نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال هشتم، شماره ۳، صفحات ۳۵-۴۶، پاییز ۱۴۰۲

Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
Vol. 8, No. 3, PP. 35-46, Autumn 2023
DOI: 10.22112/JWWSE.2023.366738.1331

مقاله پژوهشی

ارزیابی پیوند آب-انرژی در صادرات و واردات برق ایران با استفاده از رویکرد آب مجازی

مرتضی تهامی‌پور زرندی[1*] و عرفان اسمعیل‌زاده هنجنی[2]
۱- استادیار دانشکده اقتصاد و علوم سیاسی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
۲-دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده اقتصاد و علوم سیاسی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
* نویسنده مسئول، ایمیل: m_tahami@sbu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۵
تاریخ اصلاح: ۱۴۰۱/۱۱/۰۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۱
© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

کشور ایران با محدودیت منابع آب مواجه است و از طرفی همه فرایندهای تولیدی و خدماتی نیازمند استفاده از آب است. لذا ارزیابی وضعیت آب‌بری فعالیت‌ها و ارائه روش‌های بهینه‌سازی آن اهمیت بسیار زیادی دارد. بر این اساس، هدف مطالعه حاضر ارزیابی آب مصرفی در تولید هر کیلووات ساعت برق و بررسی وضعیت آب مجازی در فرایند صادرات و واردات برق ایران است. برای این منظور از دو روش تحلیل مسیر ساختاری و رهیافت فنی-پایه استفاده شده است. نتایج نشان داد که نیروگاه‌های کشور به‌طور متوسط به‌ازای تولید هر کیلووات ساعت برق، ۱/۵ لیتر آب به‌طور مستقیم مصرف می‌کنند. هم‌چنین طبق نتایج روش تحلیل مسیر ساختاری، در زنجیره تولید برق تا قبل از رسیدن به نیروگاه، به ازای هر کیلووات ساعت برق، ۲/۵ لیتر آب به‌طور غیرمستقیم مصرف می‌شود. لذا کل زنجیره، ۴ لیتر آب به‌ازای هر کیلووات ساعت تولید برق، مصرف می‌کند. از کل آب مصرف شده در زنجیره تولید برق که بیش از یک میلیارد متر مکعب است، ۳۸٪ آن مستقیماً در نیروگاه‌ها و ۶۲٪ دیگر آن در زنجیره تولید، مصرف شده است.

کلمات کلیدی: مصرف آب ویژه، پیوند آب-انرژی، آب مجازی، صنعت برق، ایران.

Research Paper

Measuring and Evaluating Water-Energy Nexus in Iran's Electricity Export and Import Using Virtual Water Approach

Morteza Tahamipour Zarandi[1*] and Erfan Esmaiel Zadeh Hanjani[2]
1- Assistant Professor, Faculty of Economics and Political Science, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
2- M.Sc., Faculty of Economics and Political Science, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
* Corresponding Author, Email: m_tahami@sbu.ac.ir

Received: 16/11/2022
Revised: 26/01/2023
Accepted: 31/01/2023
© IWWA

Abstract

Iran is facing limited water resources and all production and service processes require the use of water, so it is very important to evaluate the state of water consumption of activities and provide methods for its optimization. So, the aim of the present study is to evaluate the water consumption in the production of each kilowatt hour of electricity and to examine the virtual water situation in the process of exporting and importing electricity in Iran. For this purpose, two methods of structural path analysis and technical-basic approach have been used. The results showed that the country's power plants directly consume 1.5 liters of water per kilowatt hour of electricity production. Also, according to the results of the structural path analysis method, in the electricity production chain before reaching the power plant, 2.5 liters of water is indirectly consumed per kilowatt hour of electricity, and therefore the entire chain consumes 4 liters of water per kilowatt hour. Of the total water consumed in the electricity production chain, which is more than one billion cubic meters, 38% of it was consumed directly in power plants and the other 62% in the production chain.

Keywords: Special Water Consumption, Water-Energy Nexus, Virtual Water, Electricity Industry, Iran.

۱- مقدمه

رشد سریع جمعیت و افزایش شهر نشینی در چند دهه گذشته باعث شده دولت‌ها بیش از پیش به فکر کنترل و بهینه‌سازی مصارف منابع طبیعی و انواع انرژی بیفتند. به‌خصوص در کشورهای درحال توسعه، مسئله کمبود منابع برای برطرف کردن نیازهای جمعیت روزافزون این کشورها بیشتر به‌چشم می‌خورد. در این حین، کمبود منابع آب شیرین و بحران آب در جهان باعث شده از بین منابع طبیعی، به منابع آبی توجه بیشتری شود. مدیریت بهینه منابع آب در جهان تامین کننده امنیت غذایی، معیشت افراد، توسعه صنعتی و پایداری محیطزیست است (محمدجانی و یزدانیان، ۱۳۹۳). سازمان همکاری اقتصادی و توسعه[1] در سال ۲۰۱۱ گزارشی منتشر کرد که در آن میزان افزایش تقاضا آب را تا سال ۲۰۵۰ ، ۵۰ درصد برآورد کرده است. انتظار می‌رود در آینده نزدیک بیش از ۴۰ درصد جمعیت جهان تحت فشار تنش شدید آب قرارگیرند (UNESCO, 2014). براساس شاخص سازمان ملل[2] برای ارزیابی وضعیت منابع آب کشورها، کشوری با بحران شدید منابع آب مواجه است که میزان برداشت آب آن کشور بیش از ۴۰ درصد کل منابع تجدیدپذیر آن کشور باشد. براساس این شاخص ایران با برداشت ۷۲/۳ درصدی منابع آب تجدیدپذیر خود، با بحران شدید آب مواجه است (محمدجانی و یزدانیان، ۱۳۹۳). لذا اهمیت پژوهش بیشتر و عمیق‌تر در زمینه آب با توجه به شرایط رشد جمعیت و رشد نیاز به منابع، بر هیچ‌کس پوشیده نیست. این درحالی است که امروزه با پیشرفت تکنولوژی و ایجاد نیاز به استفاده بیشتر از آن برای همه افراد، تقاضا برای برق همواره رو به افزایش است و چون به‌راحتی به سایر شکل‌های انرژی تبدیل می‌شود، این تقاضا بیشتر شدت گرفته است. با توجه به این‌که برق همانند سایر اشکال انرژی قابل ذخیره‌سازی نیست، لذا تولید و مصرف برق هم‌گام هستند. مجموع تولید برق از ۶،۱۱۶ تراوات ساعت در سال ۱۹۷۳ به ۲۰،۱۸۱ تراوات ساعت در سال ۲۰۰۸ افزایش یافته است، یعنی طی ۳۵ سال ۳/۳ برابر شده است. این امر بدان معنی است که تولید برق در جهان به‌طور متوسط سالانه ۳/۴۷ درصد افزایش یافته است (طبیبی، ۱۳۹۰).

در حال‌حاضر برق پس از نفت دارای بیشترین سهم در سبد مصرف انرژی جهان است و به‌دلیل این‌که نسبت به سایر حامل‌های انرژی پاک‌تر بوده و بیشتر در دسترس است، تقاضا برای مصرف آن همواره رو به افزایش است (طبیبی، ۱۳۹۰). طبق گزارش آمار کلیدی انرژی جهان[3] ۲۰۱۰، در سال ۱۹۷۳، ۹/۴ درصد از کل انرژی مصرف شده در جهان را برق تامین کرده و در سال ۲۰۰۸ این نسبت به ۱۷/۲ درصد رسیده است. صادرات برق به‌عنوان انرژی طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۶ به‌طور کلی دارای یک روند صعودی بوده و به‌طور متوسط سالانه ۱۴ درصد رشد داشته است. با استناد به آمار تفصیلی صنعت برق ایران، صادرات برق در سال ۱۳۹۶ میزان ۸.۱۷۲ میلیون کیلووات ساعت و میزان واردات در همین سال ۳.۸۵۲ میلیون کیلووات ساعت بوده است. در نتیجه می‌توان گفت خالص صادرات حاصل از تبادل انرژی برق ایران در سال ۱۳۹۶ برابر ۴.۳۲۰ میلیون کیلووات ساعت بوده است. براساس اطلاعات ارائه شده در لایحه بودجه سال ۱۳۹۹، درآمد حاصل از صادرات برق با رشدی ۱۰۰ درصدی نسبت به سال قبل به ۸۸ هزار و ۸۰۰ میلیارد تومان رسیده است.

