

Assessment of the Water Footprint of Large Industries in Zayandeh-Rud Watershed

Meysam Askari Jabarabadi¹, Nourollah Mirghafari^{1*}  and Jahangir Abedi-Koupai²

(Received: January 3-2025 ; Revised: January 29-2025 ; Accepted: March 1-2025)

1. Department of Environment, Faculty of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

2. Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

*: Corresponding author Email: mnorolah@iut.ac.ir

Abstract

The water footprint is an analytical tool that offers a better and more comprehensive view of how consumers or producers engage with freshwater consumption. Given the water crisis in the country, particularly in Isfahan Province, this study aims to estimate and compare the direct and indirect water footprints of several large industries, including Mobarakeh Steel, Iron Smelting, Refinery, and Power Plant, located in the Zayandeh River Basin. After identifying the desired objectives and study areas, as well as confirming the availability of the required data, information was gathered from the selected industries. Two methods were then utilized to aggregate the entire chain and the sum of steps to calculate the water footprint in the researched industries. According to the calculations, the direct and indirect water footprint in the iron smelting industry amounts to 196.9 cubic meters per ton of steel annually, of which 4.026 cubic meters is attributed to direct consumption and 17.5 cubic meters to indirect consumption. In a refinery, 18.80 liters of water are consumed directly and indirectly to produce one barrel of product (gasoline or diesel). Additionally, the direct and indirect water footprint of the Islamabad power plant is 1,198,320 cubic meters per terajoule, equating to 4.31 liters per kilowatt hour. The results of this study indicate that the indirect water footprint in the analyzed industries is equal to or exceeds direct water consumption, with both being equally significant. Finally, it is important to note that the results of this study can support decision-makers and policymakers in the industry, including those in the iron and steel, refinery, and power plant sectors, in managing their water footprint.

Keywords: Water footprint, Water management, Direct and indirect water consumption, Large industries

How to cite this article: Askari Jabarabadi, M., Mirghaffari, N. and Abedi Koopaei, J. 2025. Assessment of the Water Footprint of Large Industries in Zayandeh-Rud Watershed. *J. Water and Soil Sci.* 29(2):57-67. DOI: [10.47176/jwss.29.2.65831](https://doi.org/10.47176/jwss.29.2.65831)

Copyright © 2025 Askari Jabarabadi et al. Published by Isfahan University of Technology.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

ارزیابی ردپای آب صنایع بزرگ در حوضه آبریز زاینده‌رود

میثم عسکری جبار آبادی^۱، نوراله میرغفاری^{۱*}  و جهانگیر عابدی کوپایی^۲

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۱)

۱. گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

۲. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: mnorolah@iut.ac.ir

چکیده

ردپای آب یک ابزار تحلیلی است که دیدگاه بهتر و جامع‌تری از چگونگی ارتباط بین یک مصرف‌کننده یا تولیدکننده با مصرف آب شیرین ارائه می‌کند. با توجه به بحران آب در کشور و به‌خصوص استان اصفهان، هدف اصلی در این مطالعه، برآورد و مقایسه ردپای آب مستقیم و غیرمستقیم در برخی صنایع بزرگ شامل فولاد مبارکه، ذوب‌آهن، پالایشگاه و نیروگاه مستقر در حوضه آبریز زاینده‌رود است. بعد از تعیین اهداف مد نظر و زمینه‌های مورد مطالعه و نیز قابلیت دستیابی به داده‌های مد نظر، اطلاعات از صنایع منتخب جمع‌آوری شد. سپس از دو روش تجمیع کل زنجیره و حاصل جمع گام‌ها برای محاسبه ردپای آب در صنایع مورد مطالعه استفاده شد. با توجه به محاسبات انجام‌شده، مقدار ردپای آب به صورت مستقیم و غیرمستقیم در صنعت ذوب‌آهن، ۹/۱۹۶ مترمکعب به‌ازای یک تن فولاد در سال است که ۴/۰۲۶ مترمکعب آن مربوط به مصرف مستقیم و ۵/۱۷ مترمکعب آن مربوط به مصرف غیرمستقیم است. در پالایشگاه، برای تولید یک بشکه محصول (بنزین یا گازوئیل)، مقدار ۱۸/۸۰ لیتر آب به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم مصرف می‌شود. همچنین ردپای آب مستقیم و غیرمستقیم در نیروگاه اسلام‌آباد برابر با ۱۱۹۸۳۲۰ مترمکعب بر تراژول و یا به عبارتی ۴/۳۱ لیتر بر کیلووات‌ساعت است. نتایج این پژوهش نشان داد که میزان مصرف ردپای آب غیرمستقیم در صنایع مورد مطالعه، برابر و یا بیشتر از میزان مصرف آب مستقیم است و هر دو به یک اندازه اهمیت دارند. درنهایت گفتنی است که نتایج این پژوهش می‌تواند توسط تصمیم‌گیرندگان و سیاست‌گذاران در صنعت، از جمله صنایع ذوب‌آهن، پالایشگاه و نیروگاه برای مدیریت ردپای آب استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: ردپای آب، مدیریت آب، مصرف مستقیم و غیرمستقیم آب، صنایع بزرگ

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۴ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط به استناد صحیح به مقاله و با رعایت

شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



مقدمه

منابع آب هر کشور در سه بخش اصلی صنعت، کشاورزی و شرب به مصرف می‌رسد؛ اما این مقدار مصرف از منابع آب داخلی، کل نیاز آبی یک کشور در رابطه با الگوی مصرف آن‌ها را نشان نمی‌دهد. تا سال‌های گذشته، در عرصه‌های علمی و عملی مدیریت آب، توجه کمی به مقدار مصرف و آلودگی آب در کل زنجیره تولید و تأمین شده است؛ بنابراین اطلاعات زیادی در ارتباط با میزان مصرف و آلودگی آب، برای محصولاتی که در نهایت توسط مصرف‌کننده مصرف می‌شوند، وجود ندارد (۱۰).

