد. چاپاگین[5] و همکاران ۲۰۰۶، یانگ[6] و همکاران ۲۰۰۶، تأکید می‌کنند که توجه به مسأله آب مجازی، موجب بهبود کارآیی استفاده از آب و کاهش اثرات کمبود آب می‌شود. از این جهت، مسأله آب مجازی مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است و مطالعاتی در زمینه‌ی محاسبه آب مجازی در حوزه‌های مختلف و در حوزه‌ی تولید نیروی برق‌آبی، انجام شده است.

هوکسترا و چاپاگین (۲۰۰۷) ردپای آب را در سطح ملی برای مراکش (یک کشور خشک/نیمه خشک) و هلند (کشور مرطوب) ارزیابی کردند. این مطالعه نشان می‌دهد که هر دو کشور مراکش و هلند، بیشتر وارد کننده آب مجازی هستند، که این موضوع باعث می‌شود آن‌ها به منابع آب در دیگر نقاط جهان وابسته شوند. این محاسبات نشان می‌دهد که مراکش حدود ۱۴٪ به منابع آب در خارج از مرزهای خود وابستگی دارد، درحالی که هلند حدود ۹۵٪ به منابع آب خارجی وابسته است. در این مطالعه نشان داده شده است که زمانی که یک کالای آب‌بر از مناطقی که با بهره‌وری آب بالا تولید می‌شود به مناطقی با بهره‌وری آب کمتر مبادله شود، تجارت بین‌المللی می‌تواند به صرفه‌جویی آب در جهان منجر شود.

همچنین در تحقیقی دیگر، ون اوال[7] و همکاران ۲۰۰۹ ردپای آب خارجی هلند را در کشورهای همسایه و کالاهای وارداتی ارزیابی کردند. کل ردپای آب هلند حدود ۲۳۰۰ m3/year/cap تخمین زده شد. از این مقدار، ۶۷٪ مربوط به مصرف محصولات کشاورزی، ۳۱٪ مصرف کالاهای صنعتی و ۲٪ مربوط به مصرف آب خانگی است.

زیتون[8] و همکاران ۲۰۱۱ ارتباط ساختار تجارت آب مجازی و وضعیت منابع آب را در کشور چین ارزیابی کردند. بدین منظور، کشور چین را به ۸ منطقه تقسیم و جریان‌های آب مجازی در سال ۲۰۰۸ برای این مناطق هشت گانه، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که جریان‌های آب مجازی با وضعیت منابع آب سازگار نمی‌باشد و باید مورد توجه جدی قرار گیرد.

مارتین[9] ۲۰۱۲ ردپای آب را در تولید نیروی برق مدل‌سازی نمود و مقدار آب مجازی برای تولید برق در انواع نیروگاه‌ها

[1] Haghighi
[2] UNEP
[3] Hoekstra
[4] Galli
[5] Chapagain
[6] Yang
[7] Van Oel
[8] Zeitoun
[9] Martin

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-07-05]

را محاسبه کرد. مدل ارائه شده در این پژوهش می‌تواند در سیستم‌های مختلف مورد استفاده قرار گیرد و نشان می‌دهد محاسبه‌ی آب مجازی، اهمیت بالایی در اتخاذ تصمیم‌های سیاستی مهم ایفا می‌کند.

چینی[1] و استیلول[2] ۲۰۲۰ تغییرات تجارت مقدار آب مجازی را در شبکه برق اروپا مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد تجارت آب مجازی از مقدار ۴۳ میلیون متر مکعب در سال ۲۰۱۰ به ۴۹ میلیون متر مکعب در سال ۲۰۱۷ رسیده است و اهمیت محاسبات و بررسی آب مجازی در برنامه‌ریزی مربوط به شبکه برق اروپا را نشان دادند.

آب مجازی در شبکه انتقال برق چین را ژانگ[3] و همکاران ۲۰۲۱ مورد مطالعه قرار دادند. برای بررسی پویایی شبکه جریان‌های آب مجازی که در انتقال برق بین استانی چین وجود دارد، از تحلیل کنترل شبکه استفاده کردند. نتایج نشان داد مقدار آب مجازی از استان‌های غربی به سایر مناطق طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۴ پنج برابر شده است. آنها پیشنهاد کردند که دینامیک انتقال آب مجازی ناشی از تولید برق در سراسر مناطق، به طور منظم برای برنامه‌ریزی مساله کمبود آب ردیابی شود.

ونگ[4] و همکاران ۲۰۲۲ پروژه‌های انحراف آب بین حوضه‌ای و انتقال آب مجازی را در چین، به عنوان دو راه حل مؤثر برای کمبود آب مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند انتقال آب مجازی آبی، با ۲۴ درصد افزایش به ۱۷۶ گیگامترمکعب در سال رسیده است، در حالی که انتقال آب مجازی خاکستری، با ۱۰ درصد کاهش به ۲۶۶ گیگامترمکعب رسیده است. بنابراین بررسی آب مجازی برای مدیریت منابع، ضروری است.