آب مجازی، به‌میزان آب مصرف شده در فرآیند تولید هر کالایی گفته می‌شود. اما در چند دهه گذشته، ایده‌پردازان آب مجازی صرفاً به بررسی فرآیند تولید کالاها بسنده نکرده‌اند، بلکه به‌دنبال ردپای آب در تولید دیگر انرژی‌ها نیز بوده‌اند. این بررسی‌ها منجر به ورود مفاهیم جدیدی مانند همبست یا پیوند آب-انرژی به علم اقتصاد شده است. همبست یا پیوند آب-انرژی را می‌توان مفهومی که به بررسی ارتباط دو طرفه آب و انرژی یعنی آب مصرف شده در فرآیند تولید انرژی و انرژی به‌کار رفته در فرآیند تولید آب می‌پردازد، تعریف کرد. ایران از گذشته دارای مشکل کمبود آب بوده است. موقعیت جغرافیایی ایران باعث شده متوسط میزان بارندگی سالانه در آن ۲۵۰ میلی‌متر باشد، این یعنی در حدود یک سوم متوسط بارندگی سالانه در جهان. سهم ایران از منابع آب شیرین جهان نسبت به مناطق دیگر در سطح پایین‌تری قرار دارد. درحالی که ۱ درصد جمعیت جهان در ایران هستند، تنها ۰/۳ درصد از منابع آب شیرین جهان در اختیار ایران است (گرجیان، ۱۳۹۳). لذا مسئله آب همواره در ایران مورد اهمیت بوده است. در ایران میزان بارندگی سالانه معادل ۳۹۷/۹ میلیارد مترمکعب است که دو سوم آن قبل از رسیدن به رودخانه‌ها تبخیر می‌شود. منابع آب تجدیدپذیر داخلی سالانه معادل ۱۲۸/۵ میلیارد مترمکعب است و منابع آب تجدیدپذیر خارجی نیز سالانه ۹ میلیارد مترمکعب است. پس منابع آب تجدیدپذیر واقعی معادل ۱۳۷/۵ میلیارد مترمکعب سالانه است (FAO, 2014).

صنعت برق به‌عنوان صنعت زیربنایی و مادر نقش مهمی در توسعهٔ اقتصادی و رفاه جوامع دارد. طبق نشریه آمار تفصیلی صنعت برق ایران ویژه تولید نیروی برق در سال ۱۳۹۶، تولید کل برق در سال مذکور ۶/۵ درصد و سرانه تولید ۵/۲ درصد نسبت به

سال قبل افزایش داشته است. این آمار در دهه گذشته روند صعودی خودش را با همین شیب ادامه داده است (آمارنامه تفصیلی صنعت برق وزارت نیرو، ۱۴۰۰). ایران در سال ۲۰۱۷ رتبه شانزدهم تولید برق در دنیا و رتبه دوم منطقه پس از عربستان سعودی و رتبه هجدهم دنیا را در مصرف برق به‌خود اختصاص داده است (پایگاه خبری اتاق بازرگانی صنایع معادن و کشاورزی ایران، ۱۳۹۷).

با توجه به این مهم که ایران با محدودیت منابع آب مواجه است و از طرفی، نقش حساسی در تامین برق منطقه نیز دارد، بررسی تراز تجاری صنعت برق ایران با رویکرد آب مجازی مسئله روز و پر اهمیت کشور است و به‌عنوان هدف این مطالعه مدنظر قرارگرفته است. در این راستا، فرضیه مطالعه که مورد آزمون قرار می‌گیرد آن است که فرایندهای نیروگاهی کشور از نظر مصرف آب پرمصرف هستند و نسبت به هزینه فرصتی که آب در مصارف مختلف به‌ویژه در صنعت و معدن و شرب و کشاورزی کشور دارد، تولید برق مازاد و صادرات آن از نظر اقتصادی مقرون به‌صرفه نیست. محدودیت مهم این مطالعه، فقدان اطلاعات دقیق در مورد مصرف آب در بخش‌های مختلف فرایند تولید و به تفکیک نیروگاه‌های مختلف در کشور است که نویسندگان با توجه به فقدان این داده مجبور به شبیه‌سازی از نیروگاه‌های مشابه با تکنولوژی یکسان در سایر مناطق جهان شده‌اند. در این ارتباط مطالعاتی نیز قبلاً انجام شده که به‌دقت مورد تحلیل قرارگرفت. از جمله این مطالعات می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

شاید مرتبط‌ترین مطالعه داخلی در این زمینه مطالعه عیسی‌پور و عابدی (۱۳۹۳) باشد. در این مطالعه که نیروگاه‌های شهر تهران را مورد بررسی قرارداده است، با بررسی هشت نیروگاه برق و منابع آبی مورد استفاده این نیروگاه‌ها آب مصرف شده به‌ازای هر مگاوات ساعت برق تولید شده محاسبه شده است. براساس این مطالعه اگر میانگین وزنی‌ای از آب مصرفی نیروگاه‌ها با توجه به ظرفیت هر نیروگاه گرفته شود، میزان آب مجازی در برق در استان تهران بیش از ۸۰۰ لیتر به ازای تولید هر مگاوات ساعت برق است. Chen et al. (2019) در مطالعه‌ای با تاکید بر این مسئله که انرژی، آب و محیط‌زیست منابعی جدایی ناپذیر هستند، با استفاده از الگوی ARIMA این پیوند سه‌گانه را به‌طور کمی بررسی کردند. در مرحله اول میزان کل آب مصرفی برای تولید انرژی را تخمین زده و در مرحله دوم میزان آب مصرفی به ازای هر کیلووات ساعت برق تولید شده را به‌دست آوردند. Larsen and Drews (2019) پیوند آب-انرژی را در قاره اروپا مورد مطالعه قراردادند. در این مقاله میزان آب مجازی مبادله شده از طریق برق در بین این کشورها تخمین زده شد. این مطالعه که بازه زمانی ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۵ را مورد بررسی قرارداده است شاخص‌های مختلفی از مصرف آب در سیستم تولید برق در اروپا را بررسی و براساس تکنولوژی نیروگاه‌ها آن‌ها را دسته‌بندی کرده است. در این مطالعه اطلاعات بیش از ۲۰ مقاله در حوزه آب مجازی در عملیات در تولید برق استفاده شده است. Hasanzadeh et al. (2022)، پیوند آب-انرژی-غذا را با توجه به انتشار CO_2 از زمین‌های زراعی در شمال غرب ایران بهینه‌سازی کردند. نتایج ارزیابی‌های بهینه‌سازی برای شناسایی الگوی کشت بهینه، با تاکید بر به حداقل رساندن انتشار CO_2، نشان‌داد که جو، کلزا، ذرت سیلو و گندم در شرایط مورد مطالعه بهترین عملکرد را داشته‌اند. Terrapon et al. (2020) در مطالعه‌ای سناریوهای مختلف تقاضا آب برای تولید برق در سطح بین‌المللی و منطقه‌ای را بررسی کردند. طبق این مطالعه میزان آب مصرف شده برای تولید برق به سه مورد بستگی دارد. اول نوع سوخت مصرفی یا ترکیب سوخت‌های مصرف شده در نیروگاه، دوم سیستم خنک‌کننده نیروگاه و در آخر کشش مصرف آب برای هر ترکیب از دو مورد قبلی. این مطالعه سه سناریو برای سال‌های ۲۰۴۰ و ۲۰۵۰ ارائه داده و پیش‌بینی کرده است که اگر از انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید برق استفاده شود تا سال ۲۰۵۰ می‌توان گازهای گلخانه‌ای را در مقایسه با سال ۱۹۹۰ تا ۶۱ درصد کاهش داد. در همه این سناریوها بررسی شده که میزان آب مصرفی برای تولید برق چگونه تغییر می‌کند و براساس آن در سال ۲۰۵۰ نسبت به سال ۱۹۹۰ می‌توان آب مصرفی را تا ۷۲ درصد کاهش داد.

اکثر مطالعات انجام شده تمرکز روی آب مجازی مبادله شده در محصولات کشاورزی داشتند و کمتر روی آب مجازی و تحلیل آن در صنعت و به‌ویژه صنعت برق ایران بحث شده است. مطالعاتی که آب مجازی را در صنعت برق در ایران بررسی کرده‌اند محدود به یک استان یا منطقه‌ای خاص بوده و مطالعه جامعی در شبکه سراسری برق تاکنون در ایران صورت نگرفته است. در مطالعات خارجی برخلاف مطالعات داخلی بحث ردپای آب و آب مجازی در صنعت بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. در این دسته مطالعات، علاوه بر تقسیم‌بندی‌های دقیق‌تر در نوع نیروگاه‌ها و داده‌های بسیار شفاف‌تر از مصرف آب و سوخت در نیروگاه‌ها، اطلاعات مبادله انرژی در میان شرکای تجاری کشورها نیز بررسی شده است.