بیشتر انسان‌ها، مصرف آب خود را به مصارف مستقیم آب نسبت داده و اطلاعی از آبی که روزانه به‌صورت غیرمستقیم مصرف می‌کنند، ندارند. هر غذایی که خورده می‌شود، هر لباسی که پوشیده می‌شود و هر کالایی که در طول روز استفاده می‌شود، در زنجیره تأمین خود، آبی فراتر از تصور بشر، مصرف کرده است. آبی که هر فرد به‌صورت مستقیم مصرف می‌کند، کمتر از سه درصد از کل آب مصرفی در طول شبانه‌روز است. بر اساس میانگین جهانی، هر فرد روزانه ۱۵۰ لیتر آب به‌صورت مستقیم و از طریق فعالیت‌های روزمره خود، مصرف می‌کند. درحالی‌که آب مصرفی به‌صورت غیرمستقیم و به‌واسطه مصرف کالاها، حدود ۵۰۰۰ لیتر در روز است. در حقیقت، آبی که در فرایند تولید این کالاها استفاده شده است، نیز باید در زمره آب مصرفی هر فرد قلمداد کرد (۲۳).

مشکلاتی از قبیل محدودیت آب قابل‌دسترس، الگوهای نامناسب شهرنشینی، توزیع غیریکنواخت آب در سطح کشور و مراکز سکونتگاهی و همچنین نوع و شیوه تولید محصولات زراعی از منظر سازگاری با اقلیم، تأمین آب قابل‌دسترس در بسیاری از مناطق کشور را با مشکل مواجه ساخته و ابعاد این مشکل به‌تدریج گسترده شده است (۲۲). از جمله آثار و پیامدهای جدی بحران کمبود آب، می‌توان به آلوده‌شدن منابع آب ناشی از ورود پساب‌های صنعتی، شهری و کشاورزی، برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، افت سطح ایستابی آبخوان‌ها،

کاهش تغذیه و فرونشست زمین اشاره کرد که در تمام دشت‌های حوضه‌های آبریز کشور گزارش شده است (۱۸).

اصطلاح ردپای آب (water footprint) الهام‌گرفته از مفاهیم مشابه و متناظر در علوم محیط‌زیستی، صنایع و نیز سایر علوم مرتبط است. ریشه کلمه ردپا به‌عنوان یک معیار کمی، برای نشان‌دادن مقدار مصرف از منابع طبیعی توسط انسان به کار گرفته می‌شود. در واقع ردپای آب یک معیار برای نشان‌دادن آب شیرین مصرف‌شده است که مصرف مستقیم آب توسط یک مصرف‌کننده یا تولیدکننده و نیز میزان آب مصرفی غیرمستقیم در بخش‌های مختلف شامل صنعت، کشاورزی و بخش خانگی را در نظر می‌گیرد (۱).

این شاخص، علاوه بر داشتن ابعاد زمانی و مکانی، قادر است زنجیره تولید و مصرف را در فرایندهای متعدد بشری به‌صورت جامع در نظر گرفته و پایداری منابع آب را از دیدگاه‌های مختلفی همچون اقتصادی، محیط‌زیستی، عدالت اجتماعی و کارآمدی سیستم عرضه و مصرف منابع آب ارزیابی کند. شاخص ردپای آب را می‌توان مفهوم گسترش‌یافته آب مجازی دانست که توسط Allan (۱۹۹۷) معرفی شد و به‌عنوان راهکاری برای مدیریت آب در کشورهای مختلف خاورمیانه و آفریقا ارائه شده بود (۴).

بنابراین، ردپای آب دیدگاه بهتر و جامع‌تری از چگونگی ارتباط بین یک مصرف‌کننده یا تولیدکننده با مصرف منابع آب شیرین ارائه می‌کند. تعریف ردپای آب یک محصول، مجموع آب شیرینی است که به‌صورت مستقیم و یا غیرمستقیم برای تولید آن محصول مصرف می‌شود. مقدار آن با لحاظ مصرف و آلودگی آب در تمام مراحل زنجیره تولید آن، برآورد می‌شود (۲).

تمام اجزای ردپای آب کل، به تفکیک زمان و مکان مشخص می‌شوند. در یک تعریف جامع، ردپای آب آبی (Blue water footprint) به مصرف منابع آب (آب‌های سطحی و زیرزمینی) در کل زنجیره تهیه یک محصول اشاره می‌کند. واژه مصرف مربوط به تلفات آب از پیکره‌های آب سطحی و زیرزمینی موجود در محدوده یک حوضه آبریز است.

ردپای آب را می‌توان در هر روز، ماه و یا سال اندازه‌گیری و بیان کرد که این امر بسته به سطح اطلاعات مورد نیاز ما دارد. ردپای آب محصولات همیشه به‌صورت حجم آب در واحد محصول بیان می‌شود. سپس حجم آب در هر قطعه از محصول یا تعداد قطعات اندازه‌گیری می‌شود. اگر ردپای آب فرایندها اندازه‌گیری شود، معمولاً به‌صورت حجم آب در واحد زمان بیان می‌شود. زمانی که این واحد بر واحدهای محصولات اندازه‌گیری شده در آن زمان تقسیم می‌شود، می‌توان آن را به‌صورت حجم آب در واحد محصول نیز بیان کرد (۸). محاسبه تخصصی ردپای آب تولید محصولات صنعتی، اولین بار در سال ۲۰۰۶ با مطالعه‌ای روی نخ آغاز شد. امروزه محاسبه ردپای آب برای محصولاتی از جمله غذاها و نوشیدنی‌ها، منسوجات پارچه‌ای و کاغذی و محصولاتی مانند رایانه و خودرو انجام می‌شود (۶).

بر اساس مطالعات انجام‌شده در دنیا، صنعت نساجی سومین صنعت پرمصرف آب در جهان است. به‌طور معمول به‌ازای تولید هر کیلو پارچه بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ لیتر آب مصرف می‌شود. مطالعه‌ای در رابطه با ردپای آب صنایع فرآوری نساجی پنبه در پنجاب پاکستان انجام شد که در این مطالعه ردپای آب تولید نساجی پنبه بررسی شد. نتایج این مطالعه نشان داد که ردپای آب دانه پنبه در پنجاب ۱۸۹۸ مترمکعب بر تن است. آب استخراج‌شده برای فرآوری نساجی حدود ۱۶۹ مترمکعب بر تن پارچه تمام شده است که تقریباً ۲۶ مترمکعب در تن مصرف می‌شود و مابقی به‌عنوان فاضلاب تخلیه می‌شود (۲۵).

