



مدیریت آب و آبیاری (نشریه علمی)

دوره ۱۱ ■ شماره ۱ ■ بهار ۱۴۰۰

صفحه‌های ۳۰-۱۵

DOI: 10.22059/jwim.2021.313856.844

مقاله پژوهشی:

ارزیابی منابع آب حوضه آبریز زاینده‌رود با استفاده از شاخص‌های ردپای یکپارچه آب‌های سطحی

و زیرزمینی

سهیلا نجفی^۱، عباس روزبهانی^{۲*}، سامان جوادی^۲، سید مهدی هاشمی شاهدانی^۲

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲. دانشیار، گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۱۵

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۲۷

چکیده

به‌خطر افتادن کیفیت و کمیت منابع آب در سال‌های اخیر، امنیت غذایی، سلامت و گسترش جوامع را به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مورد تهدید قرار داده است. این مطالعه به بررسی هم‌زمان کمیت و کیفیت در منابع آب سطحی و زیرزمینی در بخش‌های کشاورزی و شرب حوضه آبریز زاینده‌رود، که علاوه بر مخاطرات مناطق خشک فلات مرکزی ایران با حساسیت‌های سیاسی و اجتماعی روبه‌رو است، می‌پردازد. در این پژوهش به‌کمک شاخص ردپای یکپارچه آب‌های زیرزمینی و هم‌چنین معرفی و توسعه شاخص ردپای یکپارچه آب‌های سطحی برای نخستین بار و با لحاظ کردن استانداردهای شولر و ویلکوکس برای آب‌های شرب و کشاورزی، وضعیت منابع آب در سال‌های آبی ۱۳۸۴-۸۵ و ۹۵-۱۳۹۴ ارزیابی شده است. میانگین شاخص ردپای یکپارچه آب زیرزمینی در سال ۱۳۸۴-۸۵ برای مصارف شرب و کشاورزی به‌ترتیب از ۸/۹ و ۱/۳، به ۷/۳ و ۱/۱ در سال ۹۵-۱۳۹۴ تقلیل پیدا کرده‌اند. هم‌چنین میانگین شاخص ردپای یکپارچه آب سطحی در سال ۱۳۸۴-۸۵ برای مصارف شرب و کشاورزی به‌ترتیب ۳/۸ و ۲/۴ به‌دست آمده و در سال ۹۵-۱۳۹۴ به‌ترتیب به ۳/۳ و ۲ رسیده و بهبود یافته‌اند. هرچند نتایج این دو سال بیان‌گر بهبود نسبی شرایط منابع آب در حوضه آبریز زاینده‌رود می‌باشند، اما فاصله زیادی به‌ویژه در بخش آب شرب از شرایط مطلوب دارند که نیازمند توجه جدی تصمیم‌گیرندگان و تدوین برنامه‌ای پویا برای توسعه پایدار این حوضه می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: حوضه زاینده‌رود، شاخص یکپارچه ردپای آب‌های زیرزمینی، شاخص یکپارچه ردپای آب‌های سطحی، منابع آب.

Evaluation of Water Resources in Zayandeh Rood Basin Using Integrated Surface and groundwater Footprint Indices

Soheila Najafi¹, Abbas Roozbahani^{2*}, Saman Javadi², S. Mehdy Hashemy Shahdany²

1. M.Sc. Student in Water Resources Engineering, Department of Water Engineering, Aburaihan Campus, University of Tehran, Tehran, Iran.

2. Associate Professor, Department of Water Engineering, Aburaihan Campus, University of Tehran, Tehran, Iran.

Received: November 17, 2020

Accepted: March 05, 2021

Abstract

Declining the quality and quantity of water resources in recent years has threatened food security, health and the development of communities, especially in arid and semi-arid areas. The purpose of this study is to investigate the quantitative and qualitative conditions of surface and groundwater resources in the drinking and irrigation sections of Zayandeh Rood basin that faces political and social sensitivities in addition to the dangers of the arid regions of the Central Plateau of Iran. In this paper, using the integrated groundwater footprint (iGF) and for the first time integrated surface water footprint (iSF) indices as well as applying the Schoeller and Wilcox standards for checking quality of drinking and agricultural water, respectively, water resources status has been evaluated in 2006 and 2016. The average of integrated groundwater management index in Zayandehrud basin for drinking and irrigation purposes in 2006 is equal to 8.9 and 1.3, respectively and these values have decreased to 7.3 and 1.1 in 2016. Furthermore, in 2006 the average of integrated index of surface water footprint for whole basin in drinking and irrigation water were obtained 3.8 and 2.4, respectively and these values have improved to 3.3 and 2 in 2016. However, the results of these two years show a relative improvement in water resources in the Zayandeh Rood Basin, but they are far from acceptable conditions, especially in the drinking water sector, which requires serious attention of decision makers for developing of dynamic plans for sustainable development of this basin.

Keywords: Integrated ground water footprint, Integrated surface water footprint, Water resources, Zayandeh Rood basin.

مقدمه

مفهوم ردپای آب توسط Hoekstra and Hung (2002)

به جامعه علمی معرفی شد. ردپای آب یک محصول، حجم آب مصرفی در تمام مراحل تولید آن بوده و تخمین می زند که این محصول چه میزان به منابع آب شیرین فشار وارد کرده است (Hoekstra and Chapagain, 2007). مطالعات ارزیابی ردپای آب در سطح حوضه بسیار مهم و دارای نقشی اساسی در توسعه پایدار منابع آب شیرین به ویژه در مناطقی با اقلیم خشک و نیمه خشک هم چون ایران است.

ردپای آب دارای سه مؤلفه است سبز، آبی و خاکستری (Hoekstra, 2009). آب سبز در واقع همان رطوبت خاک و در دسترس گیاهان است. آب آبی شامل آب های سطحی و زیرزمینی و آب خاکستری نیز شامل پساب، منابع آب غیر متعارف و آب هایی که دارای آلودگی های مختلف هستند، می باشند (Rodriguez et al., 2021). بخش اعظمی از مطالعات به بررسی ردپای آب، به ویژه در محصولات کشاورزی، پرداخته و تنها تعداد محدودی از آن ها به مقدار منابع آب قابل دسترس توجه کرده اند (Gleeson and Wada, 2013).

شاخص نوینی که برای مطالعه پایداری، آسیب پذیری و تنش آبخوان ها استفاده می شود، مفهوم ردپای آب زیرزمینی^۳ است. شاخص ردپای آب زیرزمینی را می توان مساحت مورد نیاز برای بهره برداری پایدار از آب زیرزمینی یک آبخوان تعریف کرد (Gleeson and Wada, 2013). به عبارتی دیگر، ردپای آب زیرزمینی نشان دهنده مقدار مساحتی از منطقه مورد مطالعه است که با وجود بهره برداری از منابع آبی آبخوان، اکوسیستم و محیط زیست آن محدوده دچار تنش نشود (Chen et al., 2020). این شاخص سعی در آشکار ساختن استفاده بیش از حد از آب های زیرزمینی، با ارائه عینی مفاهیم به کمک نقشه هایی بر پایه داده های هیدرولوژیکی دارد. این شاخص مقایسه می کند که چه مقدار آب به سفره های آب زیرزمینی وارد و یا توسط انسان استفاده

افزایش روزمره جمعیت جهان و به دنبال آن رشد صنعت و کشاورزی، تبدیل به امری اجتناب ناپذیر شده به طوری که امنیت غذایی و همچنین تأمین پایدار آبی سالم و با کیفیت مناسب در بخش های شرب، صنعت و کشاورزی، تبدیل به دغدغه اصلی متخصصان و مسئولین منابع آب شده است. اولویت اصلی هر سیستم مدیریت منابع، مدیریت پایدار منابع هست. (Mays, 2007). پایداری منابع آب را می توان به عنوان توانایی استفاده از آب در مقادیر و کیفیت کافی از مقیاس محلی تا جهانی برای پاسخ گویی به نیازهای انسان ها و اکوسیستم ها در حال حاضر و آینده برای حفظ زندگی و همچنین محافظت از انسان در برابر خسارت های ناشی از بلایای طبیعی و انسانی و حفظ زندگی پایدار تعریف کرد (Mahdavi & Hosseini, 2020).

پژوهش گران متعددی روی شاخص های پایداری منابع آب مطالعه داشته اند از جمله (Jingwei et al., 2017) که پایداری حوضه های آبریز مناطق خشک شمال چین را به کمک شاخص تنش آبی WSI^۱ در دو سال ۲۰۰۳ و ۲۰۱۴ مقایسه کرد. این شاخص در سه سطح دسته بندی می شود که نشان دهنده کمبود آب، تنش متوسط و رشد تنش آبی است و در نهایت با استناد به افزایش تنش کمیت آب به دلیل تغییرات جمعیت و افزایش مصارف آبیاری، خطر عدم توسعه پایدار در منطقه مورد مطالعه را بیان کرد. (Maiolo and Pantusa, 2019) برای بررسی پایداری حوضه های آبریز و ارزیابی اثرات سیاست های انجام شده در حوضه، شاخص مدیریت پایدار منابع آب SWaM^۲ را به مدیران معرفی می کنند که از چهارچوب حقوقی اروپا در بخش منابع آب گرفته شده و شامل شاخص های پایه ای زیست محیطی، اقتصادی، اجتماعی و غیره است. همچنین این شاخص از مضامین فرعی، مضامین کلی و پایه های اصلی تشکیل و برای بررسی در سطوح ملی، حوضه ای و کوچک تر قابل اجرا می باشد.