۲-مواد و روش‌ها

به‌طور کلی در محاسبات مربوط به آب مجازی همواره از دو روش استفاده می‌شود: رهیافت تعادل فراگیر و رهیافت فنی-پایه (تهامی‌پور و همکاران، ۱۳۹۴). به‌طور خلاصه در رهیافت تعادل فراگیر، کل مسیر کالاهای واسطه و میزان مصرف آب در هر یک از مراحل تولید تا رسیدن به کالای نهایی با استفاده از ضرایب جدول داده ستانده، تعاملات بین بخش‌های مختلف صنایع بررسی و مجموع آب مصرفی محاسبه می‌شود. اما در رهیافت فنی-پایه تمرکز روی مرحله نهایی تولید است. البته نمی‌توان اذعان داشت که کدام روش دقت بیشتر یا کارایی بیشتری نسبت به روش دیگر دارد. هرکدام از این روش‌ها با توجه به موضوع مورد بررسی می‌توانند کارایی لازم را داشته باشند. در روش فنی-پایه می‌توان تراز تجاری آب مجازی را با توجه به‌میزان واردات و صادرات کالا یا انرژی مورد نظر دقیق‌تر بررسی کرد.

رهیافت فنی-پایه در واقع روشی آماری برای محاسبه آب مجازی هر کالا است. در این روش اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه آب مجازی محدود است. تنها داده‌های مورد نیاز، مقدار آب خریداری‌شده و یا مصرف‌شده صنعت و مقدار کل تولید همان صنعت است (تهامی پور و همکاران، ۱۳۹۶) که در رابطه (۱) نحوه محاسبه آن آمده است.

$$SWD_i = {PW_i}/{Y_i} \qquad (۱)$$

که SWD_i: متوسط آب مصرفی ویژه کالای iام، PW_i: آب خریداری یا مصرف‌شده توسط واحد صنعتی و Y_i: مقدار تولید واحد صنعتی یا نیروگاه است. با محاسبه متوسط آب مصرفی ویژه برای کلیه واحدهای صنعتی یا نیروگاه‌های مورد مطالعه، شاخص آب مصرفی هر کیلووات ساعت کالای برق با رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$TSWD_i = SWD_i \times TP_i \qquad (۲)$$

که TP_i: نمایان‌گر مقدار تولید برق و $TSWD_i$: بیانگر کل آبی است که باید مصرف شود تا یک کیلووات ساعت برق تولید شود و به آن آب مصرفی پایه هر واحد کالای iام اطلاق می‌شود. شاخص پایه آب مصرفی کل محصولات صادراتی برحسب مترمکعب با ضرب SWD در کل صادرات کالا و آب مصرفی پایه وارداتی نیز از ضرب SWD در کل واردات کالا به‌دست می‌آیند.

همان‌طور که در رابطه (۳) نشان‌داده شده است. بدیهی است که از تفاضل این دو مقدار، تراز خارجی تجارت آب مجازی حاصل می‌شود که می‌تواند بسته به دوره مورد بررسی مثبت، منفی یا صفر باشد.

$$TVW_\pi = WFP_{EX} - WFP_{IM} \qquad (۳)$$

که TVW_π: تراز تجاری آب مجازی و مقادیر WFP_{IM} و WFP_{EX}: نشان‌دهنده کل آب وارداتی و صادراتی از طریق کالاهای صنعتی هستند.

از جمله مطالعاتی که از این رهیافت استفاده کرده‌اند می‌توان به باغستانی و همکاران (۱۳۸۹) و تهامی‌پور و عابدی (۱۳۹۴) اشاره نمود. در رهیافت تعادل فراگیر ابتدا آب مصرفی برای تولید یک کالا به مصرف آب مستقیم و مصرف آب غیرمستقیم تفکیک می‌شود. مقداری از آب که به‌عنوان نهاده اولیه در فرآیند تولید مورد استفاده قرار می‌گیرد، مصرف آب مستقیم و مجموع آب استفاده شده برای تولید کالای واسطه‌ای، مصرف آب غیرمستقیم تعریف می‌شود. مجموع دو آب مستقیم و غیرمستقیم در واقع کل آب استفاده شده برای تولید کالا و خدمات در بخش موردنظر است که آب مجازی نامیده می‌شود. با استفاده از رابطه (۴)، برای هر بخش اقتصاد با در دست داشتن میزان کل تولید، TP_j و آب استفاده شده آن بخش، W_j می‌توان شاخصی به نام شدت استفاده از آب، f_j که در واقع ضریب فنی آب در جدول داده ستانده است را تعریف و محاسبه کرد (تهامی‌پور و همکاران، ۱۳۹۶).

$$f_j = \frac{w_j}{TP_j} \qquad (۴)$$

حال با درنظر گرفتن این موضوع که آب غیرمستقیم ورودی به‌هر بخش در واقع قسمتی (مجموع وزنی) از آب مستقیم دیگر بخش‌ها است، با استفاده از معکوس ماتریس لئونتیف ($(I-A)^{-1}$) میزان آب مستقیم هر بخش که به‌صورت غیرمستقیم در بخش‌های دیگر مصرف می‌شود را می‌توان استخراج کرد. سپس با جمع مصرف مستقیم و غیرمستقیم آب، میزان آب مصرفی کل به‌ازای هر واحد کالا محاسبه می‌شود. در واقع، $(I-A)^{-1}$ به‌عنوان ضریب تکاثرکل اقتصاد برای وزن‌دهی و محاسبه کل آب استفاده شده برای تولید هر واحد کالا و خدمات در اقتصاد استفاده می‌شود. پس مقدار خالص صادرات آب مجازی طبق رابطه (۵)، قابل محاسبه است.

$$\begin{aligned} f_j^t &= f_j^d \sum_{i=1}^{n} a_{ij} f_j^t \\ f_t &= f_j + f_t x A \\ f_t - f_t x A &= f_j \\ f_t(I-A) &= f_j \\ f_t &= f_j(I-A)^{-1} \end{aligned} \qquad (۵)$$

که j: فعالیت اقتصادی مورد نظر، n: تعداد فعالیت‌های اقتصادی در اقتصاد و i: نماینده رشته فعالیت‌های اقتصادی است. پس عنصر iام از کل f_t بردار ضریب مقدار کل (مستقیم و غیرمستقیم) آب در هر واحد استفاده نهایی از کالای بخش iام است. با ضرب‌کردن این ماتریس در میزان کل تولید می‌توان به‌مقدار تجارت آب مجازی دست‌یافت. از جمله مطالعاتی که از این رهیافت برای محاسبات آب مجازی خود استفاده کردند می‌توان به Liao et al. (2019); Feng et al. (2019); (2018); lu et al. (2019) و Honga et al. (2019) اشاره کرد.

برای محاسبه کل آب مصرفی در تولید برق در هر نوع نیروگاه می‌توان از روش SPA[۴] (Feng et al., 2019) استفاده کرد. روش SPA یا روش تحلیل مسیر ساختاری که براساس تئوری تقریب سری قدرت بنا شده است، با تجزیه اثرات مستقیم و غیرمستقیم، انتقال محیطی را در فرآیند بالادست بررسی می‌کند (Honga et al., 2019). این روش از گسترش رابطه (۶) به‌دست می‌آید که همان رابطه اصلی رهیافت تعادل فراگیر (رابطه (۵)) است (Feng et al., 2019).

$$e = w(I - A)^{-1}Y \qquad (۶)$$

جمله‌های $(I - A)^{-1}$ در هر دو رابطه (۵) و (۶) یکسان است. e همان f_t است و w همان f_j است. تنها تفاوت دو رابطه، Y است که ماتریس کل تولید کدهای فعالیت‌های اقتصادی است. براساس رابطه (۶)، روش تحلیل مسیر ساختاری در قالب روابط (۷) و (۸) به‌صورت زیر گسترش می‌یابد.

$$e = w(I + A + A^{۲} + A^{۳} + \cdots)Y = wY + wAY + wA^{۲}Y \qquad (۷)$$

$$e = PL_{.} + PL_{۱} + PL_{۲} + \cdots \qquad (۸)$$

در سمت راست رابطه (۷) هر جمله به‌عنوان یک لایه از تولید درنظر گرفته می‌شود که در رابطه (۸)، PL[۵] نام‌گذاری شده است. لایه صفر در واقع آب مستقیم مورد استفاده در تولید و لایه‌های بعدی آب غیرمستقیم مورد استفاده در مراحل مختلف تولید است. e: کل آب مجازی، مجموع آب مستقیم و غیرمستقیم استفاده شده در فرآیند تولید کالا است. w: شدت آب مجازی برای تولید یک کالا، y: تقاضای نهایی برق و A: ماتریس ضرایب فنی است که در رهیافت تعادل فراگیر نیز از آن استفاده می‌شود.