طی یک مطالعه، روش‌ها و برآوردهایی که درباره آب مصرفی در تولید برق از نیروگاه‌های برق‌آبی که در مقالات مختلف بود، بررسی شد. نتایج این مطالعه نشان داد که مقدار خالص تخمین آب مصرفی اغلب کمتر از ۴۰ درصد از مقدار ناخالص آن برآورد شده است (۵).

برای انجام ارزیابی ردپای آب در بخش‌های مختلف، توصیه کلی آن است که هر دو ردپای آب مستقیم و غیرمستقیم در محاسبه‌ها لحاظ شود. با اینکه تمرکز مصرف‌کنندگان و شرکت‌ها

تلفات وقتی اتفاق می‌افتد که آب تبخیر می‌شود و به یک حوضه آبریز دیگر یا به دریا باز می‌شود و یا در بطن محصول گنجانده می‌شود. ردپای آب سبز (Green water footprint) به مصرف منابع آب سبز، یعنی بخشی از آب باران که تبدیل به رواناب شود، اشاره می‌کند. ردپای آب خاکستری (Gray water footprint) به آلودگی آبی توجه داشته که در اثر فعالیت‌های بشر از جمله فعالیت صنایع و یا فعالیت‌های کشاورزی به وجود می‌آید. همچنین ردپای آب خاکستری نشان‌دهنده میزان حجم آب شیرین مورد نیاز برای پذیرش بار آلاینده‌ها در منبع آبی است (۲).

ارزیابی ردپای آب یک ابزار تحلیلی برای کمک به درک ارتباط بین فعالیت‌های بشر و تولید محصول‌های مختلف است که کمبودها و آلودگی‌های آب را نشان می‌دهد. همچنین ارزیابی ردپای آب، ابزاری برای درک آثار مرتبط و فهم این مسئله است که چه باید انجام داد تا اطمینان حاصل شود که این فعالیت‌ها و تولید محصولات، سهمی در میزان مصرف ناپایدار آب ندارند (۳).

به‌طورکلی ارزیابی ردپای آب از چهار مرحله تشکیل شده است: ۱- تعیین اهداف و محدوده ۲- حسابداری ردپای آب ۳- ارزیابی پایداری ردپای آب ۴- سیاست‌گذاری و تنظیم عکس‌العمل‌ها. در واقع ارزیابی ردپای آب به ما کمک می‌کند تا بحث‌های مرتبط در هر دو بخش دولتی و خصوصی در مورد استفاده پایدار از آب، موضوع‌های اقتصادی و اجتماعی و نیز تخصیص عادلانه آب بررسی و توجه شود (۱۱).

هدف از ارزیابی ردپای آب، تحلیل این موضوع است که چگونه می‌توان مسئله کمبود و آلودگی آب را به فعالیت‌های بشر یا یک محصول خاص مرتبط کرد و همچنین، بررسی این مسئله که چگونه این فعالیت‌ها و محصول‌ها می‌توانند از دیدگاه آب پایدارتر باشند. برای تعیین این مسئله که قرار است کدام یک از مراحل ارزیابی ردپای آب انجام شود، در همان آغاز باید اهداف و دامنه بررسی، به‌طور شفاف مشخص شود (۱۹).

سالانه به دست آمد که به سه طریق شامل برداشت سطحی از رودخانه، چاه حریمی و کانال‌ها، از حوضه آبریز زاینده‌رود آب برداشت شده است. پس از محاسبه، مجموع مقادیر آب برداشتی هر صنعت طی ده سال با یکدیگر جمع شده و در شکل ۱ نشان داده شده است.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، حوضه زاینده‌رود در استان اصفهان و صنایع مرتبط اطراف آن از جمله ذوب‌آهن، فولاد مبارکه، پالایشگاه و نیروگاه است. حوضه فلات مرکزی ایران، دارای ۹ حوضه فرعی درجه دو است که یکی از آن‌ها حوضه آبریز گاوخونی است. حوضه آبریز گاوخونی با وسعتی معادل ۴۱۵۵۲ کیلومتر مربع و متوسط بلندمدت بارندگی سالانه ۱۲۰ میلی‌متر، بخشی از حوضه آبریز اصلی فلات مرکزی ایران را تشکیل داده است و شامل ۲۱ محدوده مطالعاتی است (۲۴). مصارف آب در حوضه گاوخونی شامل مصارف کشاورزی، صنعت، شرب و سایر مصارف شهری مانند فضای سبز و غیره است که توجه کمتری به آن‌ها شده است. متوسط برداشت از منابع آب سطحی و زیرزمینی به ترتیب ۹۷ و ۵۰ میلیون مترمکعب است (۱۷). حوضه آبریز زاینده‌رود یکی از حوضه‌های آبریز تحت تنش است. این حوضه از نظر اقلیمی خشک و متوسط ماهانه دما از ۳۰ درجه سانتی‌گراد در تابستان تا ۳ درجه در زمستان است. تأمین آب صنایع بزرگی مانند کارخانه‌های ذوب‌آهن، فولاد مبارکه، پالایشگاه، نیروگاه و ده‌ها صنعت بزرگ و کوچک دیگر به عهده این رودخانه است؛ بنابراین با توجه به تعداد زیاد مصرف‌کنندگان و بهره‌برداران و همچنین میزان زیاد برداشت آب از رودخانه، حوضه مطالعاتی از نظر کمیت و کیفیت منابع آب تحت فشار زیادی است (۱۶). میزان بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی این حوضه در سال آبی ۱۳۸۰-۱۳۸۱ بالغ بر ۲۹۷۴ میلیون مترمکعب بوده که تا سال آبی ۱۳۹۰-۱۳۸۹ به ۳۴۹۹ میلیون مترمکعب افزایش یافته است. همچنین بیش از ۵۰۰ میلیون مترمکعب از نیاز آبی استان

