University of Tehran Press

Journal of Water and Irrigation Management **Online ISSN: 2382-9931**

Homepage: https://jwim.ut.ac.ir/

Spatial Analysis of Agricultural Water Distribution to Specified the Surface and Groundwater Resources in the System of Environmental-Economic Water Accounting's Physical Supply Table, Study Area of Abshar Irrigation District

Farhad Behzadi[1] | S. Mehdy Hashemy Shahdany[2]✉

1. Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Technology, University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: farhadbehzadi63@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Technology, University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: mehdi.hashemy@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: February 2, 2023
Received in revised form: February 14, 2023
Accepted: March 25, 2023
Published online: April 14, 2023

Keywords:
Spatial analysis of surface water distribution,
Abshar Irrigation District,
Flow Hydraulic Simulation,
Environmental-Economic Water Accounting.

ABSTRACT

This study aims to investigate and specify surface and groundwater sources portions in the physical supply table of the environmental-economic water accounting method (SEEWA-Water) in the Abshar Irrigation District through the developing hydraulic simulation model of flow in the main & lateral canals, spatial analysis of surface water distribution process, and water extraction analysis from exploitation tube-wells located in the district. For this purpose, the simulation of water distribution within irrigated units was conducted by developing the integral-delay simulator model in MATLAB. Then, spatial analysis of surface water distribution adequacy was carried out in GIS under different operational scenarios. The simulation results of surface water distribution indicated the decreasing trend of the adequacy of surface water distribution and delivery from upstream to downstream catchments. The spatial analysis results showed the share of surface and groundwater separately for 59 villages with rights and then for each village according to the main crops. The results showed that the surface water distributed in each sub-channels upstream and downstream villages provided 35-48 percent and 60-49 percent of agricultural demand, respectively. The spatial analysis (the water resources portions based on the main crops of the cropping pattern) reveals the customized components in the physical supply table in the SEEA-Water accounting method for an irrigation district, surface & groundwater water resources share, and distribution losses in Abshar Irrigation District.

Cite this article: Behzadi, F., & Hashemy Shahdany, S. M. (2023). Spatial Analysis of Agricultural Water Distribution to Specified the Surface and Groundwater Resources in the System of Environmental-Economic Water Accounting's Physical Supply Table, Study Area of Abshar Irrigation District. *Journal of Water and Irrigation Management*, 13 (1), 105-121. DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2023.354716.1046

© The Author(s).
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2023.354716.1046

انتشارات دانشگاه تهران

مدیریت آب و آبیاری

شاپا الکترونیکی: ۹۹۳۱-۲۳۸۲

Homepage: https://jwim.ut.ac.ir/

تحلیل مکانی توزیع آب کشاورزی به‌منظور تدقیق سهم منابع آب سطحی و زیرزمینی در جداول تأمین و مصرف حسابداری آب زیست‌محیطی– اقتصادی، موردمطالعه شبکه آبیاری آبشار اصفهان

فرهاد بهزادی[۱] | سید مهدی هاشمی شاهدانی[۲]✉

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: farhadbehzadi63@ut.ac.ir

۲. گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mehdi.hashemy@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۰۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۱/۲۵

کلیدواژه‌ها:
تحلیل مکانی توزیع آب سطحی،
روش حسابداری آب زیست‌محیطی– اقتصادی،
شبکه آبیاری آبشار،
شبیه‌سازی هیدرولیک جریان.

چکیده

این مطالعه با هدف بررسی و تدقیق سهم منابع آب سطحی و زیرزمینی در جدول اصلی تأمین فیزیکی روش حسابداری آب زیست‌محیطی–اقتصادی (SEEWA-Water) در محدوده شبکه آبیاری آبشار اصفهان، اقدام به توسعه مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در کانال‌های اصلی و فرعی، تحلیل مکانی فرایند توزیع آب سطحی و برداشت آب از چاه‌های بهره‌برداری واقع در شبکه آبیاری آبشار نمود. برای این منظور، شبیه‌سازی توزیع آب بین آبگیرهای کانال اصلی و فرعی، با توسعه مدل شبیه‌ساز انتگرالی– تأخیری در محیط MATLAB صورت گرفت و تحلیل مکانی کفایت توزیع آب سطحی، در محیط GIS تحت سناریوهای مختلف بهره‌برداری انجام شد. نتایج شبیه‌سازی توزیع آب سطحی در محدوده شبکه، حاکی از روند غالباً کاهشی کفایت توزیع و تحویل آب سطحی از آبگیرهای بالادست تا پایین‌دست، بود. نتایج تحلیل مکانی، سهم آب سطحی و زیزمینی به تفکیک ۵۹ روستای دارای حقابه و سپس به تفکیک محصولات اصلی الگوی کشت برای هر روستا را مشخص نمود. نتایج نشان داد آب سطحی توزیع‌شده در مناطق زراعی واقع در بالادست و پایین دست هر کانال فرعی به‌ترتیب ۳۵–۴۸ درصد و ۴۹–۶۰ درصد تقاضای کشاورزی را تأمین نموده است. نتایج تحلیل انجام‌شده، مقادیر مؤلفه‌های بومی‌شده جدول اصلی تأمین فیزیکی روش حسابداری آب زیست‌محیطی– اقتصادی برای یک شبکه آبیاری، سهم منابع آب سطحی، زیرزمینی، تلفات سامانه‌های توزیع و آب در شبکه آبیاری آبشار را مهیا نمود.

استناد: بهزادی، ف. و هاشمی شاهدانی، س. م (۱۴۰۲). تحلیل مکانی توزیع آب کشاورزی به‌منظور تدقیق سهم منابع آب سطحی و زیرزمینی در جداول تأمین و مصرف حسابداری آب زیست‌محیطی– اقتصادی، موردمطالعه شبکه آبیاری آبشار اصفهان. *نشریه مدیریت آب و آبیاری*، ۱۳ (۱)، ۱۰۵–۱۲۱.

DOI: https://doi.org/ jwim.2023.354716.1046

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

CC BY NC

۱. مقدمه

در بسیاری از نقاط توسعه‌یافته و درحال‌توسعه جهان، جهت مقابله با کاهش شدید و فزاینده منابع آب از ابزارهای گوناگون سیاست‌های مدیریت منابع آب استفاده شده است. اما نتایج به‌کارگیری این ابزارها، نشان‌دهنده ضعف آن‌ها در حل مسائل و مشکلات مربوط به بخش مذکور بوده است. اهمیت این مهم در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان به‌وضوح خود را نشان داده است. به‌طوری‌که وقوع خشکسالی‌های پی‌درپی در برخی از این مناطق از یک‌طرف و افزایش روز افزون تقاضای آب از طرف دیگر، سبب محدودیت کمی و کیفی آب قابل‌دسترس در این مناطق شده است. این در حالی است که فقدان مدیریت و برنامه‌ریزی به‌هنگام و انطباق با وضع موجود نیز، محدودیت‌های مذکور را دو چندان نموده است و در نتیجه آن، تمرکز در مدیریت بهینه و پایدار منابع آب و شناسایی عوامل مؤثر بر آن را به یک ضرورت حتمی و حیاتی تبدیل کرده است. نتایج حاصل از بخشی‌نگری‌های متولیان، تصمیم‌گیران و مدیران منابع آب نیز قوت زیادی به این مهم بخشیده است و بسیاری از کشورهای جهان را وادار ساخته است که دیدگاه‌های خود را مورد بازبینی و تجدیدنظر قرار دهند و با درس‌گرفتن از تجربیات تلخ خود در مدیریت و توسعه منابع آب و با علم به ماهیت چندوجهی و بین‌رشته‌ای مسائل و مشکلات آن، به این نتیجه مهم دست یابند که حل هرگونه مسائل و مشکلات مرتبط با آب، نیازمند تحلیل سیستمی در قالب مدیریت به‌هم‌پیوسته منابع آب می‌باشد تا از طریق رویکرد مذکور، چارچوبی تحلیلی به‌هم‌پیوسته‌ای فراهم شود که ضمن پرداختن به آثار اقتصادی و اجتماعی ناشی از اجرای سیاست‌ها و برنامه‌های مدنظر مدیران و متولیان بخش آب، هزینه‌های نامطلوب زیست‌محیطی آن نیز موردتوجه قرار گیرد (Karimi *et al*., 2020).