و در ایران نیز مساله آب مجازی در ارتباط با تولید برق توسط موسوی و یوسفی ۱۳۹۹ مورد بررسی قرار گرفت. آنها به بررسی ردپای آب در صنعت برق پرداختند و آب مجازی مصرفی برای تولید هر کیلووات‌ساعت برق در نیروگاه‌های مختلف را مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که چگونه محاسبه‌ی آب مجازی روی انتخاب نوع نیروگاه اثرگذار خواهد بود.

در این مقاله مسأله آب مجازی در پروژه‌های خط انتقال به خصوص در بخش انرژی لازم برای انتقال آب مورد توجه قرار گرفته است و نشان داده خواهد شد که این مساله حتی در مرحله مطالعات و طراحی خطوط انتقال آب، باید به عنوان یکی از شاخص‌ها مدنظر قرار گیرد. برای نشان دادن این موضوع، سامانه انتقال آب سد صفارود به شهر کرمان درنظر گرفته شده و میزان صرفه‌جویی در آب مجازی در صورت تولید نیروی برق‌آبی در بخش حرکت ثقلی آب در دو حالت طراحی موجود و طراحی مبتنی بر تولید حداکثر نیروی برق‌آبی مقایسه گردیده است. در مقاله‌ی حاضر، نشان داده می‌شود چگونه مفاهیم آب مجازی و ردپای آب در مرحله طراحی خطوط انتقال بر مصرف انرژی تأثیر می‌گذارد.

مواد و روش‌ها

آب مجازی

مفهوم آب مجازی برای نشان دادن کل مقدار آب مصرف شده برای تولید یک محصول مطرح شد. در واقع کل مقدار آب مصرفی را در زنجیره تولید برای پدیدآوری یک محصول نهایی آب مجازی می‌نامند (هوکسترا[5]، ۲۰۰۳). آب مجازی، مقدار آب مصرف شده برای تولید یک کالا مثل سیب، لباس یا دوچرخه است. از آب مجازی همچنین با عناوینی چون "آب پنهان" ، "آب تجسم‌یافته" ، یا "آب سایه‌ای" نیز یاد می‌شود. این مفهوم برای اشاره به مفاهیم مشابهی همچون انرژی پنهان و ردپای کربن نیز بیان شده است (دوفریتور[6]، ۲۰۰۴). آلان[7] برای اولین بار این اصطلاح را در سال ۱۹۹۰، در حالی که وضعیت منابع آب خاورمیانه را بررسی می‌کرد، ابداع نمود. هیچ چیز مجازی در مورد آب مجازی وجود ندارد، بنابراین این اصطلاح برای برخی ممکن است گمراه کننده باشد. صفت مجازی در این تعریف به این معناست که بخش عمده‌ی آب مصرف شده طی فرآیند تولید در محصول نهایی وجود فیزیکی ندارد و در حقیقت بخش ناچیزی از آب

[1] Chini
[2] Stillwell
[3] Zhange
[4] Wang
[5] Hoekstra
[6] Du Fraiture
[7] Allan

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-07-05]

مصرفی در پایان به عنوان آب واقعی در بافت محصول باقی خواهد ماند (آلان[1]، ۱۹۹۷؛ زیگمونت[2]، ۲۰۰۷).

برای تبیین اهمیت نقش آب مجازی در هر پروژه، لازم است به انواع آب نیز توجه شود. آب مجازی اغلب برحسب آب سبز، آب آبی و آب خاکستری تعریف می‌شود. آب سبز، نسبت آب مصرف شده از بارش باران، آب آبی، آب سطحی و زیرزمینی و آب خاکستری، آب‌های ضایعاتی (پساب) ایجاد شده را نشان می‌دهند. در ایران می‌توان گفت اغلب منشأ آب مجازی، آب آبی و آب سبز است. بر این اساس می‌توان آب مجازی را به آب مجازی آبی و آب مجازی سبز تقسیم بندی نمود (روکستروم[3] و گردون[4]، ۲۰۰۱). آب سبز برای اولین بار توسط فالکنمارک[5] ۲۰۰۶ معرفی شد، تا اینکه بتوان با تفکیک آن از آب آبی با تقسیم بندی مناسبی از منابع آب، راحت‌تر آن را مدیریت کرد. همچنین با استفاده از این مفهوم جدید می‌توان به ارزیابی دقیق‌تری از نقش آب پرداخت. در مقایسه با آب آبی، آب سبز، منبع بزرگ‌تری از نظر حجم ذخایر آب شیرین و مشارکت در تولید مواد غذایی، به شمار می‌رود. ۶۵٪ از نزولات آسمانی به آب سبز و باقی به آب آبی تبدیل می‌شوند (روکستروم و گردون، ۲۰۰۱). بهره‌برداری از آب آبی به دلیل نیاز به شبکه‌های انتقال و توزیع آب، بسیار گران‌تر از آب سبز است، بنابراین باید توجه داشت که آب آبی مجازی از اهمیت بالاتری برخوردار است.