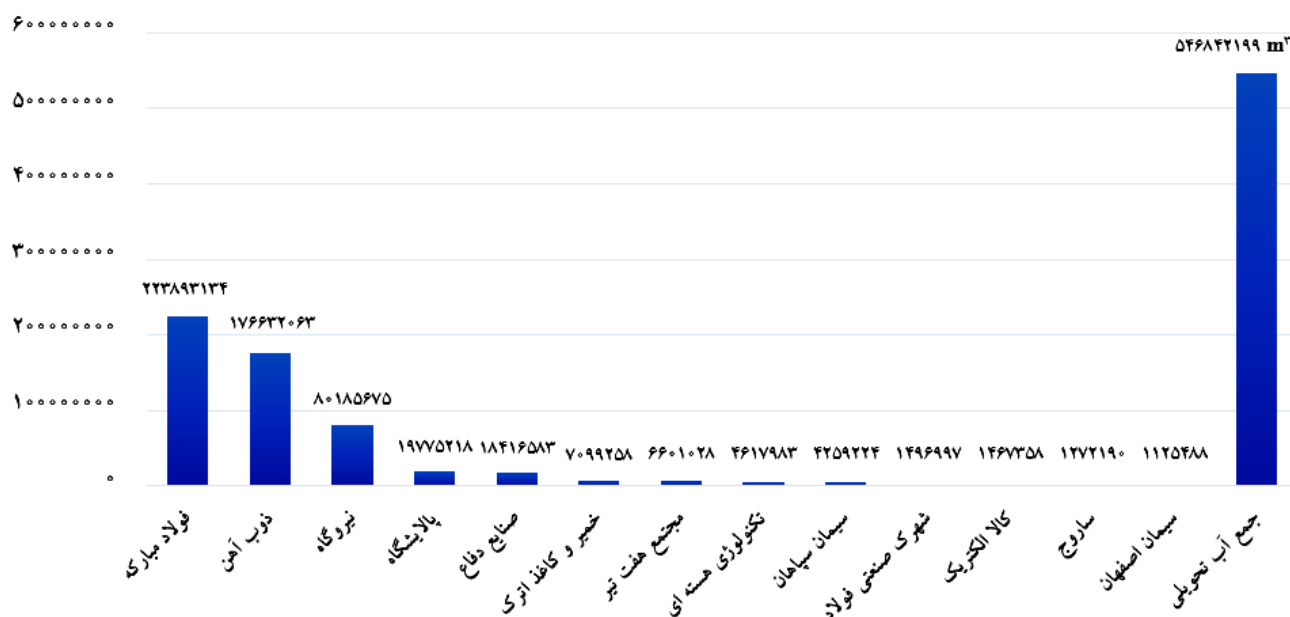
به‌طور معمول روی ردپای آب مستقیم است؛ ولی ردپای آب غیرمستقیم معمولاً مقادیر بزرگ‌تری را به خود اختصاص می‌دهد. وقتی تنها ردپای آب مستقیم در نظر گرفته می‌شود، مصرف‌کنندگان از این واقعیت غافل می‌شوند که بزرگ‌ترین بخش ردپای آب، مربوط به محصول‌هایی است که آن‌ها از فروشگاه‌ها و دیگر جاها خریداری می‌کنند و نه مربوط به آبی که آن‌ها به‌صورت مستقیم در منزل مصرف می‌کنند. برای بیشتر فعالیت‌ها، ردپای آب در زنجیره تأمین آن‌ها، بسیار بزرگ‌تر از ردپای آب مربوط به فرایندهای خاص آن فعالیت است (۷).

استقرار صنایع مختلف با نیاز آبی زیاد و گسترش شهرک‌های صنعتی در اطراف زاینده‌رود، استان اصفهان را به قطب صنعتی کشور تبدیل کرده است. همچنین خشک‌شدن رودخانه زاینده‌رود، عدم تخصیص حقابه محیط‌زیست، تنش‌های اجتماعی، آلودگی محیط‌زیست و فرونشست زمین از جمله پیامدهای بهره‌برداری ناپایدار از منابع آب در این حوضه آبریز است (۱۸).

در این پژوهش مقدار آب مصرفی صنایع مختلف و مهم استان اصفهان از جمله فولاد مبارکه، ذوب‌آهن، پالایشگاه و نیروگاه در حوضه رودخانه زاینده‌رود بررسی شده است. در هر کدام از این صنایع، میزان مصرف آب مستقیم و غیرمستقیم در بخش تولید و سایر بخش‌های مد نظر محاسبه شده است. به‌طورکلی هدف از محاسبه و ارزیابی ردپای آب، ایجاد آگاهی در مورد حجم عظیم آب است که فرایندهای تولید و سبک زندگی ما به آن نیاز دارند که این مسئله با هدف ترویج استفاده منطقی و پایدار است.

انتخاب صنایع مورد مطالعه

جمع‌آوری اطلاعات و انجام مطالعه حاضر با محدودیت‌های متعددی همراه بوده است که از آن جمله می‌توان به عدم دسترسی کافی به منابع مرتبط با موضوع بحث، پراکندگی آمار و اطلاعات مفید و قابل بهره‌برداری در صنایع مد نظر اشاره کرد. با توجه به اطلاعات جمع‌آوری شده از شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان، میزان برداشت آب صنایع مختلف از حوضه آبریز زاینده‌رود (برحسب مترمکعب) در یک دهه اخیر (۱۴۰۰-۱۳۹۱)، به‌صورت



شکل ۱. میزان حجم آب سطحی برداشتی مستقیم و آب برداشتی از کانال بر حسب مترمکعب (m^3)، تحویلی به صنایع استان اصفهان از حوضه آبریز زاینده‌رود طی دهه اخیر (۱۴۰۰-۱۳۹۱)، (شرکت آب منطقه‌ای اصفهان)