کاربردی جهت احیا و تعادل‌بخشی آبخوان نجف‌آباد پرداخت. Charchousi and Papadopoulou (2019) به این موضوع اشاره کردند که جمع‌آوری داده‌ها و محاسبه پارامترهای کلیدی شاخص ردپای آب زیرزمینی، شامل تغذیه آبخوان، برداشت از آبخوان و زهکشی همراه با عدم قطعیت است و موجب ایجاد عدم قطعیت در مقدار نهایی شاخص ردپای آب زیرزمینی می‌شود. برای حل این مشکل به‌کمک روش شبیه‌سازی مونت کارلو، برای مطالعه آبخوانی در یکی از شهرهای یونان مرکزی استفاده کرد. Lin (2020) به‌کمک شاخص ردپای یک‌پارچه آب زیرزمینی اقدام به مطالعه آب‌های زیرزمینی کشور اتیوپی کرد و در نهایت موفق به پتانسیل‌یابی منابع آب‌های زیرزمینی این کشور برای ایجاد اراضی کشاورزی شد. این نتایج کمک بزرگی به تصمیم‌گیرندگان و مدیران منابع آب می‌کنند.

حوضه آبریز زاینده‌رود یکی از حساس‌ترین حوضه‌های آبریز کشور به لحاظ سیاسی و اجتماعی و اقتصادی است، به‌طوری‌که در حال حاضر علاوه بر تأمین آب اراضی کشاورزی، تأمین آب شرب در چهار استان (استان‌های اصفهان، یزد، چهارمحال و بختیاری و مرکزی) و همچنین تأمین آب بسیاری از صنایع بزرگ و کوچک به‌عهده این رودخانه است. متأسفانه در اثر بحران خشکسالی اخیر بخش زیادی از تالاب گاوخونی خشک شده و زندگی گیاهی و جانوری آن به‌شدت آسیب دیده است. تاکنون مطالعات بسیاری روی حوضه زاینده‌رود انجام شده است. Karimian *et al.* (2020) برای بررسی فلزات سنگین در رودخانه زاینده‌رود، به‌عنوان تنها رودخانه دائمی فلات مرکزی ایران، اقدام به مطالعه در منطقه ورزنه، یعنی جایی که رودخانه از میان شهر اصفهان گذشته و به تالاب گاوخونی می‌رسد، نمود. نتایج نشان می‌دهد میزان آرسنیک در رسوبات رودخانه در این منطقه ۳۱ برابر بیش‌تر از حد مجاز استاندارد ISQG^۴ و در جلبک‌ها غلظت آرسنیک بیش‌تر از آلوده‌ترین

می‌شود و چه مقدار باید برای اکوسیستم‌ها باقی بماند. همچنین این شاخص به تغذیه مجدد به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های پایداری توجه دارد. علاوه بر آن می‌تواند به عنوان یک ابزار مفید در مدیریت آب زیرزمینی به‌کار گرفته شود، زیرا تفسیری عینی از حجم منابع آب زیرزمینی ارائه می‌دهد (Gleason and Wada, 2013).

به‌منظور به‌کارگیری شاخص ردپای آب زیرزمینی به‌عنوان یک ابزار تصمیم‌گیری جامع برای مدیریت منابع آب، نقش حیاتی کیفیت آب‌های زیرزمینی نیز باید موردتوجه قرار گیرد. به همین منظور Kourgialas *et al.* (2018) شاخص دیگری به نام ردپای یک‌پارچه آب زیرزمینی به‌منظور اتخاذ رویکردی یک‌پارچه و بررسی هم‌زمان کمیّت و کیفیت آبخوان‌های جزیره‌ای در یونان، به‌وسیله ترکیب شاخص ردپای آب زیرزمینی با مؤلفه‌های بیان‌گر کیفیت آب زیرزمینی ارائه داد. پارامترهای کیفی مورد انتخاب، با توجه به مصرف غالب آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه، که در بخش شرب و خدمات توریستی بوده، نیترات و سولفات و کلر با حدود مجاز پیشنهادی سازمان بهداشت جهانی بوده است. سپس به‌کمک این شاخص محدوده‌هایی را که غلظت پارامترهای شیمیایی مذکور در آن‌ها بیش از حد مجاز بود، مشخص و پیشنهادهایی برای کاربری متناسب با میزان شاخص‌های ردپای آب زیرزمینی و ردپای یک‌پارچه آب زیرزمینی، از جمله تغییر الگوی کشت، ارائه کردند. Pérez *et al.* (2019) با تخمین مقدار برداشت از طریق مصاحبه و محاسبه مقدار تغذیه از بیلان منابع آب در هر واحد پاسخ هیدرولوژیکی، در نهایت مقدار ردپای آب زیرزمینی را در سیستم آبخوان‌های شمال کشور کلمبیا برآورد کردند. Tork (2020) از شاخص ردپای یک‌پارچه آب زیرزمینی در آبخوان نجف‌آباد برای یافتن محدوده‌هایی که غلظت پارامترهای شیمیایی در آن‌ها بیش از حد مجاز و نامناسب برای کاربری کشاورزی است، استفاده کرد. در نهایت به ارائه راه‌کارهای

شاخص IRWQIGC، نشان داد که کمترین مقدار شاخص که در طبقات به نسبت بد قرار می‌گیرد در قسمت‌های جنوب و جنوب شرق بوئین میاندشت و جنوب و جنوب غرب چهل‌خانه و نیز در قسمت‌های مرکزی دامنه-داران و جنوب چادگان قرار دارد. Salehian and Rahmani Fazli (2018) به بررسی پیامدهای محیطی ناپایداری منابع آب در حوضه آبریز زاینده‌رود طی سال‌های ۱۳۸۰ و ۱۳۹۲ پرداخت. روش‌های تحلیل تغییرات کاربری اراضی، تغییرات بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی و توزیع پرسش‌نامه، روش‌های مورد استفاده وی بوده است که نتایج نشان‌دهنده خطر جدی عدم پایداری در این حوضه می‌باشد.

هدف از پژوهش حاضر، بررسی شرایط کمیت و کیفیت منابع آب سطحی و زیرزمینی حوضه زاینده‌رود برای مصارف شرب و آبیاری، در سال‌های آبی ۸۵-۱۳۸۴ و ۹۵-۱۳۹۴ می‌باشد که به اختصار در مقاله با ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵ ذکر می‌شوند. آستانه‌های مجاز برای پارامترهای کیفی با توجه به استانداردهای شولر و ویلکوکس انتخاب شدند. برای این منظور شاخص یکپارچه ردپای آب استفاده شده است. این شاخص فقط برای آب‌های زیرزمینی ارائه شده و مورد استفاده است. لذا نوآوری مقاله حاضر، توسعه و به‌کارگیری شاخص یکپارچه ردپای آب، برای اولین بار در مطالعات آب‌های سطحی است. به کمک شاخص نوین ردپای یکپارچه آب‌های سطحی امکان مطالعه وضعیت کمیت و کیفیت منابع آب سطحی حوضه زاینده‌رود امکان‌پذیر می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه فلات مرکزی ایران دارای نُه حوضه فرعی درجه دو می‌باشد که یکی از آن‌ها حوضه آبریز گاوخونی است. حوضه آبریز گاوخونی با وسعتی معادل ۴۱۵۵۰ کیلومتر مربع

مناطق جهان است. غلظت سرب نیز با وجود کم‌تر بودن از حد استاندارد، از سایر رودخانه‌های ایران بیش‌تر است. شرایط برای عنصر کادمیوم و غلظت کلروفیل نیز وضعیت مشابهی دارد، لذا نتایج بیان‌گر خطر جدی برای رودخانه زاینده‌رود به‌عنوان مهم‌ترین منبع آب شیرین فلات مرکزی ایران می‌باشد. Rahpou *et al.* (2019) با دریافت داده‌های هفت ایستگاه هیدرومتری در طول رودخانه زاینده‌رود در سال ۱۳۸۵ و ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۴ از شرکت آب منطقه‌ای اصفهان، اقدام به بررسی ۱۲ پارامتر کیفی تأثیرگذار در وضعیت منابع آب، از جمله کاتیون‌ها و آنیون‌ها نمود. در نهایت با انجام خوشه‌بندی فازی توسط نرم‌افزار متلب^۹، دریافتند که در محدوده ایستگاه هیدرومتری پل چوم تا تالاب گاوخونی (واقع در محدوده مطالعاتی کوهپایه سگری)، تقریباً غلظت تمام پارامترهای شیمیایی برای مصرف شرب بیش از حد مجاز می‌باشد؛ در برخی نواحی این مقادیر حتی برای اهداف کشاورزی و صنعتی نیز نامناسب هستند. Torabipoudeh *et al.* (2020) با هدف بررسی روند تغییرات کیفیت منابع آب زیرزمینی در آبخوان‌های بالادست سد زاینده‌رود در بازه زمانی ۱۳۷۴ تا ۱۳۹۵ و بررسی کیفیت آب از نظر مصارف شرب و کشاورزی و ارزیابی شاخص IRWQIGC^{۱۰}، کاتیون‌ها، آنیون‌ها و عناصر سنگین و pH، SAR، TDS و EC را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج بیان‌گر این بود که در آبخوان‌های بالادست سد زاینده‌رود، طبق استاندارد کیفیت آب کشاورزی ویلکوکس، طبقه‌بندی آب آبیاری بیش‌تر در محدوده C2-S1 می‌باشد که S بیان‌گر میزان تبادل سدیمی و C نشان‌دهنده هدایت الکتریکی آب کشاورزی است که براساس دسته‌بندی حدود این دو پارامتر در چهار گروه از خوب به بد تعریف می‌شوند. هم‌چنین آب منطقه مطالعاتی از نظر شرب بیش‌تر در طبقات قابل قبول و خوب و میزان عناصر سنگین نیز در حد مجاز است. پهنه‌بندی نیترات و