در این مطالعه با توجه به داده‌هایی که در دسترس هستند از رهیافت فنی-پایه استفاده می‌شود. اما برای افزایش دقت محاسبات به‌جای استفاده از یک نسبت کسری که فقط آب مجازی لایه نهایی محیط تولید را نشان می دهد، از شاخص SPA برای محاسبه آب مجازی در زنجیره تولید برق نیروگاه استفاده می‌شود. پس از محاسبه کل آب مجازی در تولید برق در هر نوع نیروگاه با استفاده از روش تحلیل مسیر ساختاری می‌توان لایه‌های تولید و میزان آب مصرف شده در هر لایه را جداگانه محاسبه و مورد بررسی قرار داد. تا این‌جا آب مصرفی هر نیروگاه براساس سوخت ورودی نیروگاه بررسی شده است. در ادامه به این سوال نیز پاسخ داده خواهد شد که با توجه با شرایط حال‌حاضر در نیروگاه‌های کشور به‌طور میانگین میزان مصرف آب برای تولید یک کیلووات ساعت برق در شبکه سراسری برق ایران چقدر است. برای این کار میانگین وزنی از میزان آب مصرف شده در هر نوع نیروگاه با توجه به نسبت برق تولیدی همان نوع نیروگاه به کل برق تولید شده در کشور محاسبه خواهد شد. در واقع این میانگین وزنی، میانگین آب مجازی به ازای هر کیلووات ساعت برق در کل شبکه برق کشور است (رابطه (۹)).

$$W_a = \frac{\sum E_i w_i}{\sum w_i} \qquad (۹)$$

که W_a: میانگین وزنی آب مصرف‌شده در نیروگاه‌هایی که برق آن‌ها وارد شبکه سراسری برق شده است، E_i: میزان برق تولید شده در نیروگاه نوع iام و w_i: نسبت برق تولید شده توسط همه نیروگاه‌های نوع i به کل برق وارد شده به شبکه برق سراسری است.

در ادامه نیز مطابق رهیات فنی-پایه تجارت برق از دیدگاه آب مجازی مورد بررسی قرار می‌گیرد. با استفاده از این روش شبکه تولید برق به‌صورت یک‌پارچه بررسی و تجارت برق ایران تحلیل می‌شود. با مقایسه قیمت برق و هزینه فرصت آب در صنعت، می‌توان درباره توجیه‌پذیری صادرات برق ایران از دیدگاه آب مجازی اظهارنظر کرد.

برای بررسی پیشینه تحقیق و مباحث نظری از روش کتابخانه‌ای برای جمع آوری اطلاعات استفاده شده است. داده‌های مربوط به میزان واردات و صادرات برق ایران، انواع نیروگاه‌های موجود در کشور و میزان آب مصرفی طی فرآیند تولید برق در انواع نیروگاه‌ها از ترازنامه انرژی، بانک اطلاعات سری زمانی بانک مرکزی و مراجعه به مراجع آماری رسمی جمع آوری شده است. با توجه به‌روش مورد استفاده در این مطالعه، داده‌های مورد نیاز از بانک داده‌های سری زمانی بانک مرکزی و آمارنامه تفصیلی شرکت توانیر استفاده شده است. داده‌های شدت آب مصرفی نیز از مطالعه نصراللهی و رازعی (۱۳۹۶) که فعالیت‌های اقتصادی

ایران را به ۲۷ بخش تقسیم کرده و شدت آب هر بخش را جداگانه محاسبه کرده‌اند گرفته‌شده است. داده‌های مورد بررسی که مربوط به دهه گذشته است به‌جز در روش تحلیل مسیر ساختاری، چون از جدول داده ستانده استفاده شده به‌اجبار محاسبات محدود به سال ۱۳۹۵ است. بقیه داده‌ها نیز از آمارنامه تفصیلی شرکت برق برداشته شده است. در جدول ۱ خلاصه داده‌های استخراج شده از مطالعات خارجی آمده است. چون در ایران داده‌ای مبنی بر میزان آب مصرف شده در نیروگاه‌ها وجود نداشت، بیش از ۱۵ مطالعه خارجی مورد بررسی قرارگرفته و داده‌های مصرف آب در نیروگاه‌های خارجی استخراج شده است. سپس داده‌های نیروگاه‌هایی که تکنولوژی نزدیک‌تری به نیروگاه‌های ایران داشتند جدا شده و از آن‌ها به تفکیک سوخت مصرفی و سیستم خنک‌کننده، میانگین گرفته شده است که خلاصه آن در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

جدول ۱- خلاصه داده‌های استخراج شده از مطالعات خارجی مصرف آب در فرآیند تولید برق

نوع خنک‌کننده	سوخت مصرفی	مصرف آب (L/MWh)	میانگین L/Million KWh
گاز	یک بار گذر	۷۳۷,۹۰۰	۷۳۸
	برج خنک‌کننده	۱,۳۹۳,۱۰۰	۱,۳۹۳
میانگین		۱,۰۶۵,۵۰۰	۱,۰۶۶
گاز (سیکل ترکیبی)	یک بار گذر	۳۵۶,۵۰۰	۳۵۷
	برج خنک‌کننده	۸۵۸,۵۳۸	۸۵۹
میانگین		۶۰۷,۵۱۹	۶۰۸
نفت و فرآورده‌های نفتی	یک بار گذر	۷۵۵,۱۴۳	۷۵۵
	برج خنک‌کننده	۱,۴۷۵,۸۳۳	۱,۴۷۶
میانگین		۱,۱۱۵,۴۸۸	۱,۱۱۵
هسته‌ای	برج خنک‌کننده	۲,۳۷۱,۱۲۵	۲,۳۷۱
انرژی خورشیدی	-	۱۳,۰۰۰	۱۳
برقآبی	-	۱۲۲۴۴۶۶۷	۱۲۲۴۵

در مرحله بعد لایه‌های تولید مشخص شده است. لایه‌های مختلف تولید در صنعت برق ایران از ۸۹ بخش اقتصاد در جدول داده-ستانده استخراج شده است. زنجیره تولید در صنعت برق به چهار لایه تقسیم شده است. در لایه صفر نیروگاه‌ها درنظر گرفته شده و آخرین حلقه زنجیره تولید است. سه لایه بعدی آن به‌ترتیب از تولید، انتقال و توزیع برق، تعمیر و نصب و راه‌اندازی تجهیزات تا تولید سوخت و استخراج منابع و تولید ماشین‌آلات و در نهایت خدمات که بخش جدانشدنی در هر زنجیره تولید است مرتب شده است. تاثیر حلقه‌های دورتر کمتر درنظر گرفته می‌شود. در مرحله بعدی با استفاده از ضرب ماتریسی، میزان آب مصرف شده در هر حلقه جداگانه محاسبه شده است. ماتریس اول، ماتریس خطی $(1 \times n)$ شدت آب مجازی است که اعداد مربوط به هر لایه تولید در آن جایگذاری و مابقی درایه‌ها صفر گذاشته شده است. این ماتریس خطی در توان‌های ماتریس ضرایب مستقیم اقتصادی (nxn) ضرب می‌شود و حاصل آن که یک ماتریس خطی است در ماتریس تقاضای نهایی که یک ماتریس ستونی $(n \times 1)$ است ضرب می‌شود. حاصل این ضرب، یک عدد برای هر حلقه است که میزان آب مصرف آب آن حلقه را نشان می‌دهد. برای محاسبه لایه صفر که مصرف آب مستقیم است از نتایج روش فنی-پایه در محاسبات سال ۱۳۹۵ استفاده شده است. برای این‌که دید بهتری نسبت به نتایج به‌دست آمده در این محاسبات حاصل شود، کل آب مصرف شده در کشور در سال ۱۳۹۵ نیز از جدول داده ستانده استخراج شده‌است. برای این کار ماتریس سطری شدت آب در ماتریس ستونی تقاضا نهایی ضرب شده است.