محاسبه ردپای آب

بعد از تعیین اهداف و جمع‌آوری اطلاعات از صنایع مورد مطالعه، قابلیت دستیابی به آن‌ها بر اساس داده‌های موجود سنجیده شده است. تعیین و محاسبه ردپای آب مستقیم یا غیرمستقیم، مشخص کردن محل قطع عملیات در طول زنجیره محاسبات و مقیاس زمانی و مکانی مطالعه و نیز تعیین سری داده‌ها، در این مرحله مشخص می‌شود. تعیین سطح و کیفیت داده‌های موجود یک گام اساسی برای تعیین کیفیت دستیابی به اهداف مد نظر است. بدین منظور، پس از بررسی و انتخاب صنایع آب‌بر در سطح استان و انتخاب چند صنعت عمده، با توجه به اطلاعات به‌دست‌آمده از جمله میزان برداشت آب، میزان هدررفت آب و نسبت میزان آب مصرفی هر واحد صنعتی (برحسب مترمکعب در سال) به میزان تولیدات آن صنعت (برحسب تن در هر سال)، می‌توان مقدار آب مصرفی هر واحد صنعتی (برحسب مترمکعب بر تن) در سال را محاسبه کرد. ردپای آب در یک منطقه جغرافیایی مشخص، بیان‌کننده

از منابع آب سطحی این حوضه تأمین می‌شود. در چند سال اخیر، مجموع آب ورودی به زاینده‌رود ۱۴۹۲ میلیون مترمکعب است که از این مقدار معادل ۳۸۴ میلیون مترمکعب به سبب ورود از تونل‌های دوم کوه‌رنگ، چشمه‌لنگان و خدنگستان که با سرمایه‌گذاری دولت ساخته شده‌اند، متعلق به دولت است (۲۷).

رودخانه زاینده‌رود علاوه بر جاذبه تفریحی و فرهنگی، همواره نقشی مؤثر در پایداری محیط‌زیست، تأمین آب آشامیدنی، رونق کشاورزی و اقتصاد منطقه مرکزی کشورمان دارد. در دهه‌های اخیر به‌علت برداشت‌های غیرقانونی، انتقال آب از این حوضه به دیگر حوضه‌ها و استان‌ها، تراکم جمعیت و تا حدودی کاهش نسبی بارندگی‌ها در پایین‌دست در فصول گرم به‌ویژه تابستان، با خشکی مواجه شده است. در حال حاضر تعدادی از دشت‌های مهم این بخش از حوضه از نظر بهره‌برداری در حالت ممنوعه و ممنوعه بحرانی است. با توجه به موارد گفته شده، نیاز به یک مدیریت جامع و مبتنی بر حوضه آبریز است (۲۱).

برای محاسبه مقدار آب مصرفی سالیانه در پالایشگاه اصفهان، میزان ردپای مصرف آب مستقیم و آب غیرمستقیم در بخش‌های مختلف برای همه محصولات را با هم جمع کرده که ردپای آب مستقیم برای تهیه آب صنعتی برابر با ۳/۵۹۸/۷۴۵ مترمکعب در سال است. مقدار ردپای غیرمستقیم در این صنعت در جدول ۲ نشان داده شده است. همچنین مقدار تولید محصول در این صنعت برابر با ۱۴۵ هزار بشکه یا به عبارتی ۳۲ میلیون لیتر در سال است.

$$WCF = DWF + VWF \longrightarrow WCF = ۳۵۹۸۷۴۵ + ۳۴۲۸۵۳۸ = ۷۰۲۷۲۸۳ \text{ m}^3$$

طبق محاسبات انجام شده (مقدار آب مصرفی تقسیم بر میزان محصول تولیدشده)، به ازای تولید یک بشکه محصول (بنزین یا گازوئیل) در سال، ۹/۶۳ لیتر آب به صورت مستقیم مصرف می‌شود. همچنین مقدار ۱۸/۸۰ لیتر به ازای هر بشکه محصول، آب به صورت مستقیم و غیرمستقیم مصرف می‌شود.

برای محاسبه ردپای آب در نیروگاه اسلام‌آباد، ابتدا میزان ردپای مصرف آب مستقیم و غیرمستقیم در بخش‌های مختلف نیروگاه را با هم جمع می‌کنیم که مقدار ردپای آب مستقیم برای تهیه آب صنعتی برابر با ۷/۸۴۵/۰۰۰ مترمکعب در سال است. ردپای آب غیرمستقیم در جدول ۳ نشان داده شده است. همچنین مقدار تولید برق سالانه در این صنعت برابر با ۳۷۰۴۷۴۳ مگاوات ساعت در سال است.

$$WCF = DWF + VWF \longrightarrow WCF = ۷۸۴۵۰۰۰ + ۸۱۳۷۰۰۰ = ۱۵۹۸۲۰۰۰ \text{ m}^3$$

سپس طبق محاسبات انجام شده (مقدار آب مصرفی تقسیم بر میزان محصول تولیدشده)، مقدار ردپای آب مستقیم طی یک سال در نیروگاه حرارتی اسلام‌آباد، برابر با ۲۱۳۵۸۸ (m³/Tj) و معادل با ۲/۲۱ (lit/kwh) است. همچنین ردپای آب در بخش مستقیم و غیرمستقیم طی یک سال، برابر با ۱۱۹۸۳۲۰ (m³/Tj) و معادل با ۴/۳۱ (lit/kwh) است.

میزان حجم آب مصرفی در واحد زمان است (۱۳). برای محاسبه ردپای آب در این پژوهش، از معادله (۱) استفاده شده است:

$$WCF = DWF + VWF \quad (۱)$$

که در این معادله، WCF ردپای مصرف آب، DWF مقدار مصرف آب مستقیم و VWF مقدار مصرف آب غیرمستقیم را نشان می‌دهد. اطلاعات مورد نیاز از جمله میزان تولید محصول و میزان مصرف آب و تولید فاضلاب، از صنایع منتخب جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل شد. همچنین اطلاعات مربوط به میزان برداشت آب از حوضه زاینده‌رود از شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان تهیه شد.

نتایج و بحث

در بخش زیر اطلاعات به دست آمده از ردپای آب صنایع منتخب، به تفکیک بررسی و محاسبه شده است. این اطلاعات از ۴ صنعت مورد مطالعه از جمله ذوب آهن، پالایشگاه، نیروگاه و فولاد مبارکه جمع‌آوری شده و به محاسبه ردپای آب مستقیم و غیرمستقیم هر کدام از آن‌ها پرداخته شده است.