زیرزمینی حوضه زاینده‌رود، در فلوجارت شکل (۲) ارائه شده است. براساس شکل (۲)، برای بررسی کمیّت و کیفیت منابع آب سطحی و زیرزمینی، در ابتدا می‌باید شاخص ردپای آب را در هر بخش سطحی و زیرزمینی، به تفکیک محدوده‌های مطالعاتی محاسبه کرد. Gleeson and Wada (2013) ردپای آب زیرزمینی را به صورت رابطه (۱) تعریف کرد:

$$GF = A \left(\frac{C}{R - E} \right) \quad (1)$$

طبق تعاریف ذکر شده در بخش مقدمه، شاخص ردپای آب بیان‌گر مساحت و لذا دیمانسیون آن L^2 و برحسب کیلومتر مربع می‌باشد، که در این رابطه C برداشت سالانه از آب‌های زیرزمینی، R مقدار تغذیه شامل نفوذ از بارندگی، ورودی از آبخوان مجاور، نفوذ از جریان‌های سطحی، زراعی، شرب و صنعت و E زهکشی آب زیرزمینی به رودخانه و در این مطالعه تبخیر از آبخوان نیز می‌باشد، که در جریان زیست‌محیطی رودخانه نقش دارد. لازم به ذکر است در مطالعات پیشین شاخص ردپای آب زیرزمینی مؤلفه تبخیر از آبخوان لحاظ نشده بود، که اینجا به عنوان تلفات، در کنار مؤلفه زهکشی، در نظر گرفته می‌شود. برای مقایسه نسبی شرایط آبخوان‌ها و همچنین وضعیت تنش در کمیّت آبخوان، شاخص ردپای آب زیرزمینی تقسیم بر سطح هر محدوده می‌شود. نسبت ردپای آب‌های زیرزمینی به مساحت منطقه آبخوان GF/A به‌عنوان شاخص تنش آب زیرزمینی تعریف شده و اگر:

- $GF/A > 1$ نشان می‌دهد که مصرف آب زیرزمینی ناپایدار است که می‌تواند بر دسترسی آب زیرزمینی تأثیر بگذارد.

- $GF/A \gg 1$ نشان می‌دهد که آبخوان بسیار ناپایدار است و اغلب تحت شرایط اقلیمی گذشته تغذیه شده است.

- نسبت $GF/A < 1$ نشان‌دهنده استخراج پایدار از آب‌های زیرزمینی است.

و متوسط بلندمدت بارندگی سالانه ۲۶۸ میلی‌متر، بخشی از حوضه آبریز اصلی فلات مرکزی ایران را تشکیل داده است و شامل ۲۱ محدوده مطالعاتی می‌باشد. حوضه آبریز رودخانه زاینده‌رود با ۱۶ محدوده مطالعاتی، بخشی از حوضه گاوخونی به حساب می‌آید و با مساحتی معادل ۲۶۸۶۴ کیلومتر مربع یکی از مهم‌ترین رودخانه‌های حوضه فلات مرکزی و اصلی‌ترین رودخانه حوضه آبریز گاوخونی محسوب می‌شود، که نقش بسیار مهمی در تأمین آب شرب، صنعت، کشاورزی و محیط زیست چندین استان در ناحیه مرکزی ایران ایفا می‌کند. رودخانه زاینده‌رود از ارتفاعات زاگرس و کوه‌های مرتفع زردکوه بختیاری سرچشمه می‌گیرد و پس از گذشت حدود ۴۰۰ کیلومتر مسیر رودخانه‌ای، در انتها به تالاب گاوخونی می‌رسد. حوضه زاینده‌رود یکی از حساس‌ترین حوضه‌های آبریز کشور به لحاظ سیاسی و اجتماعی و اقتصادی است، به طوری که در حال حاضر علاوه بر تأمین آب حدود ۲۰۰ هزار هکتار از اراضی کشاورزی، تأمین آب شرب بیش از پنج میلیون نفر در چهار استان (استان‌های اصفهان، یزد، چهارمحال و بختیاری و مرکزی) و همچنین تأمین آب صنایع بزرگی هم‌چون کارخانجات ذوب آهن، فولاد مبارکه، پالایشگاه، نیروگاه، پتروشیمی، پلی‌اکریل و ده‌ها صنعت بزرگ و کوچک دیگر به عهده این رودخانه است. لذا با توجه به میزان بالای مصرف‌کنندگان و بهره‌برداران و همچنین میزان بالای پساب برگشتی به رودخانه و یا آبخوان‌ها، به‌ویژه پساب‌های صنعتی و کشاورزی، حوضه مطالعاتی از نظر کمیّت و کیفیت منابع آب تحت فشار زیادی است. شکل (۱) نشان‌دهنده موقعیت حوضه زاینده‌رود و محدوده‌های مطالعاتی آن می‌باشد.