قوت‌گرفتن رویکرد مذکور در نظر مدیران و متولیان منابع آب و نقش اساسی آن در مدیریت کارا و بهینه این منبع حیاتی موجب استفاده گسترده از سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری به‌منظور پیاده‌سازی مفهوم مدیریت یکپارچه منابع آب در کشورهای مختلف شد که سیستم‌های حسابداری آب هم از جمله آن‌ها می‌باشد. به همین منظور، دو دسته از سیستم‌های حسابداری آب در سطح کشورهای مختلف و توسط پژوهش‌گران این کشورها و سازمان ملل توسعه یافته است. هدف کلی استفاده از چارچوبی است که درک روشنی از فرایندهای هیدرولوژیکی حوضه داشته باشد و جریان‌های قابل‌کنترل و کنترل‌نشده آب، تعامل با کاربری اراضی و فرصت‌ها برای کاهش اثرات منفی و افزایش مزایای کمبود آب در جامعه را در برگیرد (Karimi *et al*., 2013). حسابداری آب به‌منظور فراهم‌نمودن مدیریتی جامع و یکپارچه برای منابع آبی با سازماندهی داده‌های مختلف از بخش‌های گوناگون هیدرولوژیکی، زیست‌محیطی و اقتصادی امکان پردازش و تفسیر آن‌ها را در کنار یکدیگر فراهم می‌کند. چارچوب حسابداری آب، رویکردی برای استانداردکردن نحوه سازماندهی داده و اطلاعات است که به‌عنوان ابزاری مفید برای ارتقای کارایی و شفافیت در مدیریت یکپارچه منابع آب در نظر گرفته می‌شود (Razavi *et al*., 2020). اطلاعات ارائه‌شده با استفاده از چارچوب حسابداری آب، این امکان را به مدیران و تصمیم‌گیرندگان سیاسی می‌دهد تا میزان عدم قطعیت در تصمیمات و بهره‌برداری را به حداقل برسانند (Peranginangin *et al*., 2004). چارچوب حسابداری آب نمایانگر این موضوع است که چه مقدار آب (کمی)، برای چه منظور در برابر مقدار آب قابل‌دسترس در یک محدوده بهره‌برداری می‌شود (Momblanch *et al*., 2018). لذا با توجه به اهمیت ساختار حسابداری آب ایجاد یک زیرساخت با سرمایه‌گذاری مناسب می‌تواند نقش مهمی در فرایند ارزیابی منابع آب یک منطقه داشته باشد. تغییرات میزان آب در دسترس، بر رفاه اجتماعی، اقتصادی و محیط زیست تأثیرگذار بوده و این موضوع یک رویکرد نوین جهت مدیریت یکپارچه منابع آب به‌شمار می‌رود، بنابراین باید حسابداری آب به‌صورت جامع و با درنظرگرفتن ابعاد توسعه پایدار نگریسته شود و ابعاد اقتصادی- اجتماعی در این سیستم حسابداری در نظر گرفته شود.

در این بین، سیستم حسابداری زیست‌محیطی- اقتصادی آب، SEEA-Water، یک روش استاندارد است که توسط بخش آمار سازمان ملل با همکاری گروه لندن در راستای تحقق پیاده‌سازی مدیریت یکپارچه منابع آب پیشنهاد شده که دستورالعملی برای یکپارچه‌سازی اطلاعات هیدرولوژیکی و اقتصادی ارائه می‌دهد. این روش در راستای توسعه سیستم‌های حسابداری آب قبلی- که عموماً مبتنی بر استفاده از داده‌های ماهواره‌ای است- بوده و شامل جداول شناخته‌شده به جداول SEEA-Water است که در عین‌حال، به‌طور کامل در چارچوب سیستم حساب ملی یکپارچه شده است. چارچوب SEEA-Water در کنفرانس بین‌المللی حسابداری آب برای مدیریت یکپارچه منابع آب که در ووربورگ (هلند) در ماه می ۲۰۰۶ برگزار شد به‌عنوان استاندارد بین‌المللی برای آمار آب پیشنهاد شده است (Vardon *et al*., 2019). هدف کلی چارچوب SEEA-Water هماهنگ‌کردن داده‌های اقتصادی- هیدرولوژیکی تحت یک چارچوب مشترک و امکان مقایسه آمار و نسبت‌های عملکرد در مناطق و در طول زمان است. لازم به توضیح است که مطابق اظهارات توسعه دهندگان این روش، نمونه‌ای جامع از این چارچوب توسط UN توسعه داده‌شده و پژوهش‌گران به فراخور نیاز و ضروریات هر پروژه اقدام به بومی‌سازی این جداول خواهند کرد. مطابق دستورالعمل ارائه‌شده این روش توسط سازمان ملل (Gan *et al*., 2012) برای تعیین کمیت تعاملات بین اقتصاد و محیط زیست، چارچوب SEEA-Water یک حوزه جغرافیایی مرجع می‌تواند را تعریف شود که در آن سیستم‌های اقتصادی و زیست‌محیطی به‌طور جداگانه در نظر گرفته می‌شوند.

این مقاله، که بخشی از نتایج یک پژوهش کاربردی چندهدفه بوده، برای اولین بار اقدام به بررسی پیاده‌سازی سیستم حسابداری آب SEEA-Water در مقیاس مدیریتی یک شبکه آبیاری و زهکشی نموده است. در توجیه ضرورت انجام هدف مذکور، می‌توان توجه مخاطبین را به توصیه کاربردی و توجه ویژه آژانس محیط زیست اروپا[1] (EEA) به تقلیل محدوده‌های موردمطالعه بزرگ مقیاس به محدوده‌های کوچک مقیاس مدیریتی، با هدف تدقیق داده‌های مورداستفاده و کاهش عدم قطعیت در این ارتباط جلب کرد. براساس توصیه مذکور، پیشنهاد شده است که ۱- در تحلیل مکانی به جای تعیین حساب‌های آب در سطح یک کشور، توصیه شده که در سطح‌های مدیریتی کوچک‌تر مانند حوضه‌های آبریز و مناطق کشاورزی با مدیریت مستقل، صورت پذیرد؛ ۲- هم‌چنین در تحلیل‌های زمانی به جای تعیین حساب‌های آب به‌صورت سالانه، EEA پیشنهاد می‌کند که به‌صورت ماهانه/ روزانه به‌منظور بررسی دقیق‌تر و امکان افزایش دقت بررسی روند فشار فصلی اقتصاد بر منابع آب/ محیط زیست استفاده شود. با درنظرگرفتن هر دو توصیه مذکور، این پژوهش برای اولین بار اقدام به ارائه یک روش سیستمیک و کاربردی برای بومی‌سازی پارامترهای جدول تأمین- مصرف فیزیکی[2] روش (PSUTs) حسابداری آب زیست‌محیطی- اقتصادی[3] (SEEWA-Water) در محدوده یک شبکه آبیاری و زهکشی، برپایه استخراج اطلاعات موردنیاز جداول حسابداری بر پایه شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان در کانال‌های توزیع آب سطحی نمود. شبکه آبیاری آبشار اصفهان به‌عنوان نمونه مطالعاتی انتخاب و بررسی و تدقیق سهم منابع آب سطحی و زیرزمینی با تکیه بر شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در کانال‌های توزیع آب سطحی، مطالعه بیلان برداشت آب از چاه‌های بهره‌برداری واقع در محدوده شبکه و نیز تحلیل مکانی کفایت توزیع آب سطحی در شبکه صورت گرفت.

۲. مواد و روش‌ها

۲. ۱. شبکه آبیاری و زهکشی آبشار

شبکه آبیاری آبشار واقع در حوضه آبریز زاینده‌رود و دشت کوهپایه و سگزی (شرق استان اصفهان) و مساحت در حال بهره‌برداری شبکه در حدود ۲۱ هزار هکتار می‌باشد. منبع اصلی تأمین‌کننده آب این شبکه آبیاری، آب رهاشده از سد

انحرافی آبشار می‌باشد. در طرفین سد انحرافی آبشار، در منشأ تأمین آب این شبکه آبیاری، دو رشته کانال اصلی چپ و راست به‌منظور برداشت آب جهت با هدف تحت پوشش قراردادن اراضی به وسعت ۳۲۰۰۰ هکتار (که بنا بر اطلاعات اخذشده از شرکت آب منطقه‌ای اصفهان در حال حاضر در حدود ۲۱ هزار هکتار در حال بهره‌برداری است) احداث شده است. از جمله ویژگی‌های این شبکه مجهزبودن به سیستم دریچه‌های برداشت آب نیرپیک می‌باشد. این دریچه‌ها امکان برداشت کنترل‌شده و اندازه‌گیری حجمی آب را فراهم می‌آورند. شبکه آبیاری آبشار دارای دو رشته کانال اصلی درجه یک به طول حدود ۶۹ کیلومتر و با ظرفیت حدود ۱۶ مترمکعب در ثانیه و ۱۰ رشته کانال فرعی درجه دو به طول حدود ۶۱ کیلومتر با ظرفیت حدود ۳۰۰ تا ۲۴۰۰ لیتر در ثانیه و نیز حدود ۱۸۰ کیلومتر جمع‌کننده و زهکش سطحی روباز است. تحویل و توزیع سطح آب در طول کانال‌های اصلی توسط ۶۰ آبگیر انجام می‌گیرد که به‌صورت دستی بهره‌برداری می‌شوند. براساس اطلاعات جمع‌آوری‌شده از دفتر بهره‌برداری شبکه آبیاری آبشار، عملکرد ضعیف بهره‌برداری این شبکه منجر به هدررفت در حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد جریان ورودی در سامانه‌های انتقال، توزیع و تحویل آب کشاورزی می‌شود. از این‌رو، جهت رفع این مشکل، کشاورزی وابسته به منابع آب زیرزمینی گسترش پیدا کرده است، به‌نحوی‌که در حال حاضر با برداشت سالانه حدود ۱۰۲ میلیون مترمکعب از حدود ۹۰۰۰ حلقه چاه حفرشده در داخل شبکه آبیاری آبشار، حجم آب برداشتی در محدوده این شبکه در حدود ۸ درصد کل برداشت از منابع آب زیرزمینی در محدوده شبکه‌های آبیاری حوضه زاینده‌رود می‌باشد. با توجه به این‌که هدف اصلی این پژوهش تعیین سهم آب سطحی و زیرزمینی در تأمین آب آبیاری محصولات کشت‌شده در شبکه آبیاری آبشار می‌باشد، لذا در اولین گام اقدام به تخمین نیاز آبی محصولات غالب الگوی کشت این شبکه با استفاده از نرم‌افزار نت‌وات شد. یکی از دلایلی که پژوهش‌گران این پژوهش را مجاب به این مهم کرد، عدم وجود اطلاعات یکپارچه و قابل استناد جمع‌آوری‌شده در مطالعات میدانی بود تا بتوان مقدار نیاز آب آبیاری واقعی هر واحد مستقل کشاورزی را برآورد کرده و سپس سهم منابع آب را تأمین آن مشخص نمود. بیش‌تر اطلاعات موجود، اطلاعات مربوط به فروش آب، حقابه‌های از قبل مشخص و سهم آب مشخص‌شده برای هر دریچه بود. لازم به توضیح است که به‌منظور محاسبه نیاز خالص آبیاری محصولات غالب در الگوی کشت شامل گندم، خربزه، کدو، پیاز، باقلا، شبدر و باغات از نرم‌افزار نت‌وات استفاده شد.