ردپای آب

هوکسترا[6] و هانگ[7] ۲۰۰۲ عنوان نمودند که کل مصرف آب در داخل یک کشور به تنهایی معیار درستی از برداشت واقعی آب آن کشور از منابع آب جهانی نیست. در واقع، حجم آب مجازی وارداتی باید به کل مصرف آب داخلی افزوده شود تا تصویر درستی از نیاز واقعی یک کشور به منابع آب جهانی ترسیم گردد. همین طور، حجم آب مجازی صادر شده باید از حجم مصرف آب داخلی کم شود. آنها جمع واردات خالص آب مجازی و مصرف آب داخلی را تحت عنوان ردپای آب یک کشور معرفی کردند، که شاخصی برای تعیین میزان مصرف واقعی آب در یک کشور است. ردپای آب می‌تواند درجایی که در مورد ردپای آب یک مصرف کننده یا تولید کننده صحبت می‌شود نیز مورد استفاده قرار گیرد. ردپای آب در سال ۲۰۰۲ به‌عنوان یک شاخصی از مصرف آب شیرین معرفی شد که هر دو نوع مصرف آب مستقیم و غیرمستقیم یک مصرف‌کننده یا تولیدکننده را در نظر می‌گیرد (یونپ[8]، ۲۰۱۰). ردپای آب، آنالیزی از مصرف آب در سراسر کل زنجیره تأمین یک محصول یا خدمات است. ردپای آب، بر پایه تئوری آب مجازی با هدف تعیین میزان اثرات، ایجاد شده است و این دو واژه اغلب به جای یکدیگر استفاده می‌شوند. با این حال، از آنجا که آب مجازی صرفاً به حجم آب پنهان در یک محصول اشاره دارد، ردپای آب بر اساس مفهوم آب مجازی گسترش یافته که شامل یک شاخص مکانی و زمانی صریح از مصرف آب شیرین نیز می‌شود (امیدی[9]، ۱۳۹۶). با این توضیح، در مقاله‌ی حاضر، ردپای آب و آب مجازی به صورت معادل مورد استفاده قرار می‌گیرند.

آب مجازی در تولید نیروی برق

با افزایش توسعه‌ی اقتصادی، نقش آب در تولید انرژی و به خصوص تولید نیروی برق اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. در تولید نیروی برق، آب در قسمت‌های مختلف از جمله سیستم‌های تولید بخار برای مصرف گرمایش، برای تأمین بار سرمایش، برای شستشوی تجهیزات و در جایگاه یک ماده شیمیایی برای واکنش‌های شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. آب نقش اساسی در هر سه مرحله‌ی تولید، انتقال و توزیع نیروی برق دارد. اما در صنعت برق، آب مجازی شامل آب مصرفی در مراحل تولید، به ویژه خنک‌کاری در نیروگاه‌های حرارتی و شستشو در نیروگاه‌های خورشیدی، مصرف داخلی کارکنان نیروگاه و آبیاری فضای سبز نیروگاه می‌شود. رضایی[10] و همکاران (۱۴۰۰) نشان دادند میزان آب مجازی مصرفی در نیروگاه‌های مختلف، تابع نوع نیروگاه و نوع سیستم خنک کننده‌ی آن نیز می‌باشد. به طوری که میزان

[1] Allan
[2] Zygmunt
[3] Rockstrom
[4] Gordon
[5] Falkenmark
[6] Hoekstra
[7] Hung
[8] UNEP
[9] Omidi
[10] Rezaie

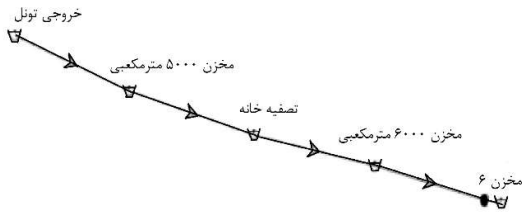
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-07-05]