۳- نتایج

ابتدا با استفاده از نتایج روش فنی-پایه، میزان آب صادر و وارد شده در قالب برق در دهه گذشته بررسی شده است. در جدول ۲ این خروجی‌ها به تفکیک آورده شده است. ابتدا میزان برق صادر و وارد شده از بانک اطلاعات سری زمانی بانک مرکزی استخراج شده و با استفاده از روش فنی-پایه، آب استفاده‌شده در تولید برق در صادرات و واردات به‌دست آمده است. در ستون انتهایی جدول درصد آب صادر و وارد شده از کل آب مصرف شده در تولید آورده

شده است. همان‌طور که مشخص است، بیشترین میزان آب صادر شده مربوط به سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ است که دلیل آن صرفاً افزایش صادرات نسبت به سال‌های دیگر بوده است.

جدول ۲- سری زمانی آب مجازی صادراتی و وارداتی در قالب برق در ایران

سال	واردات برق (میلیون کیلووات ساعت)	صادرات برق (میلیون کیلووات ساعت)	آب مجازی وارد شده (لیتر)	آب مجازی صادر شده (لیتر)	درصد آب مجازی به کل آب مصرف‌شده در تولید	
					در واردات	در صادرات
۱۳۸۸	۲،۰۶۸	۶،۱۵۲	۱،۲۹۸،۰۱۹	۳،۸۶۱،۶۰۹	۰.۵	۱.۴۸
۱۳۸۹	۳،۰۱۵	۶،۷۰۷	۱،۸۹۲،۵۸۱	۷،۵۰۹،۰۹۵	۰.۷۳	۲.۸۸
۱۳۹۰	۳،۶۵۶	۸،۶۶۸	۲،۲۹۴،۶۴۷	۹،۶۲۱،۸۶۲	۰.۸۶	۳.۶۱
۱۳۹۱	۳،۸۹۷	۱۱،۰۲۹	۲،۴۴۵،۹۰۸	۱۱،۲۸۴،۱۲۴	۰.۹۴	۴.۳۴
۱۳۹۲	۳،۷۰۷	۱۱،۵۸۶	۲،۳۲۶،۶۵۶	۱۱،۴۷۷،۱۳۶	۰.۹	۴.۴۲
۱۳۹۳	۳،۷۷۲	۹،۶۶۰	۲،۳۶۷،۴۵۳	۹،۰۱۹،۱۴۶	۰.۹۲	۳.۵۲
۱۳۹۴	۴،۱۴۸	۹،۸۸۰	۲،۶۰۳،۴۴۵	۹،۲۲۶،۸۰۶	۱	۳.۵۲
۱۳۹۵	۴،۲۲۱	۶،۶۸۷	۲،۶۴۹،۳۲۶	۶،۰۱۹،۹۴۵	۱.۰۲	۲.۳۱
۱۳۹۶	۳،۸۵۲	۸،۱۷۲	۲،۴۱۷،۷۲۷	۷،۵۰۷،۲۳۰	۰.۸۵	۲.۶۵

برای دستیابی به مصرف دقیق آب به‌ازای تولید یک کیلووات ساعت برق به این‌صورت عمل شد که ابتدا میزان کل مصرف سوخت‌های مختلف در فرآیند تولید برق در یک‌سال محاسبه شد. سپس با استفاده از اعداد استخراج شده در بخش اول محاسبات روش فنی-پایه، آب مصرفی به‌ازای سوخت‌های مختلف در مقدار سوخت ضرب و سپس در سهم هر نیروگاه از تولید برق ضرب شد. حاصل آن میانگینی وزنی از مصرف آب در صنعت برق کشور است که می‌توان نماینده مصرف آب به‌ازای تولید یک کیلووات ساعت برق باشد. جدول ۳ سهم تولید و مصرف آب نیروگاه‌های ایران را نشان می‌دهد. همواره نیروگاه‌های چرخه ترکیبی و بخاری به‌ترتیب بیشترین میزان برق را در بین همه انواع نیروگاه‌ها در ایران تولید می‌کنند. با توجه به داده‌های سال ۱۳۹۸ این میزان برای نیروگاه‌های چرخه ترکیبی ۳۹٪ از کل برق تولید شده در ایران و برای نیروگاه‌های بخاری ۲۸٪ است. این درحالی است که در همان سال میزان آب مصرفی این نیروگاه‌ها به‌ترتیب ۱۵/۵٪ و ۱۹/۵٪ بوده است که این میزان در مقابل نیروگاه‌های برقآبی که ۶٪ تولید و ۴۴/۳٪ آب را مصرف کرده‌اند بسیار پایین است. البته باید به این نکته توجه شود که نیروگاه‌های برقابی گاهی از ارتفاع آب ایجاد شده روی سدهایی که مصارف کشاورزی و صنعتی و شهری دارند بهره می‌گیرند و برق تولید می‌کنند. لذا کل آب مصرفی آن‌ها را نمی‌توان به مصرف برق تعمیم داد، ولی به‌هرحال تفکیک این بحث با داده‌های موجود امکان‌پذیر نبوده است.

جدول ۳- سهم تولید و آب مصرفی انواع نیروگاه‌ها

نیروگاه	سهم از تولید	سهم آب مصرفی
جمع نیروگاه‌های بخاری	٪۲۸	٪۱۹/۵
جمع نیروگاه‌های چرخه‌ترکیبی	٪۳۹	٪۱۵/۵
جمع نیروگاه‌های برق‌آبی	٪۶	٪۴۴/۳
جمع نیروگاه‌های گازی	٪۲۵	٪۱۷
جمع اتمی و تجدیدپذیر	٪۲	٪۴
جمع کل سال (میلیون کیلووات ساعت)	٪۱۰۰	٪۱۰۰

در این بخش ابتدا نتایج حاصل از روش تحلیل مسیر ساختاری آورده شده است. مصرف آب در هر لایه به تفکیک در جدول ۴ برحسب مترمکعب آمده و در ستون انتهایی جدول سهم هر لایه در مصرف آب زنجیره تولید برق به‌صورت درصد بیان شده است.

جدول ۴- خلاصه نتایج روش تحلیل مسیر ساختاری

حجم آب (مترمکعب)		مقدار محاسباتی	سهم هر لایه
آب کشور در سال ۱۳۹۵ (طبق جدول داده-ستانده)		۶۵,۱۹۵,۰۳۶,۰۰۲	--
آب مجازی صنعت برق به روش فنی پایه		۴۵۳,۹۲۰,۷۶۶	--
آب مجازی صنعت برق به روش SPA		۱,۱۸۹,۲۹۹,۲۲۳	٪۱۰۰
لایه صفر	مصرف مستقیم	۴۵۳,۹۲۰,۷۶۶	٪۳۸
لایه یک	تولید سوخت، نصب تجهیزات، توزیع برق	۲۱۸,۴۶۲,۱۳۴	٪۱۸
لایه دو	استخراج نفت و دغال سنگ، تولید تجهیزات و...	۱۵۳,۱۰۶,۹۹۱	٪۱۳
لایه سه	خدمات	۳۶۳,۸۰۹,۳۳۱	٪۳۱

پس از مقایسه اعداد به‌دست آمده در هر دو روش، این نتیجه حاصل می‌شود که آب ویژه مصرفی محاسبه شده به‌روش تحلیل مسیر ساختاری بیش از ۲/۶ برابر روش فنی-پایه است. این بدین معنی است که آب مصرف شده در فرآیند تولید برق ۱/۶ برابر آب مصرف شده در نیروگاه است. مصرف آب غیرمستقیم که در اکثر محاسبات و پژوهش‌ها درنظر گرفته نمی‌شود بسیار بیشتر از مصرف مستقیم آب است و از جمع این دو مقدار کل مصرف آب به‌دست می‌آید. از دید دیگری نیز می‌توان این اختلاف را نشان داد. اگر با استفاده از جدول داده-ستانده کل آب مصرف شده در کشور در سال ۱۳۹۵ محاسبه شود، این نتیجه حاصل می‌شود که آب مصرف شده در داخل نیروگاه‌ها برای تولید برق ۰/۷٪ از آب کل کشور در همان سال بوده، اما آب مصرفی کل زنجیره برق بیش از ۱/۸٪ از کل آب کشور بوده است. براساس محاسبات گفته شده به‌ازای هر کیلووات ساعت برق تولید شده در ایران بیش از چهار لیتر آب مصرف می‌شود. به بیان دیگر به‌ازای تولید هر میلیون کیلووات ساعت برق بیش از ۴۰۰۰ مترمکعب آب مصرف می‌شود. این عدد میانگین وزنی همه انواع نیروگاه‌ها و همه انواع تکنولوژی‌های موجود در کشور است. این محاسبات با درنظر گرفتن شاخص تحلیل مسیر ساختاری به‌عنوان روش محاسبه آب ویژه است. اگر به آب مصرف شده در داخل نیروگاه‌ها بسنده شود، به‌ازای هر کیلووات ساعت برق تولید شده در ایران ۱/۵ لیتر آب مصرف می‌شود.