برای محاسبه مقدار آب مصرفی سالیانه در شرکت ذوب آهن، میزان ردپای مصرفی آب مستقیم و غیرمستقیم در بخش‌های مختلف را با هم جمع کرده که به این ترتیب ردپای آب در این صنعت در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین مقدار تولید محصول در این صنعت برابر با ۵۸۰۰۰۰۰ تن چدن و فولاد در سال است.

$$WCF = DWF + VWF \longrightarrow WCF = ۲۳۳۵۱۱۹۱ + ۶۶۴۸۰۴۲ = ۲۹۹۹۹۲۳۳ \text{ m}^3$$

که از این رابطه و با توجه به محاسبات مد نظر (مقدار آب مصرفی تقسیم بر میزان محصول تولید شده)، می‌توان نتیجه گرفت که به ازای تولید یک تن محصول در سال در بخش مستقیم، ۴/۰۲۶ مترمکعب آب و در بخش مستقیم و غیرمستقیم، ۵/۱۷ مترمکعب آب به ازای تولید یک تن محصول در سال مصرف می‌شود.

جدول ۱. ردپای آب مستقیم و غیرمستقیم در ذوب‌آهن اصفهان

ردپای آب غیرمستقیم (VWF)	مترمکعب در سال (m^3)	ردپای آب مستقیم (DWF)	مترمکعب در سال (m^3)
بخش فضای سبز صنعتی	۳/۰۶۶/۰۰۰	آب صنعتی برای تولید فولاد	۱۲/۰۰۰/۰۰۰
بخش فضای سبز اماکن	۱/۳۱۴/۰۰۰	آب صنعتی برای تولید چدن	۱۱/۳۵۱/۱۹۱
هدررفت آب	۲/۲۶۸/۰۴۲	—	—
مجموع ردپای آب سالانه	۶/۶۴۸/۰۴۲	مجموع ردپای آب سالانه	۲۳/۳۵۱/۱۹۱

جدول ۲. ردپای آب غیرمستقیم در پالایشگاه اصفهان

ردپای آب غیرمستقیم (VWF)	مترمکعب در سال (m^3)
برج‌های خنک‌کننده	۳/۲۶۰/۶۰۷
مصرف کارکنان	۱۳۶/۹۴۹
تحويل به پخش و خط لوله	۲۷/۱۲۹
بخش فضای سبز	۳/۸۵۳
مجموع ردپای آب سالانه	۳/۴۲۸/۵۳۸

جدول ۳. ردپای آب غیرمستقیم در نیروگاه اسلام‌آباد اصفهان

ردپای آب غیرمستقیم (VWF)	مترمکعب در سال (m^3)
برج‌های خنک‌کننده	۷/۶۰۰/۰۰۰
هدررفت آب	۵۳۰/۰۰۰
مصرف کارکنان	۴/۱۰۰
فضای سبز	۲/۹۰۰
مجموع ردپای آب سالانه	۸/۱۳۷/۰۰۰

به دلیل عدم دسترسی کامل به اطلاعات ردپای آب در صنعت فولاد مبارکه، فقط ردپای آب در بخش مستقیم این صنعت محاسبه شد. ردپای آب مصرفی مستقیم در فولاد مبارکه ۲۸/۱۲۱/۸۵۴ میلیون مترمکعب در سال است که از این میزان می‌توان نتیجه گرفت که به‌ازای تولید یک تن محصول فولاد مبارکه در سال، ۴/۰۱۷ مترمکعب آب در بخش مستقیم مصرف می‌شود.

محاسبه ردپای آب برای تولید انرژی در ایران و سایر کشورها با مشکلاتی مواجه است و در بررسی علت آن گفته شده است که مقدار بهره‌برداری از منابع آبی با توجه به مناطق جغرافیایی مختلف و روش‌های گوناگون تولید انرژی، متفاوت

است. برای نمایش اهمیت موضوع ردپای آب در تولید انرژی می‌توان بیان کرد که توسعه پایدار آب و انرژی در مسائل صنعتی به‌صورت جدایی‌ناپذیر با یکدیگر در ارتباط هستند و بخش انرژی بعد از موضوع آبیاری در کشاورزی، دومین مصرف‌کننده منابع آبی در جهان است (۲۶). تقریباً هر مرحله در چرخه تولید و تأمین انرژی در روش‌های گوناگون، نیازمند آب است. مانند آب مصرفی برای حفاری و برش در اکتشاف نفت و گاز و یا حجم قابل توجه آب که برای فرایندهای خنک‌کاری در نیروگاه‌های برق حرارتی مصرف می‌شود (۱۴). نیروگاه‌های برق آبی یکی از منابع مهم تولید برق هستند و در حال حاضر

با توجه به محاسبات انجام شده در این پژوهش، مقدار مصرف ردپای آب به صورت مستقیم و غیرمستقیم در صنعت ذوب آهن ۹/۱۹۶ مترمکعب به ازای یک تن فولاد در سال است که ۴/۰۲۶ مترمکعب آن مربوط به مصرف مستقیم و ۵/۱۷ مترمکعب آن مربوط به مصرف غیرمستقیم است.

در حوزه تولیدات صنعتی، بخش عمده مصرف آب در زنجیره تولید یک محصول به صورت غیرمستقیم است. صنایع معمولاً مقدار آب تبخیر شده، آب وارد شده در فرایند تولید و یا سایر مصارف، به طور مستقیم اندازه گیری نمی شود؛ اما با توجه به تفاوت مقدار آب برداشت شده و پساب خروجی قابل محاسبه است که برای این منظور می توان از بانک های اطلاعاتی موجود استفاده کرد. این پایگاه های داده، فاقد جزئیات مصرف آب توسط هریک از فرایندها بوده و تنها به تفکیک واحدهای تولیدی، داده های مصرف را ارائه می دهند (۹).

باید به این نکته توجه داشت که بخش صنعت در جهان حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد و در ایران بین ۲ تا ۳ درصد مصرف آب را به خود اختصاص می دهد. روش محاسبه ردپای آب محصولات صنعتی، تقریباً تا حدودی مشابه محصولات کشاورزی است. شیوه های ساخت و استانداردهای تولید هر یک از محصولات صنعتی در کشورهای مختلف دنیا متفاوت است. در نتیجه با در نظر گرفتن روش های متنوع تولید و تفاوت در استانداردها، به همین میزان ممکن است از میزان آب متفاوتی در تولید یک کالای خاص استفاده شود که به دلیل این امر، میزان ردپای آب آن ها نیز از یک کشور به کشور دیگر و حتی از یک محصول به محصول دیگر متفاوت خواهد بود (۱۲).