۲. ۲. روش انجام پژوهش

روش انجام پژوهش و مراحل آن در شکل (۱) به‌صورت تصویری ارائه شده است. بر این اساس، گام اصلی در پیاده‌سازی یک چارچوب حسابداری آب در یک شبکه آبیاری، بررسی مکانی نحوه توزیع آب سطحی، برآورد میزان برداشت آب زیرزمینی در محدوده شبکه و در نتیجه تعیین سهم هر کدام از منابع آب سطحی و زیرزمینی در تأمین نیاز کشاورزی می‌باشد. در این راستا، در گام اول اقدام به ارزیابی وضعیت فعلی و عملکرد بهره‌برداری انتقال و توزیع آب شبکه آبیاری آبشار در برخورد با شرایط بهره‌برداری محتمل صورت گرفت. ارزیابی عملکرد بهره‌برداری بستری را ایجاد می‌کند که جنبه‌های مختلف سازه‌ای، هیدرولیکی و مدیریتی و هم‌چنین تعیین عوامل مؤثر در بهره‌برداری از شبکه، به‌منظور ارائه اقدامات لازم جهت بهبود وضعیت بهره‌برداری در صورت لزوم، انجام شود. در این راستا ارزیابی عملکرد به‌دست‌آمده در سامانه انتقال و توزیع آب کشاورزی (شامل کانال‌های اصلی و فرعی) در شبکه آبیاری آبشار از دیدگاه کفایت تحویل و توزیع آب آبیاری صورت گرفت و نتایج حاصل از شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد بهره‌برداری کانال اصلی شبکه آبیاری آبشار شامل شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد وضعیت بهره‌برداری موجود در سامانه انتقال و توزیع، در شرایط مختلف بهره‌برداری- که در روزهای مختلف در یک فصل زراعی رخ می‌دهد- ارائه شد. در ادامه، به‌منظور ارائه تحلیل مکانی و

ارزیابی عملکرد بهره‌برداری شبکه آبشار، مقدار متوسط شاخص محاسبه‌شده (کفایت تحویل و توزیع آب)، با استفاده از نرم‌افزار GIS صورت گرفت. نتایج تحلیل مکانی، امکان بررسی و مقایسه مکانی پراکندگی مقادیر متوسط شاخص کفایت تحویل آب به آبگیرها تحت سناریوهای مختلف بهره‌برداری را فراهم نموده است.

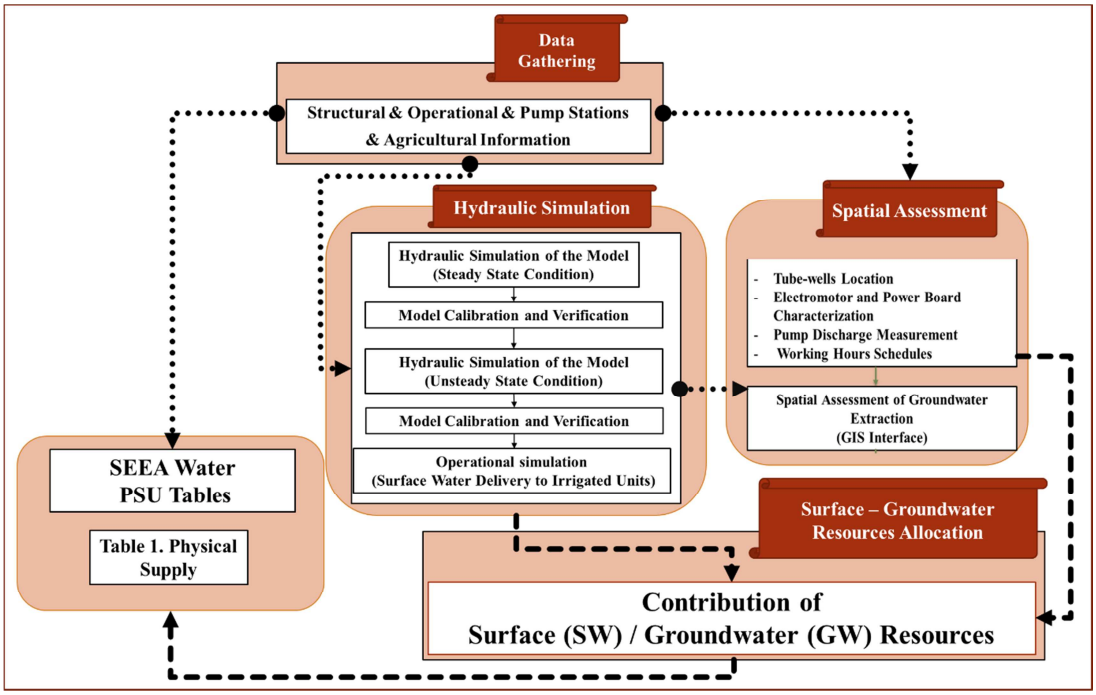

Figure 1. Schematic of the research methodology including different components and the interconnections

۲. ۳. معرفی اجمالی اجزای سیستم حسابداری آب SEEA-Water

هدف کلی چارچوب SEEA-Water هماهنگ‌کردن داده‌های اقتصادی- هیدرولوژیکی تحت یک چارچوب مشترک و امکان مقایسه آمار و نسبت‌های عملکرد در مناطق و در طول زمان است. لازم به توضیح است که مطابق اظهارات توسعه‌دهندگان این روش، نمونه‌ای جامع از این چارچوب توسط سازمان ملل توسعه داده‌شده و پژوهش‌گران به فراخور نیاز و ضروریات هر پروژه به بومی‌سازی این جداول اقدام خواهند کرد. این چارچوب باید دو مشخصه ذیل را دارا باشد (ESCAP, 2017):

الف- شاخص‌ها و آمار توصیفی را برای نظارت بر تعامل بین محیط‌زیست و بخش‌های اقتصادی واقع در منطقه موردمطالعه و به دنبال آن پیشرفت در دست‌یابی به اهداف زیست‌محیطی به سیاست‌گذاران ارائه دهد.

ب- یک پایگاه داده سازمان‌یافته ایجاد کند تا در مرحله سیاست‌گذاری (مرحله بعد از ایجاد ساختار حسابداری آب) تصمیم‌گیر قادر باشد برنامه‌ریزی استراتژیک و تجزیه و تحلیل سیاست‌ها را با آگاهی کافی نسبت به وضعیت کنونی مدیریت آب در هر منطقه موردمطالعه و در راستای تحقق اهداف توسعه پایدارتر انجام دهد.

هسته اصلی چارچوب SEEA-Water بر مجموعه‌ای از جداول استاندارد متکی است که حداقل داده‌های- را که عموم سازمان‌های دولتی یا منطقه‌ای در هر کشور جمع‌آوری می‌کنند- را یک قالب واحد به تصویر بکشد. برای تعیین کمیت تعاملات بین اقتصاد و محیط زیست، چارچوب SEEA-Water یک حوزه جغرافیایی مرجع را تعریف می‌کند که از

آن سیستم‌های اقتصادی و زیست‌محیطی به‌طور جداگانه در نظر گرفته می‌شوند. سیستم اقتصادی توسط تمام این فعالیت‌های تولیدی و اجتماعی که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم با استفاده از هر نوع آب مرتبط است، یکپارچه می‌شود. در حالی که بخش زیست‌محیطی شامل زیربخش‌هایی است که آب در آن جاری است یا ذخیر شده است (به‌عبارت دیگر رودخانه‌ها، دریاچه‌ها یا تالاب‌ها، خاک و سفره‌های زیرزمینی). به‌طور کلی، سه تیپ جدول حسابداری SEEA-Water در قالب سه جدول ذیل خلاصه می‌شود (ESCAP, 2017):

الف- جداول تأمین و مصرف فیزیکی (PSUTs): نشان می‌دهد که چه مقدار آب برداشته می‌شود/ از منابع آب سطحی منحرف می‌شود/ توسط زیرسیستم‌های اقتصادی به محیط زیست تخلیه می‌شود، و چگونه آب بین زیرسیستم‌های مختلف اقتصادی مبادله می‌شود.

ب- جداول انتشار آلودگی: که به جمع آوری داده‌های مربوط به مقدار آلاینده‌هایی را که صنایع و خانوارها به فاضلاب اضافه می‌کنند و در نهایت به محیط زیست تخلیه می‌شود، می‌پردازد.

ج- جداول حساب اقتصادی و هیبرید: جداول حساب‌های ترکیبی و اقتصادی که اطلاعات PSUTs و تراکنش‌های پولی و اقتصادی حساب‌شده در اقتصاد را یکپارچه می‌کند.