فرضیه مورد بررسی در این مطالعه این بوده که "با توجه به هزینه فرصت آب در مصارف صنعتی در کشور، تولید برق و صادرات آن با نگاه پیوند آب و انرژی و آب مجازی صادر شده مقرون به‌صرفه نیست". در این بخش این فرضیه مورد آزمون قرار خواهد گرفت. در این دیدگاه تولیدات برحسب مصرف آب ویژه مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرند. پس در گام اول آب مصرف شده در تولید برق مورد نیاز است که در بخش‌های قبلی محاسبه شده است[۶]. نتایج محاسبات ۱/۵ لیتر در روش فنی-پایه برای داخل نیروگاه و ۴ لیتر در روش تحلیل مسیر ساختاری برای کل زنجیره تولید برق بوده است. در گام بعدی این مسئله بررسی می‌شود که میزان برق صادراتی چقدر بوده که آمار استفاده شده از بانک سری زمانی داده‌های بانک مرکزی ۶۶۸۷/۸ میلیون کیلووات ساعت است. در گام بعدی باید میزان درآمد دلاری به‌دست آمده از این فروش برق محاسبه شود. برای این‌کار از نرخ دلار مربوط به سال ۱۳۹۵ (سال انجام محاسبات جدول داده-ستانده) و نرخ دلار روز سامانه نیما در همین سال استفاده شده است. قیمت برق صادراتی که از همان سال تاکنون تغییری نداشته ۱۰ سنت به ازای هر کیلووات ساعت درنظر گرفته شده است. براساس داده‌های موجود درآمد ایران از فروش برق برحسب نرخ دلار در سال ۱۳۹۵ که ۳۶۰۰ تومان بوده است مبلغ ۲/۴ هزار میلیارد تومان و براساس نرخ دلار روز (۲۶۷۰۰ تومان)، ۱۷/۸ هزار میلیارد تومان است. براساس این محاسبه، ارزش اقتصادی آب نهفته در صادرات یک کیلووات ساعت برق در روش فنی-پایه و روش تحلیل مسیر به‌ترتیب ۳،۱۵۱،۴۴۰ و ۸،۴۰۳،۸۴۰ ریال است.

در گام آخر برای آزمون فرضیه باید ارزش آب صادراتی نهفته در قالب برق با ارزش اقتصادی آب در دیگر بخش‌های اقتصاد مقایسه شود تا بتوان به سوال اصلی این پژوهش پاسخ داد. برای این‌کار از مطالعات مختلف ارزش اقتصادی آب در صنعت، کشاورزی و شرب استخراج شده است. براساس مطالعات انجام شده در ایران ارزش اقتصادی آب در صنعت ۸۷،۳۴۷ ریال بر مترمکعب است. این مطالعه توسط تهامی‌پور و همکاران (۱۳۹۲) با روش باقی‌مانده انجام شده است و ارزش اقتصادی آب در صنعت با داده‌های شاخص قیمت مصرف‌کننده درگاه ملی آمار ایران برای سال ۱۳۹۵ و سال ۱۴۰۱ به‌روز شده است. حاصل ۱۱۹،۱۵۲ ریال بر مترمکعب برای سال ۱۳۹۵ و ۴۱۷،۲۲۴ ریال بر مترمکعب برای سال ۱۴۰۱ به‌دست آمده است. نتایج مقایسه نشان داد که در همه حالات و روش‌های مورد استفاده در این مطالعه ارزش آب

نهفته در برق صادراتی بیشتر از هزینه فرصت آب در صنعت است. این بدین معنی است که تولید برق صادراتی از دید آب مجازی نسبت به هزینه فرصت داخل کشور ارزش کمتری ندارد.

از سوی دیگر، در مطالعه‌ای تعزری و همکاران (۱۴۰۰)، با استفاده از توابع تولید، ارزش اقتصادی آب را به‌صورت میانگین برای محصولات اساسی مانند گندم، جو، چغندر قند، کلزا، گوجه‌فرنگی، ذرت علوفه‌ای و یونجه محاسبه کرده اند و براساس سناریوهای مختلف برای قیمت آب، ارزش اقتصادی محاسبه شده در کشاورزی ۱،۰۹۰ ریال بر مترمکعب به‌دست آمده است. این مطالعه نیز در سال ۱۴۰۰ انجام شده است و این عدد برای ۱۴۰۱ با نرخ تورم، ۳،۸۱۶ ریال بر مترمکعب است. ارزش اقتصادی آب آشامیدنی تصفیه‌شده خریداری شده نیز در مطالعه‌ای توسط تهامی‌پور و همکاران (۱۳۸۹) محاسبه شد که مبلغ ۱۲۵،۰۰۰ ریال به‌ازای هر مترمکعب است. اعداد استخراج شده به‌روز شده در این مطالعه برای سال ۱۴۰۱ معادل ۱،۲۸۱،۰۶۱ ریال بر مترمکعب است. پس ارزش اقتصادی آب در فرآیند تولید برق حتی از آب آشامیدنی نیز بالاتر است. در جدول ۵ داده‌های مربوط به ارزش اقتصادی آب آورده شده است.

جدول شماره ۵ : مقایسه ارزش اقتصادی آب در فرایند تولید و صادرات برق با سایر مصارف

بخش/سال		۱۳۹۲	۱۳۹۵	۱۳۹۹	۱۴۰۱ (به‌هنگام شده)
صنعت		۸۷،۳۴۷	۱۱۹،۱۵۲	۲۹۸،۵۹۸	۴۱۷،۲۲۴
کشاورزی		-	۱،۰۹۰	۲،۷۳۱	۳،۸۱۶
آب شرب		۲۶۸,۱۹۴	۲۶۸,۱۹۴	۹۱۶,۸۲۸	۱,۲۸۱,۰۶۱
برق	فنی-پایه	-	۹۰۰،۰۰۰	۲،۲۵۵،۴۱۸	۳،۱۵۱،۴۴۰
	SPA	-	۲،۴۰۰،۰۰۰	۶،۰۱۴،۴۴۸	۸،۴۰۳،۸۴۰

با توجه به ارزش اقتصادی بسیار بالای آب در تولید برق می‌توان به این نتیجه رسید که تولید و صادرات برق از دید آب مجازی برای آب‌های مرزی و آب های مازاد کشور مقرون به‌صرفه است و ارزش آب استفاده شده در تولید برق بسیار بالاتر از کشاورزی و صنعت و شرب است.

گفته شد که آب مجازی به‌ازای تولید یک کیلووات ساعت برق در ایران به‌روش فنی-پایه ۱/۵ لیتر و به‌روش تحلیل مسیر ساختاری ۴ لیتر محاسبه شده است. کل آب موجود در کشور در سال ۱۳۹۵ (سال پایه محاسبات)، بیش از ۶۵ میلیارد مترمکعب بوده است. مصرف آب ویژه برق ایران به‌روش فنی-پایه ۴۵۳ میلیون مترمکعب بوده که این بدین معنی است که حدود ۰/۷٪ از کل آب کشور در سال ۱۳۹۵ مستقیماً در نیروگاه‌ها برای تولید برق مصرف شده است. اما به‌روش تحلیل مسیر ساختاری در ۴ لایه فرآیند تولید برق مجموعا ۱،۱۸۹ میلیون مترمکعب آب مصرف شده است. این بدین معنی است که بیش از ۱/۸٪ از کل آب کشور در سال ۱۳۹۵ در فرآیند تولید برق دخیل بوده است. در لایه‌های تولید برق به‌ترتیب ۲۱۸ و ۱۵۳ و ۳۶۳ میلیون مترمکعب آب مصرف شده است. یعنی بعد از لایه صفر که مصرف مستقیم آب در نیروگاه‌ها بوده، بیشترین مصرف آب مربوط به بخش خدمات بوده است.