روش‌شناسی

مراحل بررسی وضعیت کیفیت و کمیّت آب‌های سطحی و

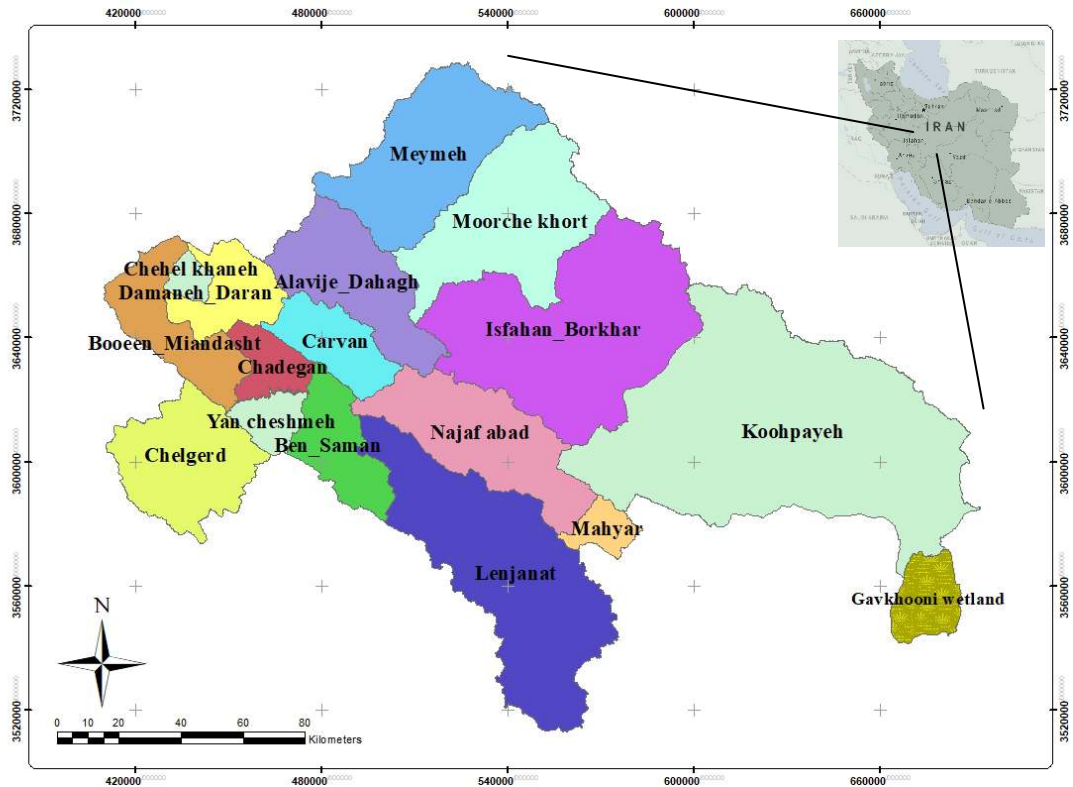


Figure 1. Location of the Zayandeh Rood basin and it's study areas

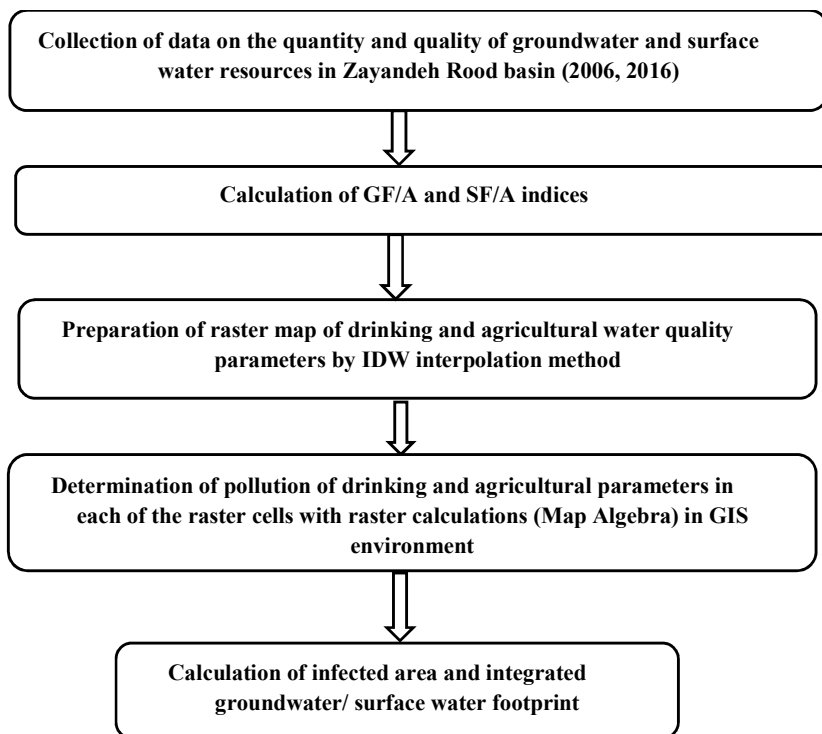


Figure 2. Research flowchart

هم‌چنین شاخص ردپای یک‌پارچه آب، به آب‌های سطحی نیز گسترش داده شده و دارای مفهومی کاملاً یکسان با شاخص مورد استفاده در آب‌های زیرزمینی است. برای بررسی کمیّت منابع آب، برآورد می‌شود به‌طور متوسط برداشت بالای ۲۰ درصد از منابع آبی تجدیدپذیر، فشار زیادی بر این منابع وارد می‌کند و برداشت بیش از ۴۰ درصد "شرایط بحرانی" به‌وجود می‌آورد (سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد-FAO 2011). بنابراین با لحاظ کردن آستانه بحران، رابطه شاخص کمیّت ردپای آب‌های سطحی^۸ نیز بدین صورت تعریف می‌شود:

$$SF = A \left(\frac{C}{0.4(R-E)} \right) \quad (3)$$

که در آن C برداشت سالانه از آب‌های سطحی، R مقدار آب ورودی و E تلفات می‌باشد. برداشت‌های سالانه شامل انتقال به حوضه مجاور، جریان‌های سطحی خروجی و مصارف در سه حوزه شرب، صنعت و کشاورزی می‌باشد. منابع تغذیه عبارتند از آب برگشتی از مصارف، مجموع جریان‌های سطحی و چشمه‌ها شامل مجموع رواناب‌های دشت و ارتفاعات، جریان‌های سطحی ورودی و آب‌های انتقالی به هر محدوده مطالعاتی. تلفات نیز مقدار تبخیر از سطح دریاچه در نظر گرفته شده است.

در مفهومی مشابه با شاخص یک‌پارچه آب زیرزمینی، برای بررسی جامع کمیّت و کیفیت آب سطحی محدوده‌های مطالعاتی، مقاله حاضر، با رویکردی نوین، شاخص یک‌پارچه ردپای آب سطحی^۹ را در رابطه (۴) معرفی و به‌کار گرفته است.

$$iSF = SF * \left(1 + n \left[CF_1 * \frac{A_1}{A} + \dots + CF_j * \frac{A_j}{A} \right] \right) \quad (4)$$

در این رابطه، iSF ردپای یک‌پارچه آب سطحی با دیمانسیون L^2 ، n تعداد آلاینده‌ها در سیستم آب سطحی است و همانند تعریف شاخص یک‌پارچه ردپای آب زیرزمینی، اگر غلظت یک آلاینده خاص (j) بالاتر از یک

برای بررسی هم‌زمان کیفیت و کمیّت منابع آب زیرزمینی نیاز به شاخص ردپای یک‌پارچه آب زیرزمینی^۷ می‌باشد که برای این منظور Kourgialas et al. (2018) شاخص ردپای یک‌پارچه آب زیرزمینی را مطابق رابطه (۲) ارائه کرده‌اند.

$$iGF = GF * \left(1 + n \left[CF_1 * \frac{A_1}{A} + \dots + CF_j * \frac{A_j}{A} \right] \right) \quad (2)$$

که در این رابطه iGF، ردپای یک‌پارچه آب زیرزمینی با دیمانسیون L^2 ، n برابر با تعداد آلاینده‌ها در سیستم آب زیرزمینی و CF_j عامل آلودگی برای انواع آلودگی (n, ...، j=1) در سیستم آب زیرزمینی است. اگر غلظت یک آلاینده خاص (j) بالاتر از یک آستانه مشخص باشد، CF_j برابر با ۱ (فعال)، در غیر این صورت به‌عنوان صفر (غیرفعال) خواهد بود. A_j (j=1 ... n) معرف میزان مساحت آلودگی با دیمانسیون L^2 ، در محدوده‌ای که غلظت آلودگی (j) بالاتر از آستانه است، می‌باشد. A نیز مساحت کل آبخوان با دیمانسیون L^2 می‌باشد. براساس رابطه (۲)، هرچقدر مساحت آلوده‌شده و تعداد آلاینده‌های موجود، بزرگ‌تر باشد شاخص ردپای یک‌پارچه آب زیرزمینی iGF بزرگ‌تر خواهد بود. همانند شاخص تنش ردپای آب زیرزمینی، برای بررسی وجود و یا عدم وجود تنش، شاخص ردپای یک‌پارچه آب زیرزمینی نیز بر مساحت هر محدوده تقسیم می‌شود. که در نهایت اگر:

- مقدار نسبت iGF/A مساوی یا بیش از یک نشان‌دهنده شواهدی از آلودگی است؛

- مقدار iGF/A بسیار بزرگ‌تر از یک باشد بیان‌گر آلودگی قابل‌توجه آبخوان هست؛

- مقدار iGF/A کم‌تر از یک نشان می‌دهد که آب زیرزمینی دارای کیفیت خوب است.

در این مطالعه برای قضاوت جامع در مورد کیفیت و کمیّت حوضه آبریز زاینده‌رود، شاخص ردپای آب و

مربوط به کمیت منابع آب، محاسبات کیفیت آب مورد توجه هستند. آستانه‌های مطلوب برای مصارف شرب حد بالای کیفیت "قابل قبول" استاندارد شولر^۱ و برای مصارف آبیاری نیز با توجه به ماهیت کشت‌های غالب این منطقه، استاندارد ویلکوکس^{۱۱} انتخاب و در جدول (۱) ذکر شده‌اند.

Table 1. Water quality thresholds for drinking and irrigation consumption

No.	Type	Standard	Parameter	Unit	Allowable threshold
1	Drinking	Schoeller	Na	meq/lit	10
2			Cl		10
3			SO ₄	7.35	
4			TH	mg/lit	500
5			TDS		1000
1	Irrigation	Wilcox	SAR	µmhos/cm	18
2			EC		5000

برای محاسبات کیفیت آب‌های بخش کشاورزی (اعم از سطحی و زیرزمینی)، موقعیت چاه‌های کیفی هر آبخوان همراه با جداول توصیفی که شامل مقادیر پارامترهای شیمیایی هر چاه می‌باشد، در محیط نرم‌افزار GIS^{۱۲} جانمایی شدند. سپس با درون‌یابی پارامترهای هدایت الکتریکی^{۱۳} و نسبت جذب سدیم^{۱۴} چاه‌های هر آبخوان، لایه‌های رستری ایجاد و پس از آن، با ابزار محاسبات ترسیمی قسمت‌هایی از هر آبخوان که غلظت پارامترهای کیفی مذکور، بیش از حد مطلوب بود، مشخص و در نهایت به لایه پلیگونی تبدیل شدند. بدین ترتیب مساحت‌های آلوده برای قرارگیری در روابط (۲) و (۴) به دست می‌آیند. برای بررسی کیفیت مناسب جهت مصارف شرب در آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی، با روشی متفاوت اعمال شد. متناسب با جای‌گیری نقاط برداشت نمونه‌های کیفی (در مطالعات آب‌های زیرزمینی، چاه‌های کیفی و در مطالعات آب‌های سطحی، ایستگاه‌های هیدرومتری مدنظر می‌باشند)، پلیگون‌های تیسن^{۱۵} ایجاد شد تا محدوده تحت تأثیر هر نقطه تعیین شود. پس از آن با

آستانه مشخص باشد، CF_j برابر با یک (فعال)، در غیر این صورت به عنوان صفر (غیرفعال) خواهد بود. A_j ($j=1 \dots n$) معرف میزان مساحت آلودگی با دیمانسیون L^2 در محدوده‌ای که غلظت آلودگی (j) بالاتر از آستانه است، می‌باشد. A نیز مساحت کل محدوده مطالعاتی با دیمانسیون L^2 می‌باشد. باید توجه داشت که iGF و iSF شاخص کیفی نیستند بلکه شاخصی یکپارچه و در واقع تلفیقی می‌باشند که اثر کمیت و کیفیت را به طور هم‌زمان بررسی می‌کنند و به دنبال آن به شفاف‌سازی اثرگذاری کمیت بر کیفیت منابع آب می‌پردازند. برای توضیح بیشتر، به عنوان مثال در آب‌های زیرزمینی، $GF/A \geq 1$ نشان‌دهنده تنش کمی منابع آب و همچنین بهره‌برداری ناپایدار از آبخوان می‌باشد. اما در مورد ردپای یکپارچه آب، هرگاه بزرگ‌تر یا مساوی یک باشد، آبخوان با تنش آبی مواجه است و/ یا دچار آلودگی شیمیایی و تجاوز پارامترها از حد استاندارد شده‌است. در مواردی که پارامترهای شیمیایی در حد مطلوب خود قرار دارند و مساحتی از محدوده مطالعاتی (یا آبخوان) آلوده نشده است، مقدار شاخص یکپارچه ردپای آب، برابر با شاخص ردپای آب می‌باشد.