با توجه به این‌که قلمرو مطالعاتی این پژوهش، تنها محدود به ارائه یک روش کاربردی جهت تعیین سهم منابع آب سطحی و زیرزمینی جهت تدقیق پارامترهای جدول تأمین فیزیکی آب در بین جداول PSUTs می‌شود، لذا در ادامه توضیحات مربوط به سایر جداول PSUTs به‌صورت کلی و جهت آشنایی ارائه خواهد شد. براساس چارچوب SEEA-Water، داده‌های جداول تأمین و استفاده فیزیکی (PSUT) در سه زیر جدول سازمان‌دهی شده‌اند: الف- جدول مصرف فیزیکی، ب- جدول عرضه فیزیکی و ج- جدول ماتریس تبادل که جریان‌های آب را در داخل سیستم اقتصادی محاسبه می‌کند. تمام جریان‌ها در جداول در واحدهای فیزیکی و براساس گروه‌های فعالیت- منظور سیستم‌های اقتصادی و زیست‌محیطی- ارائه شده‌اند.

مطابق جدول تأمین فیزیکی آب از جداول PSUTs تأییدشده توسط سازمان ملل، در چارچوب SEEA-Water، تمایزی بین گروهی از فعالیت‌هایی که با تأمین آب (بخش W-supply) انجام می‌شوند با فعالیت‌هایی که بیش‌تر بر جمع‌آوری، تصفیه و بازیابی فاضلاب متمرکز هستند (بخش W-sanitation) وجود دارد.

- مصرف آب (Water use) مجموع آبی است که یک فعالیت اقتصادی از محیط زیست یا سایر فعالیت های اقتصادی دریافت می‌کند.

- تأمین آب (Water supply) به مجموع خروجی‌هایی اطلاق می‌شود که یک فعالیت اقتصادی ایجاد می‌کند، که شامل آبی است که به یک فعالیت اقتصادی دیگر عرضه می‌شود و تا زمانی که آب واقعاً توسط مصرف‌کننده نهایی دریافت نشود، تلف می‌شود.

توجه به این نکته دارای اهمیت است که در ساختار SEEA-Water تمام تلفات نشت‌های محاسبه‌شده در طول شبکه‌های توزیع به فعالیت اقتصادی که آب را تأمین می‌کند، نسبت داده می‌شود. بنابراین، مفهوم مصرف آب در برگیرنده الف- آبی که در طی یک فعالیت اقتصادی استفاده می‌شود تا محصول نهایی حاصل شود و ب- آبی که در این فرایند تلف می‌شود به‌عنوان مثال تبخیر یا تعرق، تلفات نشت و تلفات بهره‌برداری در یک شبکه آبیاری.

- برای جریان‌های مربوط به محیط زیست، جداول PSUT مشخص‌کننده مصرف‌کننده نهایی آب (آبیاری، معدن، توزیع، و غیره) و نیز منشأ تأمین (آب های سطحی، زیرزمینی، رطوبت خاک و غیره) می‌باشند.

- برای جریان‌های درون بخش اقتصادی، جداول PSUT گزارش‌دهنده نوع و منشأ آب تأمین‌شده (آب تصفیه‌شده/ پساب فاضلاب، نمک‌زدایی و غیره) هستند.

در این میان لازم است که به مفهوم رطوبت خاک توجه ویژه‌ای شود. در واقع، این اصطلاح به آب ذخیره‌شده در ناحیه ریشه خاک اشاره دارد که می‌تواند از طریق تبخیر و تعرق به اتمسفر رها شود. دقت شود که این مفهوم با آب آبیاری مطابقت نداشته و مبتنی بر محاسبه باران مؤثر در منطقه موردمطالعه می‌باشد. در بسیاری از پژوهش‌ها این ذخایر آب را «آب سبز» معرفی نموده‌اند. دقت شود که برای کشاورزی آبیاری، «رطوبت خاک» جزء مهمی از حساب‌های آب، البته در رده دوم و بعد از «آب آبیاری» به‌حساب می‌آید.

۲. ۴. شبیه‌سازی هیدرولیکی توزیع و تحویل آب سطحی در سیستم کانال‌های آبیاری

به‌منظور تعیین سهم آب سطحی در تأمین نیاز آب آبیاری واحدهای کشاورزی در شبکه آبیاری آبشار، لازم است که شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در کانال‌های اصلی و فرعی شبکه انجام گیرد. در این مطالعه از مدل ریاضی انتگرالی- تأخیری[۴] (ID) برای شبیه‌سازی جریان در کانال اصلی سیستم توزیع آب استفاده شد (Van Overloop *et al*., 2010). در مدل مذکور، هر بازه کانال اصلی سیستم توزیع آب به دو بخش، شامل ۱- بخش جریان یکنواخت و ۲- بخش منحنی برگشت آب می‌باشد. هر بخش یک مشخصه اصلی دارد که از مجموع این دو، مدل انتگرالی- تأخیری به‌دست می‌آید. این دو مشخصه اصلی در هر بازه کانال عبارتند از زمان تأخیر (τ) و سطح ذخیره، (A_S) در بخش اول (جریان یکنواخت) فرض می‌شود که موج جریان ورودی جریان فقط به سمت پایین‌دست منتقل می‌شود. هر تغییری در سازه تنظیم‌کننده سطح آب بالادست منجر به تولید یک موج می‌شود، این بخش از کانال فقط به‌عنوان گذار برای عبور این موج عمل می‌کند. شایان ذکر است که سرعت موج در یک بازه از کانال با عمق نرمال، به سرعت موج سینماتیک نزدیک است (Schuurmans *et al*., 1997). زمان تأخیر ناشی از حرکت موج مذکور به بخش منحنی برگشت آب رسیده و موجب تغییر تراز سطح آب می‌شود. زمان تأخیر تنها پارامتری است که در بخش جریان یکنواخت، برای تشریح جریان، در نظر گرفته می‌شود. معادله حاکم بر این بخش به‌صورت رابطه (۱) ارائه می‌شود:

$$q_{canal}(t) = q_{in}(t-\tau)$$ رابطه ۱)

که در آن، q_{in} دبی ورودی به بخش یکنواخت جریان (m^3/s)، q_{canal} دبی ورودی به بخش ذخیره (m^3/s)، t زمان (sec) و τ زمان تأخیر (sec) می‌باشد. بخش منحنی برگشت آب (بخش دوم) مانند یک مخزن عمل می‌کند و بخش انتگرالی مدل را شامل می‌شود. تغییرات مساحت سطح افقی آب در ترازهای مختلف مخزن (A_S) براساس دبی‌های ورودی و خروجی از بازه کانال به‌صورت رابطه (۲)، در حوزه زمان و حوزه فرکانس، قابل‌بیان است (Schuurmans *et al*., 1997):

$$A_s \cdot \frac{dh(t)}{dt} = q_{canal}(t) - q_{out}(t)$$ رابطه ۲)

$$A_s \cdot s \cdot h(s) = q_{canal}(s) - q_{out}(s) \Leftrightarrow h(s) = \frac{1}{A_s \cdot s} \cdot \left[q_{canal}(s) - q_{out}(s)\right]$$

که در آن، A_S مساحت سطح ذخیره (m^2)، h عمق آب و (m)، q_{out} دبی خروجی از بخش منحنی برگشت آب (m^3/s) می‌باشد. برای یک بازه از کانال که شامل بخش جریان یکنواخت و بخش منحنی برگشت آب می‌باشد، مدل کاملی از تلفیق معادلات ارائه‌شده در بخش‌های قبلی به‌دست می‌آید.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل بهره‌برداری کانال موردمطالعه این پژوهش که با استفاده از مدل ریاضی ساده‌شده ID توسعه داده شد، براساس اطلاعات اندازه‌گیری‌شده در محل (در دوره زمان بهره‌برداری سال‌های ۱۳۹۰-۱۴۰۰) انجام گرفت. لازم به توضیح است که به‌دلیل کمبود آب، در برخی از سال‌های اخیر دوره توزیع آب محدود به چند هفته شد که

به‌منظور عدم تأثیر این شرایط در نتایج پژوهش، سعی شد بازه زمانی کاملی از توزیع آب در کانال‌ها براساس آمار ده‌ساله جمع‌آوری‌شده از شرکت آب منطقه‌ای اصفهان انجام گیرد. با واسنجی مدل بر پایه میزان تطبیق داده‌های دبی تحویلی به کلیه آبگیرهای واقع در کانال اصلی سیستم توزیع آب، به‌عنوان ضریب واسنجی، انجام گرفت. برای مقایسه مقادیر شبیه‌سازی‌شده با مقادیر مشاهداتی از شاخص‌های ارزیابی ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب خطای پس‌ماند (CRM) و میانگین خطای مطلق (MAE) استفاده شد. مدل تهیه‌شده براساس داده‌های دبی تحویلی به کلیهٔ آبگیرهای کانال، برای کشت بهارهٔ بازه ده‌ساله واسنجی شد که مقادیر شبیه‌سازی‌شده با مقادیر مشاهده‌شده مقایسه شدند. مدل، با تغییر زمان تأخیر در بازه و بررسی انطباق مقادیر شبیه‌سازی با مقادیر اندازه‌گیری‌شده دبی تحویلی به آبگیرها واسنجی شد. تحویل و توزیع سطح آب در طول کانال‌های اصلی توسط ۳۸ آبگیر- کانال اصلی شاخه جنوبی (چپ)- و ۲۰ آبگیر- کانال اصلی شاخه شمالی (راست) و در کانال‌های فرعی ده‌گانه توسط ۷۷ آبگیر انجام می‌گیرد که به‌صورت دستی بهره‌برداری می‌شوند. در این مطالعه سیستم توزیع آب بخش شمالی شبکه آبیاری، شامل ۵۸ منطقه زراعی که توسط ۵۸ آبگیر واقع در کانال اصلی تأمین می‌شود.