مصرف آب مجازی برای نیروگاه‌های بخاری با سیستم‌خنک‌کننده‌ی برج تر برابر با ۲/۲ لیتر بر کیلووات‌ساعت، برای نیروگاه‌های بخاری و سیکل ترکیبی با سیستم خنک‌کنندهٔ یک بارگذر ۱/۵ لیتر بر کیلووات ساعت، برای نیروگاه های بخاری و سیکل ترکیبی با سیستم خنک کنندهٔ خشک ۰/۲ لیتر بـرکیلووات ساعت، برای نیروگاه‌های گازی ۰/۰۲۵ لیتر بـر کیلووات‌ساعت و برای نیروگاه‌های فتوولتاییک ۰/۰۷ لیتر بر کیلووات‌ساعت است. به طور متوسط، مصرف آب در نیروگاه های حرارتی، برابر بـا ۲ میلیون متر مکعب و در نیروگاه فتوولتاییک و بادی، ۳ هـزار مترمکعب در سال است. بنابراین آب مجازی به ترتیب در نیروگاه بخاری، سیکل ترکیبی، گازی، فتوولتاییک و بادی بیشتر است. همچنین کومار[1] و همکاران ۲۰۲۰ در تحقیقی، میزان آب مصرفی بـه ازای هر کیلووات ساعت برق تولیدی در انواع تکنولوژی‌های تولید برق و انواع سیستم‌های خنک‌کن را بررسی کردند. نتـایج تحقیق آنها نشان داد مصرف آب در انرژی‌های تجدیدپذیر، قابل چشم‌پوشی و در نیروگاه‌های حرارتی که گاز طبیعی سوخت آنها را تشکیل می‌دهد ۲/۶ لیتر بر کیلووات‌ساعت برای سیستم‌های خنک‌کن برج تر و ۱/۱ لیتر بر کیلووات‌ساعت برای سیستم‌های خنک‌کن یک بارگذر بوده است. مکنیک[2] و همکاران ۲۰۱۲ نیز مصرف آب در نیروگاه بادی را صفر و فتوولتاییک را ۰/۰۹ لیتر بـرکیلووات‌ساعت و مقدار آب مصرفی در نیروگاه حرارتی بـا سیستم خنک کنندهٔ تر را ۲/۵ لیتر بـرکیلووات‌ساعت و ۰/۹ لیتر بر کیلووات‌ساعت برای سیستم خنک‌کن یک بارگذر محاسبه کرده اند.

سامانه‌ی انتقال آب سد صفارود به کرمان

سد صفا رود در فاصله ۱۸۰ کیلومتری جنوب غربی کرمان و ۷ کیلومتری شهرستان رابر، در نزدیکی روستای صفا واقع شده است. هدف از جانمایی و ساخت این سد، تأمین آب آشامیدنی و صنعت شهرهای کرمان و رابر و مهار سیلاب و روان آب های فصلی رودخانه های رودبر و رابر بوده است.

سامانه‌ی خط انتقال سد صفارود به کرمان که در حال اجرا می‌باشد، جهت انتقال آب سد صفا رود به کرمان طراحی و از سه قسمت کلی تشکیل شده است. در قسمت اول، آب، به وسیله پمپ، از سد به ابتدای تونل منتقل خواهد شد. در قسمت دوم، آب در تونل با شیب کم ثقلی منتقل می‌شود و در قسمت سوم، آب، از خروجی تونل به صورت ثقلی به شهر کرمان منتقل خواهد شد. در هر سه بخش، از لوله‌های فولادی استفاده شده است و در مقاله حاضر قسمت سوم این خط انتقال یعنی بخش حرکت ثقلی آب مد نظر است. بر این اساس، قسمت حرکت ثقلی آب در نرم‌افزار واترجمز شبیه‌سازی گردید که در شکل (۱) نمایش داده شده است.



شکل (۱) پروفیل سامانه‌ی خط انتقال آب از سد صفارود

همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، این بخش شامل چهار قطعه است. قطعه‌ی اول، از خروجی تونل تا مخزن ۵۰۰۰ مترمکعبی، قطعه دوم، از مخزن ۵۰۰۰ مترمکعبی تا تصفیه‌خانه، قطعه‌ی سوم، از تصفیه‌خانه تا مخزن ۶۰۰۰ مترمکعبی و قطعه‌ی چهارم، از مخزن ۶۰۰۰ مترمکعبی تا مخزن شماره ۶ را شامل می‌شود.

نتایج

برای ارزیابی مقدار آب مجازی صرفه‌جویی شده در صورت تولید نیروی برق‌آبی در بخش ثقلی خط انتقال سد صفارود به کرمان ابتدا لازم بود که خط از نظر هیدرولیکی مورد بررسی قرار گیرد. به این منظور از نرم‌افزار واترجمز بهره گرفته شد و بخش مورد نظر از خط انتقال، در نرم‌افزار واترجمز شبیه‌سازی گردید. خلاصه نتایج شبیه‌سازی در جدول (۱) آمده است.