داده‌های کمیت آب‌های سطحی و زیرزمینی سال ۱۳۸۵ از شرکت مدیریت منابع آب ایران، شرکت آب منطقه‌ای اصفهان و سایر سازمان‌ها دریافت و بخشی نیز از گزارش Ministry of Energy (2011) تحت عنوان گزارش جامع بیلان منابع و مصارف تا سال ۱۳۸۵ استخراج شدند، اما به دلیل عدم آماربرداری سراسری در سال ۱۳۹۵ و به دنبال آن عدم تدوین گزارش بیلان برای این سال، جهت محاسبه پارامتر شاخص ردپای آب سطحی، اقدام به جمع‌آوری داده‌ها از منابع مرتبط، کارشناسان خبره، گزارش‌های موجود در دفتر مطالعات شرکت مدیریت منابع آب ایران و همچنین شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان شد. پس از انجام محاسبات

نشان می‌دهد. غیر از محدوده کوهپایه-سگزی، در مابقی محدوده‌های مطالعاتی مقدار شاخص یکپارچه در بخش آبیاری برابر با مقدار کمیّت آن می‌باشد و بیان‌گر این نکته است که آن محدوده‌ها از نظر کیفیت آب آبیاری با توجه به استاندارد ویلکوکس (بررسی پارامترهای هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم) در وضعیت قابل قبولی قرار دارند و تنها کمیّت آب‌های سطحی موجب ایجاد تنش شده است. با توجه به جدول (۲)، در طی دوره مطالعاتی بیش‌ترین افت شاخص SF/A را محدوده لنجانات در نتایج محاسبات داشته و کمیّت و کیفیت مابقی محدوده‌ها بهبود یافته و یا تفاوت زیادی با نتایج سال ۱۳۸۵ نداشته‌اند. اما هنوز نیازمند مدیریت یکپارچه منابع آب و بهره‌برداری پایدار می‌باشند. افت شاخص‌های ردپای یکپارچه بخش‌های شرب و کشاورزی در محدوده لنجانات ناشی از افزایش شاخص SF/A در این محدوده می‌باشد که می‌توان به دلایلی هم‌چون کشاورزی مدیریت نشده از نظر الگوی کشت و بهره‌برداری و هم‌چنین وجود شرکت‌های ذوب آهن اصفهان، صنایع فولاد مبارکه و صنایع دفاع در این محدوده اشاره کرد. مقایسه نتایج نشان‌دهنده بهبود بسیاری از محدوده‌ها به‌ویژه علویجه-دهق است، که دلیل عمده آن تفاوت جریان سطحی خروجی از محدوده نسبت به جریان خروجی سال ۱۳۸۵ می‌باشد.

توجه به جدول توصیفی هر محدوده، حاصل جمع مساحت‌هایی که غلظت پارامترهای شیمیایی ذکرشده، در آن‌ها بیش از حد مطلوب بود، به فراخور در رابطه‌های (۲) و (۴) جای‌گذاری شدند. جهت بررسی روند تغییرات در طی دوره ۱۰ ساله، تمامی مراحل ذکرشده برای مطالعات آب‌های سطحی و زیرزمینی، به تفکیک مصارف شرب و آبیاری در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵ اجرا شدند.

نتایج و بحث

نتایج به‌دست‌آمده برای شاخص‌های ردپای آب زیرزمینی و ردپای یکپارچه آب زیرزمینی و هم‌چنین شاخص‌های ردپای آب سطحی و ردپای یکپارچه آب سطحی برای سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵، در جدول‌های (۲) و (۳) نمایش داده شده‌اند. با در نظر گرفتن آستانه بحرانی که سازمان خواروبار جهانی برای برداشت از آب‌های سطحی اعلام کرده (برداشت بیش از ۴۰ درصد از منابع آبی تجدیدپذیر موجب بروز شرایط بحران می‌شود)، متأسفانه تمامی محدوده‌ها در سال ۱۳۸۵ در شرایط بحران قرار داشته‌اند و در نتیجه این بحران در کمیّت منابع آب، وضعیت کیفیت منابع نیز تحت تأثیر قرار گرفته و در نهایت شاخص یکپارچه ردپای آب سطحی وضعیتی بحرانی را

Table 2. SF/A index & iSF/A index obtained for drinking and agricultural demand for years 2006 & 2016

Study area	2006			2016		
	SF/A	iSF/A (Drinking)	iSF/A (Agriculture)	SF/A	iSF/A (Drinking)	iSF/A (Agriculture)
Koohpayeh	1.82	27.0	5.0	1.6	24.4	4.9
Isfahan_borkhar	2.5	2.5	2.5	2.1	2.1	2.1
Moorche_khort	2.1	2.1	2.1	1.1	1.1	1.1
Alavije_dahagh	2.3	2.3	2.3	0.6	0.6	0.6
Meyme	2.5	2.5	2.5	1.5	1.5	1.5
Najaf_abad	2.4	2.4	2.4	1.9	1.9	1.9
Carvan	2.5	2.5	2.5	2.3	2.3	2.3
Mahyar	2.4	2.4	2.4	2.0	2.0	2.0
Lenjanat	1.20	1.20	1.20	2.53	2.53	2.53
Ben_saman	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Chadegan	2.4	2.4	2.4	1.2	1.2	1.2
Booeen_miasdasht	2.3	2.3	2.3	2.5	2.5	2.5
Chehel_khaneh	2.3	2.3	2.3	1.5	1.5	1.5
Damaneh	1.6	1.6	1.6	1.2	1.2	1.2
Yan_cheshmeh	2.4	2.4	2.4	2.6	2.6	2.6
Chelgerd	2.5	2.5	2.5	2.1	2.1	2.1
Average	2.2	3.8	2.4	1.8	3.3	2.0

جهت برآیند کلی از وضعیت کیفیت و کمیت منابع آب حوضه زاینده‌رود محاسبه شده است. Ministry of Energy (2016) در گزارش بیلان منابع آب سال ۱۳۹۰ بیان کرد که کیفیت آب به‌ویژه هدایت الکتریکی و باقیمانده املاح خشک در سرشاخه‌های زاینده‌رود مانند کوه‌رنگ و پلاسجان به دلیل وجود چشمه‌های متعدد ناشی از ذوب برف و انتقال آب از سرشاخه‌های رود کارون، عدم وجود سازندهایی با آلودگی‌های بی‌کانونی و هم‌چنین عدم تأثیر کودهای کشاورزی، دارای وضعیت مناسبی می‌باشند. با جریان رودخانه به سمت شرق (در جهت تالاب گاوخونی) تا محل سد زاینده‌رود بر میزان املاح افزوده است، به طوری که هدایت الکتریکی در ایستگاه پل چوم یعنی در محل ورود به محدوده کوهپایه-سگری، بسیار بالا رفته و این روند تا محل ایستگاه ورزنه در ورودی تالاب گاوخونی که شرایط کیفی بسیار نامناسب دارد، ادامه پیدا می‌کند. اگرچه میانگین iSF/A برای مصارف شرب و کشاورزی کل حوضه به ترتیب از $3/8$ و $2/4$ در سال ۱۳۸۵ به $3/3$ و 2 در سال ۱۳۹۵ بهبود یافته، اما هم‌چنان نشان‌دهنده وضعیت بد کیفیت آب در حوضه زاینده‌رود است، به طوری که حتی بهبود شاخص SF/A در این دو سال از $2/2$ به $1/8$ نمی‌تواند شرایط نامناسب کیفیت آب را تغییر دهد. نتایج شاخص ردپای آب سطحی و شاخص یکپارچه ردپای آب سطحی در شکل‌های (۳)، (۴) و (۵) آمده است.

تغییرات الگوی بارندگی پس از سال ۱۳۸۵ تفاوت‌های چشم‌گیری در وضعیت مصارف و برداشت‌های محدوده‌های مطالعاتی را که از مهم‌ترین عوامل محاسبه شاخص‌های ردپای آب سطحی و ردپای یکپارچه آب سطحی هستند، ایجاد کرد. محدوده‌های مهیار شمالی و نجف‌آباد نیز در مصارف کشاورزی کاهش داشت، به طوری که طبق گزارش بیلان سال ۱۳۸۵، مصارف آب سطحی در بخش کشاورزی

طبق گزارش Ministry of Energy (2016) در این محدوده با ایجاد بندهای خاکی و طرح‌های آبخیزداری جریان‌های سطحی و سیلابی کنترل و موجب کاهش زیاد جریان سطحی خروجی شده است. محدوده‌های کرون و چهل‌خانه نیز در شاخص‌ها بهبود داشته‌اند که طبق توضیحات دریافتی از شرکت آب منطقه‌ای اصفهان دلیل عمده آن در مورد محدوده کرون، کاهش مصارف آب‌های سطحی و در محدوده دیگر بهره‌برداری از تونل چشمه‌لنگان و شبکه وحدت‌آباد در نزدیکی این محدوده می‌باشد. در تمام محدوده‌های مطالعاتی غیر از لنجانان، یان‌چشمه و بویین میاندشت که به دلایل عمده برداشت بیش از حدمجاز و تغییرات تأثیرگذار در میزان جریان‌های سطحی ورودی و خروجی در طی دوره مطالعاتی در شاخص‌ها افت داشته‌اند، شاخص ردپای آب و در واقع کمیت منابع آب بهتر شده است. طبق مفهوم رابطه (۴)، تغییر در کمیت منابع آب سطحی موجب تغییر کیفیت و در نتیجه بهبود شاخص ردپای یکپارچه آب‌های سطحی در محدوده‌ها شده است. محدوده‌های مورچه‌خورت، علویجه و میمه فاقد ایستگاه هیدرومتری و طبق توضیحات کارشناسان شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان، متکی بر منابع آب زیرزمینی می‌باشند. بنابراین پایش کیفیت و بررسی کمیت منابع آب سطحی در آن‌ها حائز اهمیت نمی‌باشد. لذا طبق رابطه (۴)، iSF/A برابر با مقدار SF/A لحاظ می‌شود. در محدوده کوهپایه-سگری مقدار SF/A کاهش و به عبارتی بهبود یافته، این موضوع موجب تعدیل و بهبود شاخص ردپای یکپارچه آب سطحی نیز شده است. در نتیجه میزان بالای iSF/A در آب شرب و آب آبیاری ناشی از کیفیت بسیار بد آب این محدوده می‌باشد، که علت آن ورود پساب شهرک‌های صنعتی و زمین‌های کشاورزی این محدوده به منابع آب سطحی است. لازم به ذکر است میانگین کل حوضه، فقط