در این پژوهش پنج سناریوی کلی بهره‌برداری، بر پایه حالت‌های واقعی رخداده در منطقه موردمطالعه که از الگوهای مختلف تخصیص آب به شبکه آبیاری (در محل بند انحرافی) در طول ۱۰ سال گذشته، در نظر گرفته شده است که به‌صورت کلی از عبارت سناریوی بهره‌برداری نرمال، پرآبی و کم‌آبی یاد می‌شود. در سناریوی بهره‌برداری نرمال، دبی ورودی به کانال اصلی با میزان کل تقاضای آب کشاورزی- منظور حقابه کشاورزی مشخص یا سهم مشخص‌شده برای هر دریچه آبگیر- مطابقت دارد، درحالی‌که در سناریوی پرآبی میزان آب ورودی به شبکه ۲۰ درصد افزایش و در سناریوهای کم‌آبی، میزان آب ورودی به شبکه آبیاری به‌ترتیب پنج، ۱۵ و ۳۰ درصد کاهش کاهش‌یافته ولی در عین‌حال میزان تقاضای آب کشاورزی در محل هر آبگیر تغییر نکرده است. ارزیابی توزیع آب سطحی توسط مدل‌های بهره‌برداری توسعه داده‌شده این پژوهش توسط شاخص ارزیابی عملکرد «کفایت توزیع آب سطحی» انجام شد. شاخص‌های کفایت و پایداری به‌صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود (Molden and Gates, 1990):

$$PA = \frac{1}{T}\sum_{T}\left[\frac{1}{R}\sum_{R}\left(\frac{Q_D}{Q_R}\right)\right], \quad \text{رابطه ۳)}$$

که در آن، PA شاخص کفایت توزیع آب (درصد)، T مدت‌زمان بهره‌برداری (s)، R تعداد کل آبگیری‌های واقع در کانال اصلی، QD دبی تحویلی به هر آبگیر (m^3/s) و QR دبی تقاضای آب کشاورزی (m^3/s) است. هرچه مقدار شاخص کفایت به ۱۰۰ درصد نزدیک‌تر شود، مقدار مطلوب آن رخ داده است. با این‌حال، براساس طبقه‌بندی توصیه‌شده توسط Molden and Gates (1990) سه دسته که بیانگر بهره‌برداری مطلوب ($PA \in (90-100)$)، قابل‌قبول ($PA \in (80-90)$) و ضعیف ($PA \leq 80$) سیستم توزیع آب می‌باشد، قابل‌ارائه است (Afrasiabikia *et al.*, 2017).

۳. نتایج و بحث

۳. ۱. واسنجی و صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی جریان در کانال‌های آبیاری

به‌منظور واسنجی و صحت‌سنجی مدل ریاضی بهره‌برداری سامانه انتقال و توزیع شبکه آبشار با استفاده از شبیه‌ساز هیدرولیک جریان توسعه داده‌شده در این مطالعه، شاخص‌های آماری RMSE، CRM و MAE محاسبه و موردارزیابی قرار گرفت. این ارزیابی براساس شبیه‌سازی دوره بهره‌برداری ۱۵۰ روزه‌ای صورت گرفت که داده‌های بهره‌برداری، شامل دبی ورودی به کانال اصلی و دبی تحویلی به آبگیرها در طول کانال اصلی، در سطح کانال موردمطالعه اندازه‌گیری شده

بود. بر این اساس، ۷۵ روز از این ۱۵۰ روز برای واسنجی و ۷۵ روز برای صحت‌سنجی استفاده شد. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، واسنجی مدل به‌صورت آزمون و خطای دبی تحویلی به هر سازه آبگیر واقع در کانال اصلی آبشار انجام شد. نتایج واسنجی نشان داد که MAE، برای دوره واسنجی برابر ۰/۸۷ و برای دوره صحت‌سنجی۱/۲۳ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. مقدار بهینه این شاخص برابر صفر است، با توجه به این‌که مقادیر مذکور به مقدار بهینه نزدیک می‌باشند، لذا می‌توان نتیجه گرفت که مدل دقت مناسبی ارائه می‌نماید. شاخص CRM، برای دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی، به‌ترتیب برابر ۰/۰۰۲- و ۰/۰۰۷- می‌باشند، با توجه به این‌که بهترین میزان برای CRM صفر می‌باشد، مقادیر کم این شاخص حاکی از دقت قابل‌قبول مدل در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی است. درنهایت میزان شاخص RMSE، برای دوره واسنجی برابر ۰/۹۱ و برای دوره صحت‌سنجی ۱/۰۹ مترمکعب بر ثانیه به‌دست آمدند.

۳. ۲. شبیه‌سازی تحویل و توزیع آب سطحی در شبکه آبیاری آبشار

به‌منظور بررسی وضعیت توزیع آب سطحی در سامانه انتقال و توزیع در شبکه آبیاری آبشار، شبیه‌سازی بهره‌برداری وضع موجود به تفکیک هرکدام از کانال‌های اصلی (شاخه شمالی (راست) و شاخه جنوبی (چپ)) و فرعی توسط مدل کالیبره‌شده، انجام گرفت و نتایج استخراج شدند. ارزیابی تحویل و توزیع آب سطحی به‌صورت نقطه‌ای (به تفکیک هر سازه آبگیر)، منطقه‌ای (در سه ناحیه بالادست، میان‌دست و پایین‌دست) و کلی (منظور کل آبگیرهای واقع در امتداد هر کانال) با بهره‌گیری از شاخص کفایت تحویل و توزیع آب و به‌ازای سناریوهای مختلف انجام شد. جهت بررسی تحویل و توزیع آب در بخش‌های بالادست، میان‌دست و پایین‌دست کانال اصلی شاخه شمالی (راست)، شاخص کفایت در بخش‌های مذکور موردمحاسبه قرار گرفتند. خلاصه نتایج این بخش در شکل (۲) ارائه شده است. همان‌طورکه از این اشکال نمایان است، در همه سناریوها الگوی روند نزولی کفایت تحویل آب از آبگیرهای بالادست تا آبگیرهای پایین‌دست کاملاً مشهود است که ماهیت کنترل بالادست‌بودن روش بهره‌برداری و هم‌چنین دستی‌بودن سازوکار سازه‌های تنظیم و آبگیرها در کانال را به‌خوبی نشان می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده از ارزیابی عملکرد بهره‌برداری شبکه حاکی از ضعف مدیریت توزیع آب و ناکارآمدی شبکه در تحویل آب موردنیاز به‌ویژه در آبگیرهای واقع در میان‌دست و پایین‌دست شبکه و به‌ازای سناریوهای مختلف بهره‌برداری نرمال و کم‌آبی است.

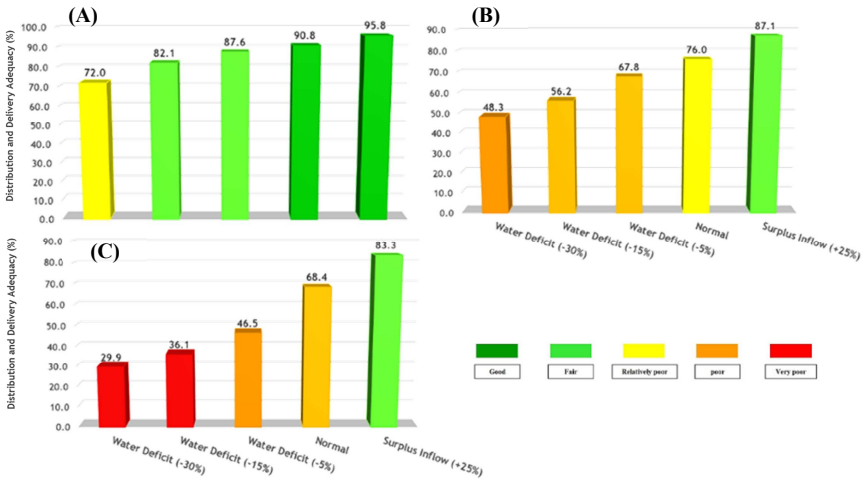

Figure 2. Regional operational appraisal results for the off-takes located at the (A) upstream, (B) midstream, and (C) downstream regions of the North main irrigation canal (Right Canal), Abshar Irrigation District

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، اولین گام در پیاده‌سازی یک چارچوب حسابداری آب به‌منظور ارتقای شیوه مدیریت تخصیص و توزیع آب در یک شبکه آبیاری، بررسی مکانی نحوه توزیع آب سطحی و در نتیجه تعیین سهم هرکدام از منابع آب سطحی و زیرزمینی در تأمین نیاز کشاورزی می‌باشد. در این راستا، در گام اول ارزیابی عملکرد بهره‌برداری انتقال و توزیع آب سطحی در شبکه آبیاری آبشار در برخورد با شرایط بهره‌برداری محتمل صورت گرفت. ارزیابی عملکرد بهره‌برداری بستری را ایجاد می‌کند که جنبه‌های مختلف سازه‌ای، هیدرولیکی و مدیریتی و هم‌چنین تعیین عوامل مؤثر در بهره‌برداری از شبکه، به‌منظور ارائه اقدامات لازم جهت بهبود وضعیت بهره‌برداری در صورت لزوم، انجام شود. در ادامه، به‌منظور ارائه تحلیل مکانی و ارزیابی عملکرد بهره‌برداری شبکه آبشار، مقدار متوسط شاخص محاسبه‌شده (کفایت تحویل و توزیع آب) به تفکیک سناریوهای مختلف بهرهبرداری موردنظر، با استفاده از نرم‌افزار GIS انجام شد. نتایج تحلیل مکانی، امکان بررسی و مقایسه مکانی پراکندگی مقادیر متوسط شاخص کفایت تحویل آب به آبگیرها تحت سناریوهای مختلف بهره‌برداری را فراهم نموده است.