[1] Kumar

[2] Macknick

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-07-05]

جدول (۱) جزئیات شبیه‌سازی مربوط به مشخصات مسیر انتقال آب

	مشخصات		ارتفاع مخزن/لوله (m)	گرادیان هیدرولیکی (m)	طول (Km)	قطر (mm)	سرعت آب (m/s)
قطعه‌ی اول	شروع	خروجی تونل	۲۳۵۴/۵۴	۲۳۵۴/۵۴	۱۶/۵	۱۱۷۳/۲	۱/۷۵
	پایان	مخزن ۵۰۰۰ مترمکعب	۲۱۳۱/۲۴۷	۲۳۰۶/۸			
قطعه‌ی دوم	شروع	مخزن ۵۰۰۰ مترمکعب	۲۱۳۱/۵۱	۲۱۳۱/۵۱	۲۳/۷۷	۱۱۷۳/۲	۱/۷۵
	پایان	تصفیه‌خانه	۱۹۱۳/۱۲	۲۰۶۱/۳۱			
قطعه‌ی سوم	شروع	تصفیه‌خانه	۱۸۸۹/۶۹	۱۸۸۹/۶۹	۹/۳۷	۱۱۷۳/۲	۱/۷۵
	پایان	مخزن ۶۰۰۰ متر مکعبی	۱۸۰۴/۸۳	۱۸۶۸/۷۵			
قطعه‌ی چهارم	شروع	مخزن ۶۰۰۰ مترمکعبی	۱۸۰۴/۷۷	۱۷۴۸/۹۴	۱۵/۶۷	۱۵۷۲/۶	۱/۰۳
	پایان	مخزن شماره ۶	۱۷۴۸/۹۴	۱۷۶۳/۷			

ضریب زبری هیزن ویلیامز در نرم‌افزار معادل ۱۱۰ برای لوله‌ی فولادی در نظر گرفته شده است. با توجه به شرایط اجرایی کارگاهی و مطالعات میدانی صورت‌گرفته، این ضریب برآورد مناسبی از افت هد مسیر را در اختیار قرار می‌دهد. با توجه به طراحی خط انتقال برای حد متوسط ۶۰ میلیون مترمکعب سالانه از آورد سد صفارود، دبی متوسط ۲ مترمکعب در نظر گرفته شده است. همچنین شایان ذکر است با توجه به شرایط محدودیت منابع آب برای شهر کرمان، قابلیت عبور آب تا دبی ۳ مترمکعب در ثانیه نیز مدنظر بوده است. گرچه با توجه به شبیه‌سازی انجام شده مشخص گردید، عبور آب با این دبی از سامانه‌ی مزبور امکان‌پذیر نخواهد بود و بنابراین همان دبی ۲ مترمکعب بر ثانیه باید در کل دوره بهره‌برداری مدنظر قرار گیرد.

در مرحله بعد میزان توان تولیدی در هر قطعه، مورد محاسبه قرار می‌گیرد. به این منظور برای محاسبه‌ی مقدار تولید انرژی یا ظرفیت نصب نیروگاه از رابطه (۱) استفاده شده است:

$$P = \frac{\rho.g.Q.H.\sigma}{1000} \quad (۱)$$

که در آن P توان مکانیکی (نیروی تولید) بر حسب کیلووات برق تولیدی، ρ وزن مخصوص آب، g شتاب ثقل زمین، Q آبدهی رودخانه یا دبی خط انتقال بر حسب مترمکعب بر ثانیه (m^3/s)، H ارتفاع مؤثر یا خالص آب بر حسب m و σ راندمان کل ژنراتور، ترانسفورماتور قدرت و توربین بوده که از حاصلضرب راندمان ترانس قدرت (σ_{Te})، ژنراتور(σ_G) در راندمان توربین (σ_{To}) به دست می‌آید. بنابراین رابطه (۲) را خواهیم داشت (Pasalli and Rehiara, 2014):

$$P = 9.8\ Q.H.\sigma \quad (۲)$$

مقادیر (σ_{Te})، (σ_G)، و(σ_t) به ترتیب حدود ۹۶٪، ۹۳٪، و ۹۰٪ می‌باشند و مقدار σ برابر با ۸۰٪ و رابطه (۳) به شکل زیر ساده می گردد.

$$P = 7.84\ Q.H \quad (۳)$$

براین اساس، توان قابل تولید در مکان‌های مورد نظر برای احداث نیروگاه در انتهای هر قطعه که با G1 تا G4 نشان داده شده‌اند، در جدول (۲) برآورد شده است. هرچند میزان انرژی الکتریکی با درنظرگرفتن راندمان معادل توربین، ژنراتور، ترانس (۸۰٪) تخمین زده می‌شود، ولی تکنولوژی‌های امروزه راندمان‌های بالاتری را نیز در حدود ۸۵٪ دارا خواهند بود (Motwani et al., 2013).