نتیجه گیری

با توجه به اطلاعات به دست آمده و محاسبات انجام شده در زمینه ردپای آب صنایع مورد مطالعه در این پژوهش، نتایج به دست آمده شامل موارد مختلفی می شود که از جمله آن ها می توان به موارد زیر اشاره کرد:

حدود ۲۰ درصد برق جهان، توسط انرژی برق آبی تأمین می شود و حدود ۶۰ کشور در جهان بیش از ۵۰ درصد نیازهای برق خود را با استفاده از نیروی برق آبی تأمین می کنند (۱۵). در این نیروگاه ها، حجم زیادی از آب از سطح آزاد آن ها به صورت تبخیر از دست می رود؛ بنابراین اگر منابع آب در شرایط خاصی مانند خشکسالی یا تغییر اقلیم قرار گیرد، تولید برق در این نیروگاه ها با مشکل مواجه می شود (۲۰).

در بررسی نیروگاه های حرارتی در ایران، متوسط سالیانه ردپای آب در برق تولیدی از ۱۷ نیروگاه برق آبی در ایران، برابر $3694820 \text{ (m}^3/\text{Tj)}$ برآورد شد که معادل $13/30$ لیتر آب مصرفی به ازای هر کیلووات ساعت برق تولیدی است (۲۴). بر اساس محاسبات انجام شده در این پژوهش، مقدار ردپای آب مستقیم در نیروگاه اسلام آباد طی یکسال برابر با $588213 \text{ (m}^3/\text{Tj)}$ بوده است که این مقدار برابر با $2/21$ لیتر بر کیلووات ساعت است. همچنین مقدار ردپای آب مصرفی مستقیم و غیرمستقیم در نیروگاه اسلام آباد برابر با $1198320 \text{ (m}^3/\text{Tj)}$ و یا به عبارتی برابر با $4/31$ لیتر بر کیلووات ساعت است.

بر اساس یک مطالعه که روی ردپای آب در صنعت فولاد انجام شد، کمبود آب شیرین یک مشکل اساسی و مرتبط در سراسر جهان است. با توجه به افزایش فشار بر منابع آب شیرین، مصرف آب و آلودگی افزایش یافته است. همچنین ردپای آب و به دنبال آن ارزیابی ردپای آب، برای محیط زیست پایدار توسعه یافته است. نتیجه مطالعه آن ها بیشتر در مورد مؤلفه ها و مراحل ردپای آب، روش های مختلف مورد استفاده برای انجام مطالعه ردپای آب در صنعت و استفاده قابل توجه از ارزیابی ردپای آب در زنجیره تأمین فولاد بحث می کند (۲۷).

بر اساس استاندارد جهانی طبقه بندی صنایع (GICS)، صنعت فولاد سازی از بین ۱۳۰ صنعت مصرف کننده آب رتبه شانزدهم را از لحاظ شدت مصرف آب به خود اختصاص داده است. در نتیجه مدیریت صحیح مصرف آب در این صنعت با توجه به شرایط موجود و آثار آن بر محیط می تواند نقش مؤثری در حفظ کمیت و کیفیت منابع آبی ایفا کند.

دهند و به این ترتیب، ردپای آب را تا رسیدن به میزان آبی که در بطن محصول جای داده شده است، کاهش دهند.

۳- برای به دست آوردن اطلاعات کامل تر و دقیق تر در زمینه محاسبه ردپای آب در صنایع، لازم است تعداد بیشتری از صنایع انتخاب شوند؛ اما در هر پژوهش، باید روی یک صنعت تمرکز و به صورت جداگانه بررسی شود و اطلاعات جزئی تر و بخش های مختلف بیشتری بررسی و مطالعه شود. همچنین برای محاسبه ردپای آب در صنایع، بهتر است اطلاعات به صورت ماهانه و یا سالانه و نیز به صورت تفکیک شده در بخش های مختلف هر صنعت، محاسبه و بررسی شود.

۴- برای محاسبه ردپای آب در صنایع، بهتر است اطلاعات به صورت ماهانه و یا سالانه و نیز به صورت تفکیک شده در بخش های مختلف هر صنعت، محاسبه و بررسی شود. همچنین از جمله چالش های بعدی که باید در نظر گرفته شود، تحلیل پایداری ردپای آب و تدوین عکس العمل هایی برای کاهش ردپای آب است.

نتایج این پژوهش می تواند توسط تصمیم گیرندگان و سیاست گذاران در صنعت از جمله صنایع فولاد، ذوب آهن، پالایشگاه و نیروگاه استفاده شود. مطالعه حاضر می تواند گامی رو به جلو در پژوهش های منابع آب و موضوع ارزیابی ردپای آب باشد. همچنین باید خاطرنشان کرد که مسئولیت صحت اطلاعات و اعداد مورد محاسبه در این پژوهش، بر عهده صنایع مربوطه که اطلاعات از آنها گرفته شده است، می باشد.

مقدار مصرف ردپای آب مستقیم و آب غیرمستقیم در صنایع به یک میزان اهمیت دارد. در صنایعی که یک چرخه بسته آب دارند، هیچ گونه هدررفت بخار آب و پساب آلوده ای وجود نخواهد داشت. در بعضی از صنایع بزرگ مانند نیروگاه حرارتی، مقدار ردپای آب غیرمستقیم بیشتر از ردپای آب مستقیم است. برج های خنک کننده مستقر در صنایع، یکی از عوامل اصلی مصرف آب در بخش غیرمستقیم هستند. میزان ردپای آب مصرفی در نیروگاه اسلام آباد بین نیروگاه های دیگر در کشور، مقدار کمتری را دارد.

پیشنهادهای

۱- در گام اول در صورت وجود اطلاعات دسته بندی شده و مد نظر، باید بین روش های کاهش ردپای آب سبز، آبی و خاکستری تمایز قائل شد. برای این منظور باید اطلاعات مصارف آب در بخش های مختلف تولیدی هر کارخانه به صورت مجزا بررسی شود تا اطلاعات دقیق در هر قسمت از تولید را به دست آوریم.