نتایج تحلیل مکانی توزیع آب سطحی در محدوده شبکه آبیاری، به‌عنوان ورودی اصلی محاسبات جداول PSUT در ساختار SEEA-Water توسعه داده‌شده در این پژوهش استفاده شده است. این نتایج پراکندگی مکانی/ زمانی نحوه تأمین آب سطحی به محدوده‌های اقتصادی (منظور محدوده‌های کشاورزی مختلف در سطح شبکه آبیاری که از دیدگاه SEEA-Water به‌عنوان یک زیربخش اقتصادی تلقی می‌شود) را به‌صورت دقیق مشخص می‌نماید. در ادامه برای محاسبه دقیق سهم آب زیرزمینی در تأمین آب زیربخش‌های اقتصادی مذکور، از اطلاعات چاه‌های بهره‌برداری- اطلاعات مذکور از شرکت آب منطقه‌ای اصفهان اخذ شد- واقع در محدوده شبکه آبیاری آبشار استفاده شد. براساس اطلاعات جمع‌آوری‌شده مذکور، تعداد ۵۲۶۹ چاه کم عمق/ نیمه‌عمیق/ عمیق (عمق حداقل ۲ متر تا حداکثر ۳۰۰ متر) در محدوده این شبکه آبیاری قرار دارد که محدوده دبی برداشتی آن‌ها- براساس اطلاعات در دسترس- بین ۰/۲-۶۵ لیتر بر ثانیه متغیر می‌باشد. روش کار برای محاسبه میزان آب زیرزمینی برداشت‌شده در محدوده شبکه آبیاری به این‌صورت بود که با مقایسه لایه واحد زارعی درجه دو و درجه سه با لایه چاه‌ها در نرم‌افزار GIS، چاه‌های واقع در هر محدوده آبیاری مشخص شد و میزان کلی برداشت آب زیرزمینی به تفکیک زیربخش‌های اقتصادی مشخص شد.

برای محاسبه دقیق سهم آب زیرزمینی در تأمین آب زیربخش‌های کشاورزی شبکه آبیاری آبشار، از اطلاعات چاه‌های بهره‌برداری واقع در محدوده شبکه آبیاری آبشار استفاده شد. براساس اطلاعات جمع‌آوری‌شده مذکور، تعداد ۵۲۶۹ چاه کم عمق/ نیمه‌عمیق/ عمیق (عمق حداقل ۲ متر تا حداکثر ۳۰۰ متر) در محدوده این شبکه آبیاری قرار دارد که براساس اطلاعات در دسترس، محدوده دبی برداشتی آن‌ها بین ۰/۲ تا ۶۵ لیتر بر ثانیه متغیر می‌باشد. روش کار برای محاسبه میزان آب زیرزمینی برداشت‌شده در محدوده شبکه آبیاری به این صورت بود که با مقایسه لایه واحد زارعی درجه دو و درجه سه با لایه چاه‌ها در نرم‌افزار GIS، چاه‌های واقع در هر محدوده آبیاری مشخص شد. همان‌طور که در شکل (۳) قابل رؤیت است، روند توزیع آب سطحی در بخش‌های بالادست کانال‌های اصلی و نیز آبگیرهای واقع در بالادست هر کانال اصلی و فرعی که موقعیت نزدیک‌تری به بند انحرافی دارند، مناسب و در سایر مناطق غیرقابل اعتماد است. لازم به توضیح است که در سایر شبکه‌های آبیاری کشور ایران نیز همین روند کلی دیده می‌شود و سیستم‌های انتقال، توزیع و تحویل آب سطحی به‌ویژه در شبکه کانال‌های آبیاری روباز به هم پیوسته در کشور از عملکرد خوبی برخوردار نیستند. بنابراین، ناکارآمدی مدیریت بهره‌برداری حال حاضر شبکه‌های آبیاری در تحویل و توزیع مناسب آب کشاورزی (که از منابع آب سطحی تأمین شده است) موجب شده که اکثر اراضی زراعی که باید تحت پوشش آب سطحی باشند، به‌دلیل عدم‌کفایت در توزیع منابع آب سطحی و ناپایداری در تحویل آب، به‌طور چشم‌گیری وابسته به منابع آب

زیرزمینی شده‌اند. شبکه آبیاری آبشار نیز مستثنی از این روند نبوده و همان‌طور که نتایج ارزیابی عملکرد نشان می‌دهد بهبود مدیریت بهره‌برداری از سامانه‌های انتقال، توزیع و تحویل آب ضروری است، تا ضمن کاهش تلفات بهره‌برداری در آن‌ها، وابستگی کشاورزان واقع در این محدوده‌ها به آب زیرزمینی نیز کاهش یابد.

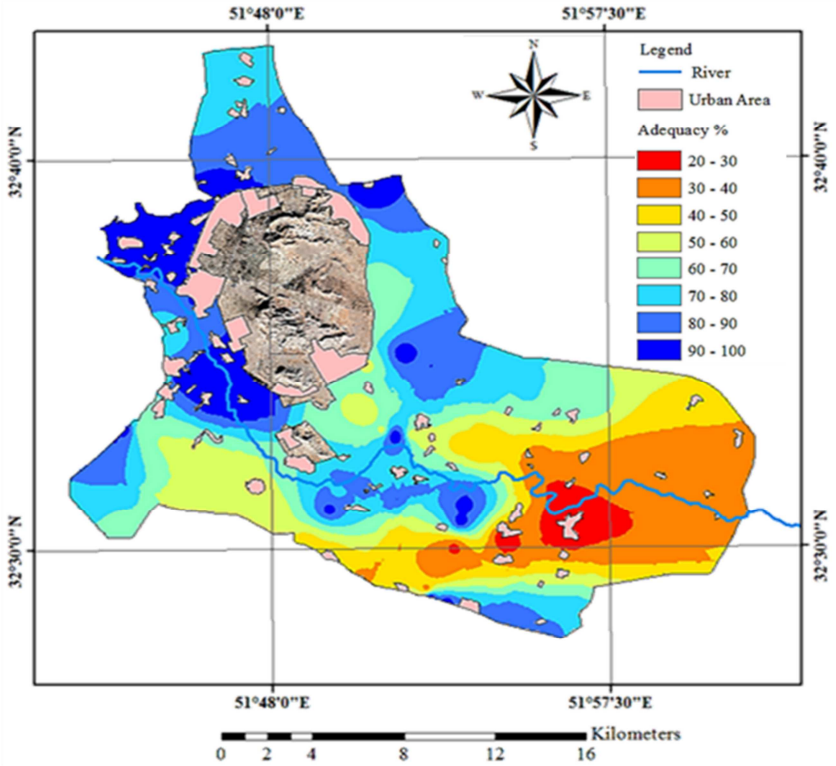

Figure 3. Spatial Distribution of surface water distribution – based on the adequacy indicator values within the Abshar Irrigation District

۳. ۳. کمیل جدول تأمین فیزیکی آب از سری جداول PSUT روش حسابداری SEEA-Water

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، در این پژوهش تلاش شد تا با باز تعریف المان‌های مختلف جداول PSUT، چیدمان جدول تغییر نکرده و تنها اجزای مختلف هر جدول براساس محدوده مطالعاتی هدف این پژوهش- شبکه آبیاری و زهکشی آبشار- باز تعریف شود. تأمین فیزیکی به دو بخش تقسیم می‌شود؛ بخش اول جریان‌های آب در اقتصاد را توصیف می‌کند، مانند توزیع آب از یک صنعت به صنعت دیگر یا بین خانوارها. بخش دوم جریان‌هایی را که از اقتصاد به محیط‌زیست وارد می‌شود، مانند تخلیه آب به محیط‌زیست توصیف می‌کند. بخش‌هایی از جدول تأمین فیزیکی آب در ساختار SEEA-Water که قابلیت اندازه‌گیری و تکمیل اطلاعات آن در مقیاس یک شبکه آبیاری و زهکشی قابل حصول است به شرح ذیل می‌باشد.

۳. ۳. ۱. در قسمت تأمین آب برای سایر واحدهای اقتصادی (Supply of water to other economic units of which) زیربخش اقتصادی (Within the economy)

- بخش کشاورزی (goes to Agriculture): قابل استفاده و محاسبه در شبکه‌های آبیاری ایران

– بخش شهرک‌های صنعتی (Goes to Manufacture Industry): قابل اندازه‌گیری و استفاده در مقیاس شبکه آبیاری نیست ولی در ساختار SEEA-Water که در مقیاس حوضه آبریز توسعه داده شده باشد، قابل استفاده است.

– بخش مصارف خانگی (goes to Households): قابل اندازه‌گیری و استفاده در مقیاس شبکه آبیاری نیست اما در ساختار SEEA-Water که در مقیاس حوضه آبریز توسعه داده شده باشد، قابل استفاده است.

– بخش تصفیه‌شده خانگی (Reused water): قابل اندازه‌گیری و استفاده در مقیاس شبکه آبیاری نیست اما در ساختار SEEA-Water که در مقیاس حوضه آبریز توسعه داده شده باشد، قابل استفاده است.

– پساب فاضلاب (Wastewater to sewerage): در آن دسته از شبکه‌های آبیاری قابل استفاده است که یکی از سیستم‌های تأمین آب آن پساب تصفیه شده باشد.