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-07-05]

جدول (۲) نتایج محاسبات توان قابل تولید در نقاط مورد نظر از خط انتقال آب صفارود

شماره واحد	G1	G2	G3	G4
نقاط پتانسیل دار نیروگاهی	مخزن تقلیل فشار ۵۰۰۰ مترمکعب	ایستگاه تصفیه‌خانه	مخزن ۶۰۰۰۰ مترمکعب	مخزن شماره ۶
ظرفیت تولید kw	۳۴۱۰	۲۸۸۱	۱۱۱۷	۸۶۲
توان الکتریکی خروجیkw	۲۷۲۸	۲۳۰۵	۸۹۴	۶۹۰
چیدمان پیشنهادی نیروگاه	دو واحد	دو واحد	یک واحد	یک واحد
نوع توربین پیشنهادی	پلتون/فرانسیس- ظرفیت ۱/۹ مگاوات	پلتون/فرانسیس- ظرفیت ۱/۶ مگاوات	فرانسیس- ظرفیت ۱/۲۵ مگاوات	فرانسیس/کاپلن- ظرفیت ۱ مگاوات
هد طراحیm	۱۷۴	۱۴۷	۵۷	۴۴
ارتفاع از سطح دریا m (ضریب ارتفاع)	۲۱۱۶ (۵٪)	۱۹۱۹ (۴٪)	۱۸۲۰ (۳.۵٪)	۱۷۶۳ (۲.۵٪)
حداقل ظرفیت ژنراتور	۱/۶ مگاوات	۱/۴ مگاوات	۱ مگاوات	۰/۸ مگاوات

در مرحله‌ی آخر، برای محاسبه‌ی مقدار آب مجازی صرفه-جویی شده، ابتدا مقدار آب مجازی برای تولید یک کیلووات ساعت برق انواع نیروگاه‌های موجود در کشور مورد بررسی قرار گرفت و سهم هر نوع نیروگاه در تولید برق مشخص گردید. سپس بر اساس میزان آب مجازی هر نوع نیروگاه، مقدار آب مجازی متوسط برای تولید هرکیلووات ساعت برق در کشور محاسبه گردید. در جدول (۳) نوع نیروگاه‌های موجود در کشور و درصد سهم هریک در تولید برق بر اساس گزارش شرکت مادر تخصصی توانیر ۱۳۹۹ آمده است. همچنین میزان آب مجازی هر نوع نیروگاه بر حسب لیتر بر کیلووات‌ساعت مطابق مطالعات رضایی و همکاران ۱۴۰۰ و مکنیک[1] و همکاران ۲۰۱۲ و کومار[2] و همکاران ۲۰۲۰ در نظر گرفته شده است.

.

جدول (۳) مشخصات نیروگاه‌های موجود در کشور و آب مجازی مورد نیاز آنها

نوع نیروگاه	بخاری	گازی	سیکل ترکیبی	برق‌آبی	سایر
سهم نیروگاه در تولید برق کشور (درصد)	۱۸/۴	۲۵/۶	۳۷	۱۴	۵
آب مجازی هر نوع نیروگاه (لیتر در کیلووات ساعت)	۱/۴	۰/۰۲۵	۰/۹۸	۰	۰

بنابراین متوسط آب مجازی برای تولید هرکیلووات ساعت برق در کشور ۰/۶۳ لیتر خواهد بود. و مطابق جدول (۴) مجموع آب مجازی صرفه‌جویی شده در صورت راه‌اندازی واحدهای تولید نیروی برق‌آبی در خط انتقال آب صفارود ۴۵۶۳۹ مترمکعب در سال خواهد بود.

جدول (۴) جزئیات مقدار آب مجازی صرفه‌جویی شده در صورت راه‌اندازی هر نیروگاه برق‌آبی

شماره واحد	G1	G2	G3	G4
نقاط پتانسیل دار نیروگاهی	مخزن تقلیل فشار ۵۰۰۰ مترمکعب	ایستگاه تصفیه‌خانه	مخزن ۶۰۰۰۰ مترمکعب	مخزن شماره ۶
ظرفیت تولید kw	۳۴۱۰	۲۸۸۱	۱۱۱۷	۸۶۲

[1] Macknick

[2] Kumar

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-07-05]

شماره واحد	G1	G2	G3	G4
ظرفیت تولید kwh	۲۹۸۷۱۶۰۰	۲۵۲۳۷۵۶۰	۹۷۸۴۹۲۰	۷۵۵۱۱۲۰
آب مجازی صرفه جویی شده (m^3)	۱۸۸۱۹	۱۵۸۹۹	۶۱۶۴	۴۷۵۷