علاوه‌بر این، نیروگاه‌های برقآبی بیشترین مصرف آب را در بین نیروگاه‌های ایران دارد. بیش از ۴۴٪ مصرف آب نیروگاه‌های ایران مربوط به نیروگاه‌های برقآبی است. این درحالی است که تنها ۶٪ از کل تولید برق مربوط بی نیروگاه‌های برقآبی است. اگر ترکیب نیروگاه‌ها طوری عوض شود که به‌جای نیروگاه‌های برقآبی از نیروگاه‌های چرخه‌ترکیبی استفاده شود مصرف کل آب با همان میزان تولید در حدود ۴۰٪ کاهش می‌یابد. از کل آب مصرفی داخل نیروگاه‌ها که ۴۵۰ میلیون مترمکعب است، می‌توان بیش از ۱۸۱ میلیون مترمکعب آب را ذخیره کرد. البته توجه به این نکته ضروری است که این نتیجه‌گیری قابل تعمیم به هر منطقه نیست و در برخی مناطق با توجه به پتانسیل‌های آبی و مسائل اقتصادی، ساخت نیروگاه برقابی کاملاً منطقی و توجیه‌پذیر است. هم‌چنین نیروگاه‌های برقابی نسبت به نیروگاه‌های چرخه ترکیبی، آلودگی محیط‌زیستی بسیار کمتری دارد. لذا تحلیل ارائه‌شده صرفاً براساس بهینه‌سازی آب فرایند تولید است.

در این مرحله تغییر در ترکیب نیروگاه‌ها و در نتیجه آن تغییر در مقدار آب مصرفی کل تحلیل می‌شود. با توجه به داده‌های ارائه شده در جدول ۳، بیشترین مصرف آب و کمترین میزان تولید بعد از نیروگاه‌های اتمی و تجدیدپذیر مربوط به نیروگاه‌های برقآبی است. برای درک بهتر کارایی نیروگاه‌های مختلف از منظر آب مجازی شاخصی برای بررسی و مقایسه بهره‌وری نیروگاه‌ها از دیدگاه مصرف آب تعریف می‌شود. این شاخص نسبت تولید یک

نوع نیروگاه به مصرف آب همان نوع نیروگاه را به‌عنوان شاخص بهره‌وری نیروگاه از نظر مصرف آب نشان می‌دهد. در جدول ۶ نسبت تولید هر نیروگاه به آب مصرفی آن نیروگاه آورده شده است.

جدول ۶- نسبت تولید به آب مصرفی نیروگاه‌ها

انواع نیروگاه‌ها	نسبت تولید به آب مصرفی (کیلووات ساعت به لیتر)
بخاری	۱/۴۴
چرخه ترکیبی	۲/۵۲
برق‌آبی	۰/۱۴
گازی	۱/۴۷
اتمی و تجدیدپذیر	۰/۵

جدول ۶ نشان می‌دهد که به لحاظ مصرف آب، بیشترین بهره‌وری مربوط به نیروگاه‌های چرخه ترکیبی است که بیش از ۲/۵ برابر آب مصرفی خود، برق تولید می‌کند و همان‌طور که گفته شد کمترین بهره‌وری مربوط به نیروگاه‌های برقآبی است. در این بخش این مهم بررسی خواهد شد که درصورتی‌که نیروگاه‌های برقآبی و اتمی و تجدیدپذیر که کمترین بهره‌وری را از دیدگاه مصرف آب دارند حذف شوند و نیروگاه‌های چرخه ترکیبی جایگزین آن شود، میزان آب مصرفی چگونه تغییر خواهد کرد. مجموع نیروگاه‌های برقآبی و اتمی و تجدیدپذیر ۸٪ برق کل شبکه را تولید می‌کنند. از سوی دیگر این نیروگاه‌ها ۴۸/۳٪ از کل آب را مصرف می‌کنند. اگر نیروگاه چرخه ترکیبی جایگزین این نیروگاه‌ها شود، یعنی تولید این نیروگاه‌ها ۸٪ افزایش یابد، مصرف آب نیروگاه‌های چرخه ترکیبی ۳/۲٪ میزان فعلی افزایش پیدا می‌کند. این بدان معنی است که مصرف آب نیروگاه‌ها بیش از ۴۵٪ میزان مصرف آب فعلی یعنی ۵۳۶ میلیون مترمکعب کاهش پیدا می‌کند. درصورتی‌که کل نیروگاه‌های مورد استفاده در شبکه سراسری، به‌جز نیروگاه‌های سیکل ترکیبی از چرخه خارج شوند، میزان تولید این نیروگاه‌ها ۶۱٪ افزایش پیدا خواهد کرد. در مقابل مصرف آب کل، بیش از ۷۰۰ میلیون مترمکعب کاهش می‌یابد. این میزان، ۴۰٪ کل مصرف فعلی آب در فرآیند تولید برق و بیش از ۱٪ کل آب کشور در سال مورد بررسی است.

برای درک بهتر و بررسی دقیق‌تر و کمی تغییرات در ترکیب نیروگاه‌ها، سه سناریوی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. در سناریوی اول این حالت بررسی می‌شود که نیروگاه‌های اتمی و تجدیدپذیر از شبکه سراسری حذف شوند و نیروگاه‌های سیکل ترکیبی که بیشترین مقدار شاخص بهره‌وری آب را دارند جایگزین آن‌ها شوند. سناریوی دوم حالتی است که ۵۰٪ نیروگاه‌های برقآبی با توجه به سدسازی‌های بی‌رویه و مسائل مربوط به کم‌آبی از چرخه خارج شوند و نیروگاه‌های سیکل ترکیبی جایگزین آن شوند. سناریوی سوم جایگزینی ۵۰٪ از نیروگاه‌های گازی به‌جای نیروگاه‌های سیکل‌ترکیبی را مورد بررسی قرار می‌دهد.

- سناریوی اول: نیروگاه‌های اتمی و تجدیدپذیر ۲ درصد از برق شبکه را تولید و ۴٪ از آب کل شبکه را مصرف می‌کنند. اگر این نیروگاه‌ها از چرخه تولید خارج شوند، نیروگاه‌های سیکل ترکیبی باید تولید خود را ۲ درصد افزایش دهند. در مقابل میزان آب مصرفی آن‌ها ۰/۸٪ افزایش پیدا می‌کند. پس کل آب مصرفی به‌میزان ۱/۲٪ نسبت به قبل از تغییر در ترکیب نیروگاه‌ها کاهش پیدا می‌کند. لذا در این سناریو میزان ۱۴ میلیون و ۲۷۰ هزار مترمکعب آب صرفه‌جویی می شود.
- سناریوی دوم: نیروگاه‌های برقآبی ۶٪ از تولید کل شبکه و ۴۴٪/۳ از مصرف آب شبکه را دارند. اگر ۵۰٪ این نیروگاه‌ها از چرخه خارج شوند تولید آن‌ها ۳٪ کاهش می‌یابد و مصرف آب این نیروگاه‌ها به ۲۲/۲٪ کاهش پیدا می‌کند. اگر در ازای این کاهش در تولید، میزان تولید نیروگاه‌های سیکل ترکیبی ۳٪ افزایش یابد، مصرف آب این نیروگاه‌ها به‌میزان ۱/۲٪ افزایش می‌یابد. در مقابل مصرف آب کل به میزان ۲۱٪ کاهش می‌یابد. لذا در این سناریو نزدیک به ۲۵۰ میلیون مترمکعب در مصرف آب صرفه‌جویی می‌شود. این میزان آب، بیش از ۵۰٪ مصرف آب مستقیم در کل نیروگاه‌های شبکه سراسری برق است.
- سناریوی سوم: نیروگاه‌های گازی ۲۵٪ از سهم تولید و ۱۷٪ از کل آب را مصرف می‌کنند. اگر ۵۰٪ ظرفیت این نیروگاه‌ها با نیروگاه‌های سیکل‌ترکیبی جایگزین شود، یعنی تولید آن به ۱۲/۵ درصد و مصرف آن هم به ۸/۵٪ کاهش یابد. در ازای آن نیروگاه‌های سیکل ترکیبی تولید خود را به ۵۱/۵٪ شبکه برساند، میزان آب مصرفی این نیروگاه‌ها ۵٪ افزایش پیدا می‌کند. در این سناریو ۵۹/۵ میلیون مترمکعب آب در تولید برق صرفه‌جویی می‌شود.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که از دیدگاه همبست آب-انرژی و براساس تحلیل زنجیره تولید برق، به‌ازای تولید هر کیلووات ساعت برق در کشور حدود ۴ لیتر آب مصرف می‌شود که این میزان با تغییر ترکیب نیروگاه‌ها در مناطق مختلف با توجه به پتانسیل منابع آب قابل کاهش است. هم‌چنین، ارزش اقتصادی آب مجازی صادر شده در قالب برق، نسبت به هزینه فرصت آب در مصارف کشاورزی، شرب و صنعت به مراتب بالاتر است. لذا، صادرات برق با دیدگاه آب توجیه‌پذیر به‌نظر می‌رسد، اما با توجه به کمبود منابع آب در ایران صدور برق باید فقط از آب خروجی از مرزها در منطقه گیلان و مازندران، خوزستان و منطقه سیروان و گرمسیری باشد. البته باید توجه داشت که با توجه به کمبود منابع آب در فلات مرکزی و ضرورت تامین آب شرب به‌صورت ترجیحی، تامین آب ضروری شرب نسبت به صادرات آب در قالب برق حتی از مناطق مرزی، در اولویت است، مگر آن‌که آب‌های مذکور قابلیت مدیریت و انتقال و مصرف در داخل کشور نداشته باشد. علاوه‌بر این، در فرآیند تولید برق از طریق به‌روزکردن تکنولوژی مورد استفاده و تغییر ترکیب نیروگاه‌های متصل به شبکه سراسری، می‌توان بهره‌وری را افزایش داد. پیشنهاد می‌شود که این فرآیند تولید به‌سمت افزایش سهم نیروگاه‌های چرخه ترکیبی حرکت کند. با توجه به بررسی‌های انجام شده در سه سناریوی ارائه شده در بخش قبلی، میزان مصرف آب به‌طور قابل‌توجهی کاهش پیدا می‌کند.