– آب نمک‌زدایی‌شده (Desalinated water): غیرقابل استفاده در شبکه‌های آبیاری ایران

۳. ۳. ۲. در قسمت آب رهاشده به بخش محیط‌زیست (Into the environment) در زیربخش مجموع آب برگشتی (Total returns)

– تولید برق– آبی (Hydroelectricity power generation): قابل محاسبه و اندازه‌گیری در شبکه‌های آبیاری که یا نیروگاه های کوچک مقیاس برق– آبی در مسیر خود دارند یا دارای ژنراتورهای درون مسیری هستند.

– در زیر بخش آب آبیاری (irrigation water): در همه شبکه‌های آبیاری قابل‌حصول است.

– در زیر بخش آب مورداستفاده در معادن (Mine water): قابل اندازه‌گیری و استفاده در مقیاس شبکه آبیاری نیست اما در ساختار SEEA-Water که در مقیاس حوضه آبریز توسعه داده شده باشد، قابل استفاده است.

– در زیر بخش رواناب شهری (Urban runoff): قابل اندازه‌گیری و استفاده در مقیاس شبکه آبیاری نیست اما در ساختار SEEA-Water که در مقیاس حوضه آبریز توسعه داده شده باشد، قابل استفاده است.

– در زیر بخش مصارف آب جهت خنک‌سازی صنعتی (Cooling water): قابل اندازه‌گیری و استفاده در مقیاس شبکه آبیاری نیست ولی در ساختار SEEA-Water که در مقیاس حوضه آبریز توسعه داده شده باشد، قابل استفاده است.

– تلفات آب ناشی از نشت در مسیر سیستم انتقال آب (Losses in distribution because of leakages): قابل محاسبه و اندازه‌گیری در همه شبکه‌های آبیاری.

– پساب فاضلاب تصفیه شده (Treated wastewater): در آن دسته از شبکه‌های آبیاری قابل استفاده است که یکی از سیستم‌های تأمین آب آن پساب تصفیه شده باشد.

– در زیربخش سایر مصارف (Other): آن دسته از شبکه‌های آبیاری که کشاورزان علاوه بر زراعت اقدام به پروش ماهی، دامداری و ... می‌نمایند.

زیربخش آب برگشتی به منابع آب داخل حوضه (To inland water resources)

– در زیربخش آب سطحی (Surface water): در همه شبکه‌های آبیاری و زهکشی به شرطی قابل‌حصول است که میزان آب زهکش‌ها قابل اندازه‌گیری باشد، یا مقادیر آن توسط مدل‌های شبیه‌ساز تخمین زده شده باشد.

– در زیر بخش آب زیرزمینی (Groundwater): در اکثر شبکه‌های آبیاری قابل‌حصول است به شرط وجود مدل‌های شبیه‌ساز (مدل‌های شبیه‌ساز آب زیرزمینی) و آمار اطلاعات اندازه‌گیری‌شده نفوذ آب به آبخوان

– در زیربخش رطوبت خاک (Soil Water): در اکثر شبکه‌های آبیاری قابل‌حصول است به شرط وجود مدل‌های

شبیه‌ساز (مدل‌های شبیه‌ساز آب زهکشی‌شده از سطح مزرعه) و آمار اطلاعات اندازه‌گیری‌شده نفوذ آب به لایه‌های میانی زیر مزرعه

– در زیربخش سایر منابع (other sources): به‌طور عمده در شبکه‌های آبیاری ایران مورد خاصی در این زمینه گزارش نشده است.

۳. ۳. ۳. در بخش درون واحدهای اقتصادی (Within the economy)

تأمین آب برای سایر بخش‌های اقتصادی (4. Supply of water to other economic units of which)

منظور از تأمین آب سایر واحدهای اقتصادی، میزان آبی است که توسط یک واحد اقتصادی به واحد دیگر تأمین می‌شود. عرضه آب بدون تلفات در توزیع ثبت می‌شود. عرضه به سایر واحدهای اقتصادی عموماً از طریق شبکه اصلی انجام می‌شود، اما می‌تواند از طریق کانال‌ها یا لوله (عموماً در یک شبکه آبیاری)، کامیون‌ها و وسایل دیگر نیز انجام شود. بسته به تک‌هدفه‌بودن یا چندهدفه‌بودن بهره‌برداری کانال اصلی شبکه آبیاری، می‌توان اطلاعات موردنظر برخی آیتم‌ها را اندازه‌گیری و ثبت نمود. به‌عنوان مثال، اگر کانال اصلی علاوه بر انتقال و توزیع آب آبیاری، وظیفه انتقال آب شرب روستا، شهرک صنعتی کوچک، مصرف خدمات شهری و فضای سبز و تأمین آب استخرهای پرورش ماهی یا صنایع غذایی واقع در محدوده شبکه آبیاری را داشته باشد، اندازه‌گیری میزان آب مبادله‌شده بین این اجزا با کانال اصلی قابل محاسبه است.

۳. ۳. ۴. در بخش محیط زیست (into the Environment)

تلفات ناشی از نشت آب در سیستم انتقال و توزیع آب آبیاری (Losses in distribution because of leakages)

– اطلاعات مرتبط با این آیتم– در ساختار حسابداری آب در یک شبکه آبیاری و زهکشی– به دو صورت قابل اندازه‌گیری یا استحصال است؛ ۱– اندازه‌گیری‌های میدانی و محاسبه نشت براساس فرمول‌های تجربی، ۲– شبیه‌سازی میزان نشت از کانال‌های توزیع و انتقال آب آبیاری با استفاده از روش‌ها/ مدل‌های عددی تخمین نشت.

سایر (Other)

در این قسمت می‌توان به تلفات آب در کانال‌های اصلی (درجه یک و درجه دو) و کانال‌های فرعی (کانال‌های درجه سه و درجه چهار) اشاره نمود که منشأ آن می‌تواند ۱– روش‌های سنتی بهره‌برداری و به‌ویژه روش بهربرداری بالادست که در آن گاها از سازه‌های تنظیم سطح آب خودکار هیدرولیکی– مانند سازه‌های تنظیم سطح آب آمیل که در اغلب شبکه‌های آبیاری کشور ایران دیده می‌شود– استفاده می‌شود، ۲– بهره‌برداری نادرست، سنتی و مبتنی بر دانش کم (هیدرولیک و بهره‌برداری) آب بران و تیم‌های بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری، باشد. مانند آیتم پیشین، محاسبه این حجم از تلفات به دو شیوه قابل محاسبه است؛ ۱– پیاده‌سازی ایستگاه‌های اندازه‌گیری مجهز به حس‌گرهای الکترونیکی پارامترهای هیدرولیکی جریان– سرعت و عمق جریان– که قار به اندازه‌گیری و مخابره اطلاعات به‌صورت لحظه‌ای می‌باشند. این ایستگاه‌های اندازه‌گیری باید در نقاط کلان تحویل در یک شبکه آبیاری (مانند ورودی اصلی به شبکه اصلی و ابتدای کانال‌های درجه دو و درجه سه) و نیز تمام خروجی‌های ممکن (انتهای کانال‌ها و قبل و بعد از سازه‌های تقاطعی با زهکش‌های اصلی و فرعی و سازه‌های هیدرولیکی حفاظتی در طول مسیر کانال (به‌ویژه سرریزهای جانبی در محل تقاطع کانال‌ها آبیاری و زهکش‌ها) نصب شود، ۲– بهره‌گیری از مدل‌های شبیه‌ساز هیدرودینامیک جریان که قابلیت شبیه‌سازی پارامترهای هیدرولیک جریان در کانال‌های آبیاری را دارا می‌باشند. این مدل‌ها می‌تواند مدل‌های

شبیه‌ساز عددی (مانند HEC-RAS; SOBEK, CANALMAN, SWMM) و یا مدل‌های ریاضی ساده شده (که به‌طور عمده یا مبتنی بر روش‌های روندیابی جریان هستند یا با ساده‌سازی معادلات سنت ونانت حاصل شده‌اند) باشند.

لازم به توضیح است که علاوه بر ارائه نسخه بومی‌شده جدول تأمین فیزیکی آب مورداستفاده در شبکه‌های آبیاری و زهکشی در جدول (۱)، مقادیر محاسبه‌شده برای منطقه موردمطالعه این پژوهش ارائه شده است. با توجه به این‌که هدف اصلی از به‌کارگیری روش‌های حسابداری آب، ارتقای نحوه مدیریت اطلاعات و داده‌ها برای بهبود قدرت تصمیم‌گیری مدیران و تصمیم‌گیران است، ارایه میزان آب تأمین شده به تفکیک محصولات و به تفکیک منابع آب سطحی، زیرزمینی و رطوبت خاک می‌تواند به‌عنوان یکی از المان‌های مؤثر در ارتقای مدیریت آب کشاورزی منجر شود.