ارزیابی منابع آب حوضه آبریز زاینده‌رود با استفاده از شاخص‌های ردپای یک‌پارچه آب‌های سطحی و زیرزمینی

۲۷۵ میلیون مترمکعب تقلیل یافته‌اند، که این یکی از دلایل بهبود شاخص SF/A و در نتیجه بهبود شاخص iSF/A در این محدوده‌ها می‌باشد.

برای این محدوده‌ها به ترتیب ۱۰۸/۰۸ و ۳۲۲ میلیون متر مکعب بود، اما این مصارف در آخرین گزارش بیلان رسمی کشور یعنی گزارش بیلان سال ۱۳۹۰ به ترتیب به ۲۶۷ و

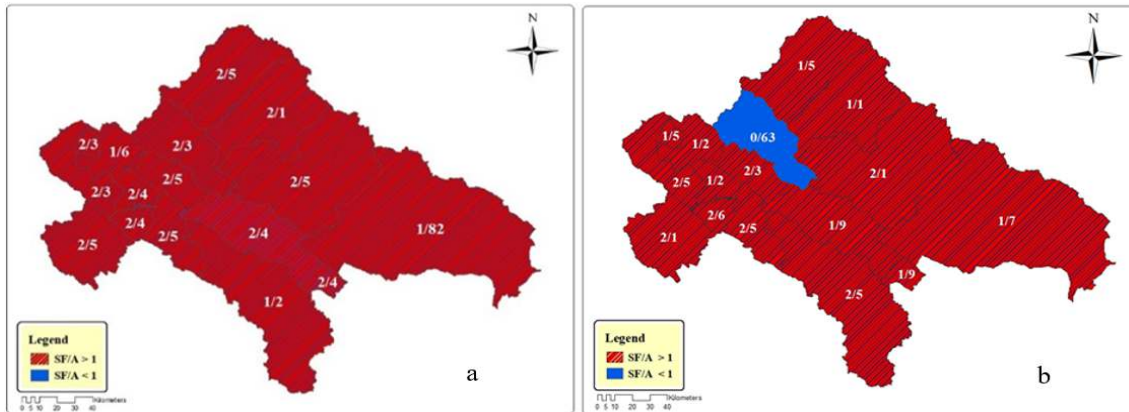


Figure 3. SF/A index of Zayandeh River basin at: a) 2006, b) 2016

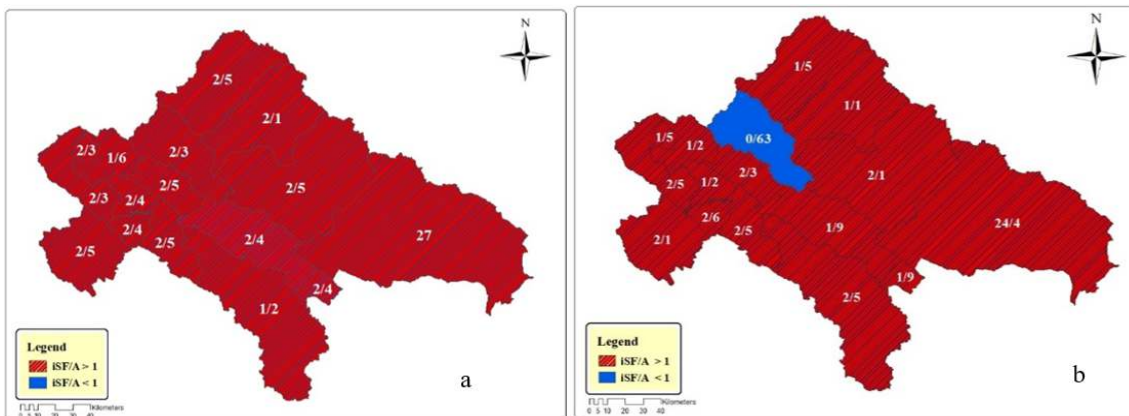


Figure 4. iSF/A of Zayandeh River basin for drinking water demand at: a) 2006, b) 2016

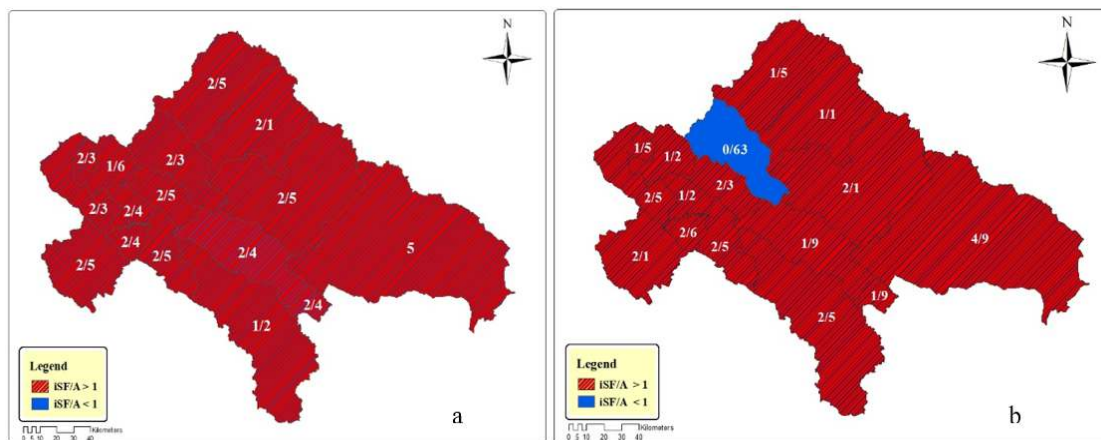


Figure 5. iSF/A of Zayandeh River basin for agricultural water demand at: a) 2006, b) 2016

استفاده از پساب صنعتی و کشاورزی در حوضه زاینده رود به ویژه در محدوده لنجانات رایج می باشد، که متأسفانه پساب تصفیه شده در این محدوده (که ناشی از زمین های کشاورزی و صنایع بزرگی هم چون پلی اکریل، ذوب آهن، فولاد مبارکه و صنایع دفاع است) و محدوده کوهپایه سگزی، از کیفیت مناسب برخوردار نبوده و دلیل آن قدیمی بودن تجهیزات و امکانات تصفیه خانه بیان شده است. در عین حال، میزان شاخص یکپارچه ردپای آب در بخش کشاورزی برای محدوده لنجانات حد مطلوبی دارد که در کنار کمیت مطلوب، نشان از مقدار مطلوب پارامترهای شیمیایی در حوزه کیفیت آب آبیاری دارد که بهبود اندکی نیز نسبت به سال ۱۳۸۵ داشته است. برخی از محدوده های مطالعاتی هم چون کرون که مصارف کشاورزی آن تقریباً به ۱۳ درصد کاهش یافته، بهبود چشم گیری در شاخص GF/A و به دنبال آن در شاخص یکپارچه ردپای آب داشته اند. هر چند که مصارف تنها یکی از مؤلفه های محاسبه شاخص ردپای آب زیرزمینی است، اما سهم مهمی را در تغییر مقادیر شاخص محدوده های مطالعاتی داراست.