۲- می توان با پیشگیری، بازچرخانی و تصفیه، میزان ردپای آب خاکستری را به صفر رساند. تنها برای آلودگی های حرارتی که حین استفاده از آب با هدف خنک کنندگی به وجود می آیند، امکان رساندن ردپای آب خاکستری به صفر وجود ندارد. اما این نوع آلودگی را نیز می توان تا حد زیادی با جمع آوری بخار آب کاهش داد و یا جلوی پیدایش آن ها را گرفت. با توجه به پتانسیل های موجود از نظر فنی، صنایع می توانند بازچرخانی کامل آب را انجام

References

1. Arabi, A., A. Alizadeh and S. Ney-Rizi. 2009. Investigating food security based on the concepts of virtual water exchange and ecological footprint of water (case study of Khorasan Razavi province). *Journal of Agricultural Ecology* 2(2): 1-12.
2. Aldaya, M.M. and A.Y. Hoekstra. 2010. The water needed for Italians to eat pasta and pizza. *Agricultural Systems* 103(6): 351-360.
3. Aldaya, M.M. and M.R. Llamas. 2008. Water footprint analysis for the Guadiana river basin, Value of Water Research Report Series No. 35, UNESCO-IHE, Delft.
4. Allan, J.A. 1997. Virtual Water: A long term solution for water short Middle Eastern economies. WaterIssues Group, School of oriental and African studies (SOAS), London.

منابع مورد استفاده

5. Bakken, TH.A. Killingtveit and K. Alfredsen. 2017. The Water Footprint of Hydropower Production— State of the Art and Methodological Challenges. *Global Challenges* 1(5): 1600018.
6. Chapagain, A.K. and A.Y. Hoekstra. 2007. The water footprint of coffee and tea consumption in the Netherlands. *Ecological Economics* 64(1): 109-118.
7. Chico, D., M.M. Aldaya and A. Garrido. 2013. A water footprint assessment of a pair of jeans: The in agricultural policies on the sustainability of consumer products. *Journal of Cleaner Production* 57(4): 238-248.
8. Chehergani, H. 2013. A brief report on the current status of the cement industry in the world and Iran. Mazandaran. Iran 2: 70-67.
9. Dehghan, H., M. Niksokhan and M. Ardestani. 2013. Estimating the virtual water of the catchment and its role in inter-basin water transfer systems. *Journal of Water Resources Engineering* 6(4): 114-120.
10. Ehsani, M. and H. Khaledi. 2002. Understanding and improving agricultural water productivity in order to ensure water and food security of the country. Seminar of the National Committee for Irrigation and Drainage, Tehran, Iran.
11. Gao, C., D. Wang, H. Dong, J. Cai, W. Zhu and T. Du. 2011. Optimization and evaluation of steel industry's water-use system. *Journal of Cleaner Production* 12(3): 14-25.
12. Gu, Y., J. Xu and A.A. Keller. 2015. Calculation of water footprint of the iron and steel industry: A case study in Eastern China. *Journal of Cleaner Production* 62(4): 274-281.
13. Horie, S., I. Daigo, Y. Matsuno and Y. Adachi. 2011. Comparison of Water Footprint for Industrial Products in Japan, China and USA. PP. 155-160. In: M. Finkbeiner (Ed), Towards Life Cycle Sustainability Management, Springer, Dordrecht.
14. Hightower, M. and S.A. Pierce. 2008. The energy challenge. *Nature* 45(7): 285-286.
15. Jangavar, H., Y. Noorollahi and A. Emami Meybodi. 2018. Economic and Environmental Analysis of the Small Hydropower Plants Development. *Ecohydrology* 4(4): 1255-1268.
16. Karimian, S., A. Chamani and M. Shams. 2010. Assessment of heavy metal pollution in the Zayandeh-Rood River as the only permanent river in the central plateau of Iran. *Environmental Monitoring and Assessment* 192(5): 316.
17. Land planning and strategic document for the development of Isfahan province. 2013.
18. Mohammadi, H. 2012. Effects of trade liberalization on the welfare of consumers and producers of agricultural products, virtual water exchange and resource sustainability. A case study in Fars province. *Agricultural Economics* 3(2): 1-16.
19. Mekonnen, M.M., P. Gerbens-Leenes and A.Y. Hoekstra. 2015. The consumptive water footprint of electricity and heat: A global assessment, Environmental science: *Water research and Technology* 1(3): 285-297.
20. Meldrum, J., S. Nettles-Anderson, G. Heath and J. Macknick. 2013. Life cycle water use for electricity generation: a review and harmonization of literature estimates. *Environment Letter* 8(1): 15-31.
21. Owaisi, F., A. Fattahi and M. List. 2019. Investigation of virtual water and ecological footprint of water in irrigated wheat crop of Isfahan province. *Journal of Water and Soil Sciences* 8(3): 78-99.
22. Pegram, G., S. Orr and C. Williams. 2009. Investigating shared risk in water: Corporate engagement with the public policy process, WWF, Godalming.
23. Radmanesh, F., M. Golabi, A. Akhundali and M. Niksokhan. 2019. Water footprint of electricity generated from Iranian hydroelectric power plants. *Journal of Ecohydrology* 6(4): 913-919.
24. Salemi, H. and N. Heydari. 2006. Study of land use planning and assessment of water resources and uses in the Zayandeh-Rud catchment. *Applied Research on Water Resources of Iran* 3(2): 72-76.
25. Sohail, A.N., A. Masood and N. Farah. 2018. Water footprint of cotton textile processing industries; a case study of Punjab, Pakistan. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology and Sciences* 46(2): 26-38.
26. Srinivasa Rao, Ch., R. Lal, J.V.N.S. Prasad, K.A. Gopinath, A.K. Sikka and S.M. Virmani. 2017. Investigating the water footprint of the steel industry in Sparks. *Advances in Agronomy* 17(8): 113-181.
27. Talebi-Soumeh-Saraei, M., M. Zakai, M. Fazeli and M. Jume-Pour. 2019. Sociology of a crisis; Social pathology of the water crisis in the Zayandeh-Rud catchment. *Interdisciplinary Studies in the Humanities* 11(4): 101-132.