Table 1. The modified version of the Physical Supply Table (physical units) of PSUTs in SEEA-Water framework for irrigation and drainage districts & its customized and calculated parameters for the Abshar Irrigation & Drainage District per individual crops

B. Physical supply table (physical units)		Agriculture 1-3							Total
		Wheat	Melon	Squash	Onion	Beans	Clover	Gardens	
Cropping Pattern Cultivated Area (ha)		9240	277	462	2310	1925	327	970	15511
Cropping Patern Cultivated Area Density (%)		59.5706	1.7858	2.9785	14.8927	12.4105	2.1082	6.2536	100
4. Supply of water to other economic units of which:		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Within the economy	4.i. goes to Agriculture								
	4.ii. Goes to Manufacture Industry								
	4.iv. Goes to Services								
	4.v. goes to Households								
	4.a. Reused water								
	4.b. Wastewater to sewerage *(Drainage Canals (MCM)) - Drained to Econ.*	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	4.c. Desalinated water								
5. Total returnes (= 5.a + 5.b)		20.9806	0.6290	1.0490	5.2451	4.3710	0.7425	2.2025	35.2197
Into the environment	*Hydroelectric power generation*								
	Irrigation water	20.9806	0.628963761	1.049029811	5.24514906	4.370957546	0.74249513	2.20250848	35.2197
	Mine water								
	Urban runoff								
	Cooling water								
	Losses in distribution because of leakages (MCM)	3.87804784	0.116257495	0.193902392	0.96951196	0.807926633	0.1372426	0.40711108	6.5100
	Treated wastewater								
	***Other** (Losses in distribution not because of leakages) Operational Losses (MCM) - Drained to ENV.*	10.5467	0.3162	0.5273	2.6367	2.1972	0.3732	1.1072	17.7045
	5.a. To inland water resources	20.9806	0.6290	1.0490	5.2451	4.3710	0.7425	2.2025	35.2197
	5.a.1. Surface water (*Total Losses (MCM)*)	14.4247	0.4324	0.7212	3.6062	3.0052	0.5105	1.5143	24.2145
	5.a.2. Groundwater	1.6390	0.0491	0.0819	0.4097	0.3415	0.0580	0.1721	2.7513
	5.a.3. Soil water	4.9169	0.1474	0.2458	1.2292	1.0244	0.1740	0.5162	8.2539
	5.b. To other sources (e.g. sea water)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6. Total supply of water (= 4 + 5) (MCM)		20.98060	0.62896	1.04903	5.24515	4.37096	0.74250	2.20251	35.21970
7. Water consumption (= 3 - 6) of which (MCM)		49.8510	1.4944	2.4925	12.4627	10.3856	1.7642	5.2333	83.6838

۴. نتیجه‌گیری

ازآنجاکه سیستم‌های حسابداری آب به‌عنوان یکی از ابزارهای مهم پیاده‌سازی مفهوم مدیریت یکپارچه منابع آب به‌شمار می‌رود، بهره‌مندی از پتانسیل سیستم مذکور (جمع‌آوری، طبقه‌بندی، ثبت و گزارش‌دهی داده‌ها و اطلاعات کمی و کیفی) سازوکاری را فراهم می‌آورد که متولیان و مدیران منابع آب بتوانند با آگاهی کامل از وضعیت موجود، تصمیم‌ها و راهبردهای سیاستی خود را در بخش آب اتخاذ نمایند و از شاخص‌های به‌دست‌آمده از آن، مسائل و مشکلات بین‌بخشی منابع آب (اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی) در مناطق مختلف را به‌صورت کارا و بهینه مدیریت نمایند. در این راستا، این پژوهش برای اولین بار در ایران، اقدام به ارائه یک روش سیستمیک به‌منظور تدقیق سهم آب سطحی و زیرزمینی در پیاده‌سازی روش حسابداری آب اقتصادی- زیست‌محیطی در محدوده یک شبکه آبیاری نمود. دلیل انتخاب محدوده مدیریتی در مقیاس شبکه آبیاری و زهکشی، علاوه بر توصیه توسعه‌دهنگان این روش حسابداری آب در انتخاب محدوده‌های مدیریتی کوچک‌تر به‌منظور کاهش عدم قطعیت مرتبط با داده‌ها و اطلاعات جمع‌آوری‌شده، محاسبه‌شده و یا شبیه‌سازی‌شده، به عملکرد ضعیف و دور از انتظار شبکه‌های آبیاری در کشور و ضرورت بهبود عملکرد بهره‌برداری آن‌ها در راستای افزایش بهره‌وری آب محسوب می‌شود.

ارزیابی عملکرد بهره‌برداری شبکه آبیاری موردمطالعه با استفاده از شبیه‌ساز هیدرولیک جریان بستری را ایجاد کرد که جنبه‌های مختلف سازه‌ای، هیدرولیکی و مدیریتی و هم‌چنین تعیین عوامل مؤثر در بهره‌برداری از شبکه، به‌منظور ارائه اقدامات لازم جهت بهبود وضعیت بهره‌برداری در صورت لزوم، قابل انجام باشد. ارزیابی عملکرد وضعیت بهره‌برداری سامانه‌های اصلی و فرعی انتقال و توزیع آب کشاورزی شبکه آبیاری آبشار، امکان تحلیل مکانی توزیع آب سطحی در محدوده شبکه آبیاری فراهم نمود. نتایج شبیه‌سازی عملکرد سیستم بهره‌برداری آب سطحی امکان انطباق مناسب‌تر برداشت آب زیرزمینی در محدوده شبکه و نیاز آب آبیاری هر واحد زراعی را به نحو مناسبی ممکن ساخت. در نتیجه، مقادیر تلفات آب در سیستم اصلی و فرعی بهره‌برداری با مقایسه مقادیر توزیع آب سطحی شبیه‌سازی‌شده، مقادیر آب زیرزمینی برداشت‌شده، مقادیر حقابه کشاورزی، مقدار نیاز آبی برآوردشده با توجه به الگوی کشت و نیز مقادیر توزیع آب ثبت‌شده توسط شرکت بهره‌برداری شبکه آبیاری، به تفکیک واحدهای زراعی درجه سه امکان‌پذیر شد. بررسی نتایج به‌دست‌آمده در جلسات مختلف با متخصصین امر بهره‌برداری، دفتر امور آب شهرستان، بهره‌بردارن محلی و شرکت بهره‌بردار این شبکه آبیاری نشان داد که روش سیستمیک ارائه‌شده در این پژوهش در راستای دست‌یابی به هدف اصلی این پژوهش (تهیه جداول حسابداری آب براساس سهم هر یک از منابع آبی)، قابل ارائه به تفکیک روستاها/ محصولات زراعی الگوی کشت/ واحدهای زراعی درجه سه و درجه دو می‌باشد. از طرف دیگر، با عنایت به این موضوع که مدیریت مشارکتی در مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی یا سایر امور مدیریتی در این زمینه از جمله تعادل بخشی آبخوان‌ها، دارای اولویت بالا برای متولیان آب کشور است، به‌کارگیری روش ارائه‌شده در این پژوهش به‌منظور تعیین سهم منابع آب به تفکیک واحدهای مدیریتی که منطبق بر واحدهای سیاسی بوده و مراجع تصمیم‌گیر محلی یا منطقه‌ای مشخصی داشته باشد، بر اهمیت اجرای سریع‌تر و مؤثرتر این قبیل امور مشارکتی می‌افزاید.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. European Environment Agency (EEA)
2. Physical Supply Use Tables (PSUTs)
3. The System of Environmental-Economic Accounting for water (SEEA-Water)
4. Integrator-Delay (ID) Model

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

Afrasiabikia, P., Parvaresh Rizi, A., & Javan, M. (2017). Scenarios for improvement of water distribution in Doroodzan irrigation network based on hydraulic simulation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 135, 312-320.

ESCAP, U. (2017). Environment Statistics and System of Environment-Economic Accounting (SEEA): national assessment report.

Gan, H., Wang, Y., Lu, Q., Vardon, M., & Chanchai, A. (2012). Development and Application of the System of Environmental–Economic Accounting for Water in China. International Water Accounting: Effective Management of a Scarce Resource. Edward Elgar Publishing Inc., New York, 139-161.

Karimi Avargani, H., Hashemy Shahdany, S. M., Hashemi Garmdareh, S. E., & Liaghat, A. (2020). Determination of Water Losses through the Agricultural Water Conveyance, Distribution, and Delivery System, Case Study of Roodasht Irrigation District, Isfahan. *Water and Irrigation Management*, 10(1), 143-156. (In Persian)

Karimi, P., Bastiaanssen, W. G., & Molden, D. (2013). Water Accounting Plus (WA+)–a water accounting procedure for complex river basins based on satellite measurements. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(7), 2459-2472.

Molden, D. J., & Gates, T. K. (1990). Performance measures for evaluation of irrigation-water-delivery systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 116(6), 804-823.

Momblanch, A., Pedro-Monzonís, M., Solera, A., & Andreu, J. (2018). Water accounting for integrated water resources management: Experiences and recommendations. *In Advances in Chemical Pollution, Environmental Management and Protection*, 3, 63-96. Elsevier.

Peranginangin, N., Sakthivadivel, R., Scott, N.R., Kendy, E. and Steenhuis, T.S., 2004. Water accounting for conjunctive groundwater/surface water management: case of the Singkarak–Ombilin River basin, Indonesia. *Journal of Hydrology*, 292(1-4), 1-22.

Razavi, S., Davary, K., & Davary, A. (2020). Water balance challenges in IRAN and provides a framework for improving it. *Journal of Water and Sustainable Development*, 7(3), 88-93.

Schuurmans, J., Schuurmans, W., Berger, H., Meulenberg, M., & Brouwer, R. (1997). Control of Water Levels in the Meuse River. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123(3), 180-184.

Van Overloop, P. J., Negenborn, R. R., De Schutter, B., & Van De Giesen, N. C. (2010). Predictive Control for National Water Flow Optimization in The Netherlands. *Intelligent Infrastructures*, 42, 439-461.

Vardon, M., Keith, H., & Lindenmayer, D. (2019). Accounting and valuing the ecosystem services related to water supply in the Central Highlands of Victoria, Australia. *Ecosystem Services*, 39, 101004.