برای بررسی وضعیت کمیت و کیفیت منابع آب زیرزمینی، می باید تمامی مراحل که برای مطالعات آب های سطحی انجام گرفت، تکرار شود. محاسبه شاخص GF/A، برآورد مساحت های آلوده و در نهایت از این طریق می توان شاخص iGF/A را در بخش مصارف شرب و کشاورزی به دست آورد. جدول (۳) نشان دهنده مقدار این شاخص ها در سال های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵ می باشد. مقادیر جدول (۳) نشان دهنده آن است که در طی دوره مطالعاتی بسیاری از محدوده های حوضه زاینده رود از نظر وضعیت کمیت آب های زیرزمینی، هر چند در حد مقادیر جزئی، بهبود یافته و تنها محدوده های مهیار و نجف آباد دچار تنش بیش تری شده و هم چنین تنها محدوده های لنجانات، مهیار و نجف آباد کیفیت ضعیف تری را در بخش مصارف شرب و کشاورزی تجربه کرده اند. محدوده لنجانات با وجود بهبود شاخص GF/A و با در نظر گرفتن تفسیر شاخص یکپارچه ردپای آب (تأثیر تغییرات کمیت آب بر کیفیت آن)، در حوزه کیفیت آب شرب، افت داشته و ضعیف تر شده است. طبق اظهار نظرات مسئولین مربوطه در استان اصفهان،

Table 3. GF/A index & iGF/A index obtained for drinking and agricultural demand for years 2006 & 2016

Study area	2006			2016		
	GF/A	iGF/A (Drinking)	iGF/A (Agriculture)	GF/A	iGF/A (Drinking)	iGF/A (Agriculture)
Koohpayeh	1.03	24.5	2.9	0.98	19.3	2.1
Isfahan_borkhar	1.1	21.4	2.3	0.7	16.1	0.96
Moorche khort	1.3	33.1	1.3	0.4	11.6	0.4
Alavije_dahagh	1.1	11.9	1.1	0.8	7.2	0.8
Meyme	1.1	8.6	1.2	0.5	4.6	0.5
Najaf abad	1.05	10.1	1.2	1.5	9.6	1.6
Carvan	1.01	1.01	1.01	0.4	0.4	0.4
Mahyar	1.03	22.7	2.1	1.3	34.01	3.9
Lenjanat	0.98	2.58	0.98	0.9	8.01	0.9
Ben_Saman	0.9996	0.9996	0.9996	0.9	0.9	0.9
Chadegan	1.02	1.02	1.02	0.7	0.7	0.7
Booen_mianasht	1.02	1.02	1.02	0.8	0.8	0.8
Chehel khaneh	1.1	1.1	1.1	0.9	0.9	0.9
Damaneh	1.1	1.1	1.1	0.6	0.6	0.6
Yan cheshmeh	0.98	0.98	0.98	0.9	0.9	0.9
Chelgerd	0.999	0.999	0.99	0.7	0.7	0.7
Average	1.1	8.9	1.3	0.8	7.3	1.1

است. در نهایت می‌توان گفت هرچند در سال ۱۳۹۵ به دلیل افزایش سطح پیرومتری آبخوان‌ها و کاهش مصارف به‌ویژه در بخش کشاورزی در بسیاری از محدوده‌های مطالعاتی، وضعیت کمیّت و میانگین شاخص GF/A در کل حوضه بهبود یافته و از ۱/۱ به ۰/۸ رسیده اما همچنان نزدیک به یک و در واقع وضعیت بحران است. میانگین شاخص یک‌پارچه ردپای آب در کل حوضه نیز بهبود یافته، اما در واقع هنوز از وضعیت بحران خارج نشده است، به‌ویژه در بخش مصارف شرب که فاصله زیادی با حد مطلوب دارد. این نتایج به‌خوبی نشان‌دهنده الزام تصمیم‌گیرندگان و ذی‌نفعان حوضه زاینده‌رود به توسعه و بهره‌برداری پایدار از آبخوان‌های این محدوده و همچنین ضرورت رسیدگی به شرایط کیفیت آب‌های شرب و کشاورزی می‌باشد. لازم به ذکر است که طی این ده سال شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان اقدام به تأسیس و بهره‌برداری از سدهای جدیدی هم‌چون سد و تونل چشمه‌لنگان نموده که هرچند درون حوضه آبریز زاینده‌رود قرار ندارند، اما بر کیفیت و کمیّت منابع آب این حوضه تأثیرگذار بوده‌اند. نتایج شاخص ردپای آب زیرزمینی و شاخص یک‌پارچه ردپای آب زیرزمینی در شکل‌های (۶)، (۷) و (۸) آمده است.

با توجه به افزایش سطح پیرومتری آبخوان‌ها و کاهش مصارف محدوده‌های بویین میان‌دشت، چادگان، چهل‌خانه و دامنه-داران که در قسمت‌های مرتفع حوضه مطالعاتی و با موقعیت دسترسی به ذخایر طبیعی برف و بارش فراوان قرار دارند، در سال ۱۳۹۵ کمیّت منابع آب و شاخص GF/A و در نتیجه شاخص یک‌پارچه آب زیرزمینی در این محدوده‌ها بهبود یافته و یا تنها یک یا دو آلاینده غیرمجاز در هر محدوده است. اغلب مصارف این محدوده‌ها و محدوده‌های چهل‌خانه، بن-سامان، کرون، یان‌چشمه و چلگرد-قلعه شاهرخ از آب سطحی تأمین می‌شود. در محدوده‌های مورچه‌خورت، میمه، علویجه و اصفهان-برخوار کاهش در شاخص کمیّت ردپای آب به‌علت کاهش مصارف، موجب بهبود شاخص یک‌پارچه ردپای آب شده، اما هنوز این شاخص در بخش شرب فاصله زیادی از حد مطلوب دارد که نشان‌دهنده تنش جدی پارامترهای شیمیایی در این محدوده‌ها است. در محدوده‌های میمه، مورچه‌خورت و علویجه، مقادیر شاخص یک‌پارچه ردپای آب زیرزمینی در بخش کشاورزی با مقدار شاخص ردپای آب زیرزمینی برابر است، که نشان‌دهنده آن است که طبق رابطه (۲) هیچ آلاینده‌ای از حد مجاز خود فراتر نرفته و مؤلفه‌های کیفی رابطه برابر با صفر

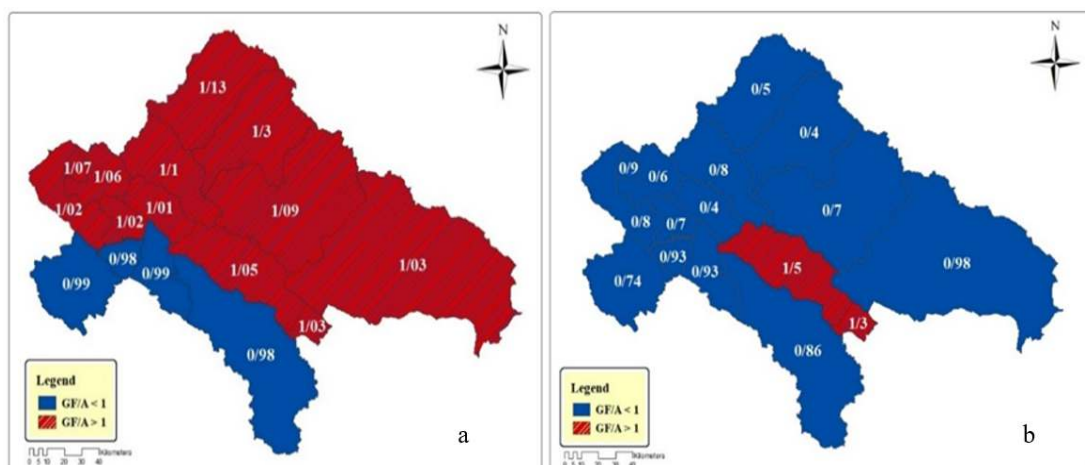


Figure 6. GF/A index of Zayandeh Rood basin at: a) 2006, b) 2016

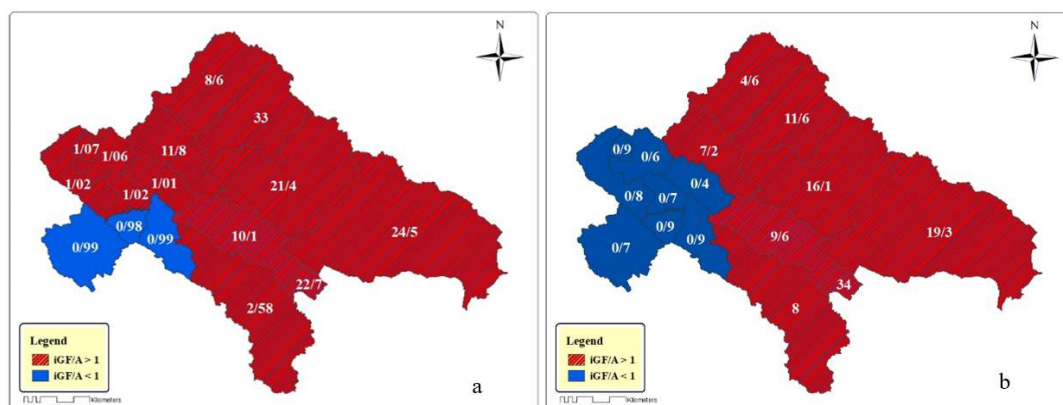


Figure 7. iGF/A index of Zayandeh Rood basin for drinking water demand at: a) 2006, b) 2016

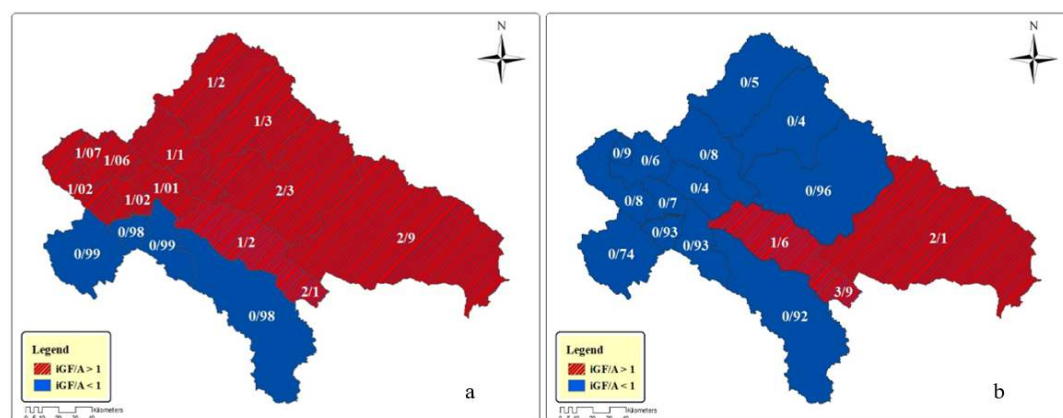


Figure 8. iGF/A index of Zayandeh Rood basin for agricultural water demand at: a) 2006, b) 2016