همچنین نکته‌ی قابل توجه این است که بر اساس مطالعه‌ای که توسط ثمره‌هاشمی ۱۳۹۹ صورت گرفته است، اگر در مرحله طراحی این طرح به مساله تولید انرژی برق‌آبی توجه می‌شد و از اپوکسی برای پوشش داخلی لوله‌ها به جای ملات ماسه سیمان استفاده می‌شد، به دلیل زبری کمتر اپوکسی و افت هد کمتر، توان تولیدی می‌توانست ۱۳ درصد بیشتر باشد، بنابراین مقدار آب مجازی صرفه‌جویی شده تا ۵۱۵۷۲ مترمکعب در سال افزایش می‌یافت.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، مقدار آب مجازی صرفه‌جویی شده در صورت استفاده از پتانسیل نیروی برق‌آبی در مسیر خط انتقال سد صفارود مورد بررسی قرار گرفت. چهار نقطه با پتانسیل تولید نیروی برق‌آبی شناسایی گردید و برای هر نقطه با توجه به اطلاعات هیدرولیکی استخراج شده از نرم‌افزار واترجمز و محاسبات انجام شده مقدار برق قابل تولید محاسبه شد. سپس با توجه به اینکه مقدار آب مجازی به کار رفته برای تولید هر کیلو وات ساعت برق در کشور به طور متوسط با توجه به مطالعات انجام شده در این زمینه محاسبه گردید. به این ترتیب، مقدار آب مجازی صرفه‌جویی شده در صورت تولید نیروی برق‌آبی در چهار نقطه‌ی شناسایی شده به دست آمد. محاسبات نشان می‌دهد ۴۵۶۳۹ مترمکعب آب در طول سال صرفه‌جویی خواهد شد که این مقدار آب با توجه به مسأله‌ی کمبود آب در کشور، عدد قابل توجهی است. همچنین اگر در مرحله مطالعات طراحی این طرح به موضوع پتانسیل تولید نیروی برق‌آبی توجه شده بود و حداقل افت هد در مسیر، مدنظر قرار می‌گرفت، به جای ملات ماسه سیمان به عنوان پوشش داخلی از اپوکسی استفاده می‌شد و محاسبات انجام گرفته بر اساس پوشش داخلی اپوکسی نشان می‌دهد که میزان صرفه‌جویی آب مجازی به ۵۱۵۷۲ متر مکعب در سال می‌رسید که این موضوع اهمیت توجه به پتانسیل نیروی برق‌آبی و محاسبه آب مجازی را نشان می‌دهد. شایان ذکر است در مطالعه‌ی صورت گرفته مقدار آب مجازی به ازای تولید نیروی برق محاسبه گردید که پیشنهاد می‌شود محاسبات آب مجازی برای همه بخش‌های یک طرح انتقال آب انجام شده و در نهایت عدد آب مجازی با آب منتقل شده مقایسه گردد.

مراجع

1- Allan, J. A. (1997). 'Virtual water': a long term solution for water short Middle Easterneconomies? (pp. 24-29). London: School of Oriental and African Studies, University of London.

2- Chinia C. M., Stillwellb A. S. (2020) The changing virtual water trade network of the European electric grid, Applied Energy 260(114151) https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114151

3- Chapagain, A. K., Hoekstra, A. Y., Savenije, H. H. G., & Gautam, R. (2006). The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. Ecological economics, 60(1), 186-203.

4- Du Fraiture, C. (2004). Does international cereal trade save water?: the impact of virtual water trade on global water use (Vol. 4). Iwmi.

5- Falkenmark, M., & Rockström, J. (2006). The new blue and green water paradigm: Breaking new ground for water resources planning and management.

6- Galli, A., Wiedmann, T., Ercin, E., Knoblauch, D., Ewing, B., Giljum, S., (2012). Integrating ecological, carbon and water footprint into a “footprint family” of indicators: definition and role in tracking human pressure on the planet. Ecol. Indic. 16, 100–112, http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.06.017.

7- Haghighi E., Madani K., Hoekstra A. Y. (2018) The water footprint of water conservation using shade balls in California, Nature Sustainability, 1:358-360 https://doi.org/10.1038/s41893-018-0092-2

8- Hoekstra, A.Y., (2003). Virtual water trade. In: Proceedings of the International ExpertMeeting on Virtual Water Trade, Delft, The Netherlands. Value of Water Research Report Series, vol. 12. UNESCO-IHE, Delft, The Netherlands.

9- Hoekstra, A.Y., (2011). How sustainable is Europe’s water footprint? Water Wastewater Int. 26, 24–26.

10- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K. (2007). The water footprints of Morocco and the Netherlands: Global water use as a result of domestic consumption of agricultural commodities. Ecological Economics, 64(1), 143-151.

11- Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M., Mekonnen, M.M., (2011). The Water Footprint

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-07-05]

Assessment Manual. Setting the Global Standard. Earthscan, London.
12- Hoekstra, A. Y., Hung, P. Q. (2002). Virtual water trade. A quantification of virtualwater flows between nations in relation to international crop trade. Value of water research report series, 11, 166.
13- Kumar S, Managi S, Jain R. (2020) CO2 mitigation policy for Indian thermal power sector: Potential gains from emission trading. Energy Economics. 86, 104653.
14- Macknick J, Newmark R, Heath G, Hallett KC. (2012) Operational water consumption and withdrawal factors for electricity generating technologies: a review of existing literature. Environmental Research Letters. Dec 20;7(4):045802.
15- Martín A. D. (2012) Water footprint of electric power generation: modeling its ude and analyzing options for a water-scarce future, MSC thesis of TECHNOLOGY AND POLICY MIT university. DOI:10.13140/2.1.2864.4643
16- Motwani K. H., Jainb S V, Patel R N (2013) Cost analysis of pump as turbine for pico hydropower plants – a case study, Procedia Engineering 51, 721 – 726.
17- Mousavi Rine M, Yousefi H (2020) Examining the water footprint in electricity production with an emphasis on renewable energies, Ecohydrology, 7(4) 1007-1019. (In Persian)
18- Omidi, T (2017) Determining and reviewing the strategies and priorities of export-import of agricultural products based on the concept of virtual water, MSc thesis of water resources engineering, Agriculture faculty, Tarbiat Modares university, Tehran. (In Persian)
19- Pasalli, Y. R., Rehiara A. B. (2014) Design Planning of Micro-hydro Power Plant in Hink River, Procedia Environmental Sciences 20, 55 – 63.
20- Rezaie, N Hejazi, R Yousefi H (2021) Estimating the amount of virtual water and the cost of virtual water for the production of electricity in selected fossil and renewable power plants of the country, Ecohydrology, 8(4) 1147-1161. (In Persian)
21- Rockström, J and L Gordon (2001). Assessment of green water flows to sustain major biomes of the world: Implications for future ecohydrological landscape management. Physics and Chemistry of the Earth, 26(11-12), 842-851.
22- Samareh Hashemi, M (2020) Investigating the economic and technical effects of the internal coating of water transmission pipes in the production of hydroelectric power and the importance of head loss calculations, Irrigation and water engineering of Iran, 11(42) 192-202. (In Persian)
23- Tavanir Company (2020) Report of 53 years of electricity industry in the mirror of statistics, 57 pages. (In Persian)
24- UNEP., (2010). Africa Water Atlas, United Nations Environmental Programme. Available at: http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=qjIPf84HHnsC&oi=fnd&pg=PR5&dq=Africa+Water+Atlas&ots=_qZRwLIxi8&sig=c4gyzolbflLHpyoKB2R6BzL7WyI [Accessed September 16, 2011].
25- Van Oel, P. R., Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2009). The external water footprint of the Netherlands: Geographically-explicit quantification and impact assessment. Ecological Economics, 69(1), 82-92.
26- Wang W., Zhuo L., Rulli M. C., Wu P., (2022) Limited water scarcity mitigation by expanded interbasin physical and virtual water diversions with unev en economic value added in China, Science of the Total Environment 847 (157625) http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157625
27- Yang, H. O. N. G., Wang, L., Abbaspour, K. C., & Zehnder, A. J. (2006). Virtual water trade: an assessment of water use efficiency in the international food trade. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 10(3), 443-454.
28- Zhang Y., Hou S., Chen S., Long H., Liu J., Wang J. (2021) Tracking flows and network dynamics of virtual water in electricity transmission across China, Renewable and Sustainable Energy Reviews 137 (110475), https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110475
29- Zeitoun, M. (2011). The global web of national water security. Global Policy, 2(3), 286-296.
30- Zygment, J. (2007). Hidden waters, a brief review of the literature and recent research on embedded water. Available online at: http://www.waterwise.org.uk/.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-07-05]

نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی ایران
سال دهم/ شماره سی و پنجم/ پاییز ۱۴۰۲

Journal of Iranian Dam and Hydroelectric Power Plant
10th Year/ No. 35/ December 2023

Analysis of hydroelectric power generation in water transmission lines from the perspective of virtual water, case study: Safaroud dam transmission line to Kerman.

Marzie Samare Hashemi*[1]

Abstract

In recent years the projects of water transmission had an increasing trend in Iran. However, the issue of electrical energy related to these projects has received less attention. Another important issue regarding the power generation is the amount of virtual water to produce each kilowatt hour of power generation. In this regard, the current paper has examined the amount of virtual water for the production of electricity, in the water transmission line from Safaroud dam to Kerman. The potential of producing hydroelectric power and as a result the amount of virtual water saved due to this amount of production has been checked and calculated. For this purpose, first, the transmission line has been simulated in WaterGEMS software, then the hydroelectric power generation potential has been calculated. On the other hand, by calculating the average amount of virtual water to produce each kilowatt hour of electricity, the amount of virtual water saved in the case of producing this amount of hydroelectric power has been calculated. The results show that there is 72.5 gigawatt hours of hydroelectric power production capability in this system, and if this amount of hydroelectric power is produced, 45639 cubic meters of virtual water will be saved per year.

Keywords

Water transmission systems, hydroelectric power, virtual water.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-07-05]

[1]* Corresponding author scientific degree. E-mail address

Received: 2023/02/22 Accepted: 2023/08/27