در این مطالعه تلاش شد تا وضعیت آب‌بری صنعت برق و نیروگاه‌ها به تفکیک مراحل زنجیره تولید و هم‌چنین میزان آب مجازی نهفته در صادرات برق تحلیل و با هزینه فرصت‌های آن مقایسه شود. اما لازم به توضیح است که مهم‌ترین عدم قطعیتی که می‌تواند روی نتایج به‌دست آمده تاثیرگذار باشد، ناشی از مصرف آب ویژه نیروگاه‌ها و تغییرات آن است که در این مطالعه براساس تجارب گذشته و با اعمال اصلاحات و تعدیلات، بومی‌سازی شد. ولی جا دارد در مطالعات بعدی سایر محققین در داخل کشور، با سطح دقت بالایی محاسبه شود.

۵-پی‌نوشت‌ها

1- Organization for Economic Co-operation and Development (OECD)
2- Index of United Nation
3- Key World Energy Statistic
4- Structural path analysis
5- Production Layer

۶- محاسبات انجام شده برای شاخص تحلیل مسیر ساختاری نیازمند داده‌های جدول داده-ستانده بوده و آخرین و به‌روزترین جدول داده-ستانده مربوط به سال ۱۳۹۵ بوده است. لذا برای محاسبات این روش به عدد به‌دست آمده برای همین سال بسنده شده است. بدیهی است که از سال ۱۳۹۵ تاکنون تغییرات زیادی در این صنعت رخ داده است. اما امید است این پژوهش مسیر را برای محاسبات دقیق‌تر به‌صورت سری زمانی برای دستیابی به حالات بهینه‌تر در تولید برق و مصرف آب در ایران باشد.

۶- مراجع

باغستانی، ع.، مهرابی بشرآبادی، م.، زارع مهرجردی، م.، و شرافتمند، ح.، (۱۳۸۹)، "کاربرد مفهوم آب مجازی در مدیریت منابع آب ایران"، *تحقیقات منابع آب ایران*، ۶(۱)، ۳۸-۲۸.

تعذری، ن.، بنی‌حبیب، م.، هاشمی شاهدانی، م.، و حسنی، ی.، (۱۴۰۰)، "تعیین قیمت آب کشاورزی براساس معیارهای توسعه پایدار (مطالعه موردی: شبکه آبیاری قزوین)"، *اکوهیدرولوژی*، ۸(۲)، ۴۶۱-۴۷۳.

تهامی‌پور، م.، و عابدی، س.، (۱۳۹۶)، "ارزیابی تجارت آب مجازی در بخش صنعت استان زنجان"، *مجله آب و فاضلاب*، ۲۸، ۴۵-۳۶.

تهامی‌پور، م.، دشتبان فاروجی، س.، و جواهردهی، س.، (۱۳۹۶)، "ارزیابی تجارت محصولات صنعتی ایران با کشورهای مختلف از دیدگاه آب مجازی"، *فصل نامه اقتصاد و الگوسازی*، دانشگاه شهید بهشتی، ۸(۳۰)، ۱۴۳-۱۸۵.

تهامی‌پور، م.، زارع‌پور، ز.، و شاوردی، ع.، (۱۳۸۹)، "برآورد ارزش اقتصادی آب در مصارف شهری و روستایی استان خوزستان"، *اقتصاد کشاورزی و توسعه*، ۱۹(۷۶)، ۱۲۱-۱۴۲.

طیبی، م.، (۱۳۹۰)، "نگاهی به تولید و مصرف برق در جهان"، *مجله اقتصادی - ماهنامه بررسی مسائل و سیاست‌های اقتصادی*، ۱۱(۵)، ۱۱۳-۱۲۴.

عابدی، س.، (۱۳۹۹)، "حکمروایی آب و ارزیابی آثار آن بر تأمین امنیت آب و غذا"، *نشریه آب و توسعه پایدار*، ۷(۱)، ۱-۱۲.

عیسی‌پور، ع.، و عابدی، ش.، (۱۳۹۳)، "بررسی مصرف آب در نیروگاه‌های حرارتی و ارائه راه‌کارهای اصلاح الگوی مصرف"، شرکت برق منطقه‌ای تهران.

نصراللهی، ز.، و زارعی، م.، (۱۳۹۶)، "بررسی جریان‌های آب مجازی در اقتصاد ایران: تحلیل روابط بین بخشی آب با استفاده از رهیافت داده-ستانده"، *فصلنامه مدل‌سازی اقتصادسنجی*، ۲(۴)، ۱۳۱-۱۵۷.

محمدجانی، ا.، یزدانیان، ن.، (۱۳۹۳)، "تحلیل وضعیت بحران آب در کشور و الزامات مدیریت آن"، *فصلنامه روند*، ۲۱(۶۵ و ۶۶)، ۱۱۷-۱۴۴.

Chen, C., Lei, Y., Zeng, X., Huang, G., and Yongping, L., (2019), "Planning an energy-water-environment nexus system in coal-dependent regions under uncertainties", *Energies*, 13, 208, https://doi.org/10.3390/en13010208.

FAO, (2014), *Water governance for agriculture and food Ssecurity, A FAO initiative to minimize its environmental impact and promote greener communications*, Availabel at : www. fao.org.

Feng, C., Tang, X., Jin, Y., Guo, Y., and Zhang, X., (2019), "Regional energy-water nexus based on structural path betweenness: A case study of Shanxi Province, China", *Energy Policy*, 127, 102-112, https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.12.002.

Hasanzadeh, S.M., Baubekova, A., Gohari, A., Eslamian, S., Klove, B., and Torabi H., (2022), "Optimization of water-energy-food nexus considering CO_2 emissions from cropland: A case study in northwest Iran", *Applied Energy*, Elsevier, 307(C), 118236, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118236.

Honga, J., Zhong, X., Guo, Sh., Liu, G., Qiping Shen, G., and Yu, T., (2019), "Water-energy nexus and its efficiency in China's construction industry: Evidence from province-level data", *Sustainable Cities and Society*, 48, 101-157. https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101557.

Larsen Andreas, M.D., and Drews M., (2019), "Water use in electricity generation for water-energy nexus analyses: The European case", *Science of the Total Environment*, 651, 2044-2058, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.045.

Liao, X., Zhao, X., Hall, J.W., and Guan, D., (2018), "Categorising virtual water transfers through China's electric power sector", *Applied Energy*, 226, 252-260, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.132.

Lu, L., Yongqin, D., Chen, C., Hua, D., Yi, L., and Yan, M., (2019), "Provincial virtual energy-water use and its flows within China: A multiregional input-output approach", *Resources, Conservation & Recycling*, 151, 86-104, https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104486.

Terrapon-Pfaff, J., Ortiz, W., Viebahn, P., Kynast, E., and Flörke, M., (2020), "Water demand scenarios for electricity generation at the global and Regional Levels", *Water*, 12, 2482, https://doi.org/10.3390/w12092482.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.