نتیجه گیری

بررسی آب‌های سطحی و زیرزمینی در بخش‌های مختلف مصارف، تصمیم‌گیرندگان را در اتخاذ سیاست‌هایی کارآمد و با افق دیدی در جهت پایداری منابع آبی حوضه آبریز کمک می‌کند. با توجه به اثر غیرقابل انکار کیفیت و کمیت منابع آب بر یکدیگر، داشتن دیدگاهی متناسب با توسعه پایدار مستلزم بررسی هم‌زمان کیفیت و کمیت منابع آب می‌باشد. توجه به توسعه پایدار در حوضه‌هایی که دارای اقلیم گرم و خشک هستند، تبدیل به نیازی اساسی شده است. حوضه آبریز زاینده‌رود که از گذشته دارای نقشی ویژه در آبرسانی به مناطق وسیعی از کشور هم‌چون بخش‌هایی در فلات مرکزی بوده، در پژوهش حاضر مورد مطالعه قرار گرفته تا به کمک

شاخص ردپای یکپارچه آب زیرزمینی، مدیران تصویری عینی و ملموس‌تر در محیط نرم‌افزار ArcGIS در مورد وضعیت پایداری منابع آب زیرزمینی حوضه داشته و سیاست‌های بلندمدت بهتری در این باره اتخاذ کنند. با توجه به اهمیت منابع آب‌های سطحی، این مقاله برای نخستین بار شاخص ردپای یکپارچه آب‌های سطحی را معرفی نمود و سپس با مطالعه شرایط کمیّت و کیفیت منابع آبی به مقایسه پایداری منابع آب سطحی و هم‌چنین منابع آب زیرزمینی در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵ با استفاده از استانداردهای شولر و ویلکوکس برای مصارف شرب و آبیاری پرداخت. برخی از محدوده‌های مطالعاتی حوضه زاینده‌رود از نظر شاخص‌های ردپای یکپارچه آب سطحی و آب زیرزمینی افت و برخی

پی‌نوشت‌ها

1. Water Stress Index
2. Sustainable Water Management
3. Groundwater Footprint
4. Interim Freshwater Sediment Quality Guideline
5. Matlab
6. Iran Water Quality Index for Groundwater Resources-Conventional Parameters
7. Integrated Groundwater Footprint
8. Surface Water Footprint
9. Integrated Surface Water Footprint
10. Schoeller
11. Wilcox
12. Geographical Information System
13. Electrical Conductivity (EC)
14. Sodium Adsorption Ratio (SAR)
15. Thiessen Polygons

منابع

1. Charchousi, D., & Papadopoulou, M. (2019). An uncertainty analysis approach for ecosystem sustainability based on groundwater footprint. In: E-proceedings of the 38th IAHR World Congress, September 1-6, Panama City, Panama, 1679-1684.
2. Chen, X., Wang, P., Muhammad, T., & Kaili, Y. (2020). Subsystem-level groundwater footprint assessment in North China Plain-The world's largest groundwater depression cone. *Ecological Indicators*, 117 (5), 106662
3. FAO. (2011). The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW)-Managing systems at risk. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome and Earthscan, London, <http://www.fao.org>.
4. Gleeson, T., & Wada, Y. (2013). Assessing regional groundwater stress for nations using multiple data sources with the groundwater footprint. *Environmental Research Letters*, 8(4), 044010.
5. Hoekstra, A.Y. (2009). Human appropriation of natural capital: a comparison of ecological footprint and water footprint analysis. *Ecol. Econ.*, 68, 1963-1974.
6. Hoekstra, A.Y., & Chapagain, A.K. (2007). Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resources Management*, 21(1), 35-48.
7. Hoekstra, A.Y., & Hung, P.Q. (2002). A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade: Research Report. Retrieved from <http://www.ayhoekstra.nl/pubs/Report11.pdf>

بهبود داشته‌اند، اما میانگین شاخص ردپای یک‌پارچه آب زیرزمینی برای کل حوضه در سال ۱۳۸۵ برای مصارف شرب و کشاورزی به ترتیب از ۸/۹ و ۱/۳، به ۷/۳ و ۱/۱ در سال ۱۳۹۵ تقلیل پیدا کرده است. هم‌چنین میانگین کل حوضه برای شاخص ردپای یک‌پارچه آب سطحی در سال ۱۳۸۵ برای مصارف شرب و کشاورزی به ترتیب ۳/۸ و ۲/۴ به دست آمده و در سال ۱۳۹۵ به ترتیب به ۳/۳ و ۲ رسیده که این امر نشانه بهبود اندک این شاخص‌ها می‌باشد. لازم به ذکر است با توجه به عدم ارائه و آماده‌سازی گزارش بیلان سال ۱۳۹۵ توسط وزارت نیرو، محاسبات پژوهش حاضر با استفاده از منابع و سازمان‌های مرتبط، نظرات کارشناسان خبره و گزارش‌های بیلان سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۸۵ انجام گرفته‌است، لذا نتایج دارای عدم قطعیت می‌باشند. هم‌چنین برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های احتمالی حاکم بر داده‌ها و شاخص‌ها می‌توان از رویکردهای احتمالاتی یا فازی در تحقیقات بعدی استفاده نمود.

در نهایت می‌توان گفت تلفیق شاخص ردپای آب و شاخص یک‌پارچه ردپای آب برای پایش کمیّت و کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی موجب تبدیل این شاخص به ابزاری قدرتمند و کارآمد در مطالعات آمایش سرزمین آب محور جهت کمک به تصمیم‌گیرندگان و ذی‌نفعان برای سهولت اتخاذ تصمیم و برنامه‌ریزی برای ارتقای شرایط کمیّت و کیفیت منابع آب و هم‌چنین توسعه پایدار حوضه شده است، که می‌توان از این تجربه در دیگر حوضه‌های کشور استفاده کرد. در پایان پیشنهاد می‌شود به پارامترهای شیمیایی براساس میزان سمّیت و تأثیرگذاری در کیفیت آب وزندهی انجام شود و هم‌چنین تهیه نقشه‌های کیفی با رویکرد فازی نیز انجام شود.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

8. Jingwei, L., Zhifeng, L., Chunyang, H., Huanbi, Y., & Siyuan, G. (2017). Water shortages raised a legitimate concern over the sustainable development of the drylands of northern China: Evidence from the water stress index. *Science of the Total Environment*, 590-591, 739-750.
9. Karimian, S., Chamani, A., & Shams, M. (2020). Evaluation 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), 1-13.
10. Kourgialas, N. N., Karatzas, G. P., Dokou, Z., & Kokorogiannis, A. (2018). Groundwater footprint methodology as policy tool for balancing water needs (agriculture & tourism) in water scarce islands. *Science of the Total Environment*, 615, 381-389.
11. Lin, X. (2020). Promoting the Sustainable Utilization of Groundwater Resources in Ethiopia using the Integrated Groundwater Footprint Index. Master Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering University of Connecticut.
12. Mahdavi, T., & Hosseini, S.A. (2020). Aquifers Sustainability Assessment by Integrated Groundwater Footprint Indicator (Case Study: East Azerbaijan Province). *Iran-Water Resources Research*, 15(4), 438-542 (In Persian).
13. Maiolo, M., Pantusa, D. (2019). Sustainable Water Management Index, SWaM_Index. *Cogent Engineering*, 6(1), 1603817.
14. Mays, L.W. (2007). Water resources sustainability. New York, USA, McGraw-Hill.
15. Ministry of Energy. (2011). Integrated water master plan in Gavkhooni basin. Up to 2006. Retrived from Iran Water Resources Management Company. (In Persian).
16. Ministry of Energy. (2016). Integrated water master plan in Gavkhooni basin. Up to 2011. Retrived from Iran Water Resources Management Company. (In Persian).
17. Pérez, J., Hurtado-Patiño, J., Herrera, M., Carvajal, F., Pérez, L., Gonzalez-Rojas, E., & Pérez-García, J. (2019). Assessing sub-regional water scarcity using the groundwater footprint. *Ecological indicators*, 96, 32-39.
18. Rahpou, F., Gayoor, H., & Ragabi, Z. (2019). Study on the qualitative changes in water of Zayandeh Rood River using fuzzy logic. *Geography and Development*, 16(53), 1-18.
19. Rodriguez, P.O., Holzman, M.E., Degano, M.F., Faramiñán, A.M.G., Rivas, R.E., & Bayala, M.I. (2020). Spatial variability of the green water footprint using a medium-resolution remote sensing technique: The case of soybean production in the Southeast Argentine Pampas. *Science of the Total Environment*, 763, 142963.
20. Salehian, S., & Rahmani fazli, A. (2018). Investigating the environmental consequences of instability of water resources in the catchment area of Zayandehrood river. *Natural Geography Research*, 50(2), 391-406. (In Persian)
21. Torabipoudeh, H., Younesi, H., & Arshia, A. (2020). Investigating the trend of changes in the quality of groundwater resources and evaluating the IRWQIGC index upstream of Zayandeh Rood dam. *Water and Soil Sciences*, 24(2), 27-40 (In Persian)
22. Tork, H. (2020). Providing practical solutions for rehabilitation and balancing of Najafabad aquifer using structural, non-structural and combined scenarios. Master Dissertation, College of Aburaihan, University of Tehran, Iran. (In Persian).