تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال نوزدهم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲، ویژه‌نامه تخصصی: دریاچه ارومیه
Volume 19, No. 2, Summer 2023 (IR-WRR), Special Issue: Urmia Lake
۵۴-۷۰

سنجش نوآورانه شاخص فقر آبی بر پایه مدل‌های ریاضی-تحلیلی مؤثر و داده‌محور در استان آذربایجان‌غربی

رضا سبحانی[۱]، علیرضا عمادی[۲*]، رامین فضل‌اولی[۳] و سروین زمان‌زاد قویدل[۴]

چکیده

در سال‌های اخیر، با توجه به پدیده‌های خشک‌سالی، افزایش جمعیت و کاهش ذخایر آب‌های زیرزمینی، سنجش فقر آبی ضروری است. هدف اصلی در این مطالعه ارزیابی کمی و کیفی فقر منابع آب زیرزمینی بر اساس دو روش نوآورانه ریاضی-تحلیلی مؤثر و داده‌محور با درنظر گرفتن فاکتورهای شش‌گانه ظرفیت، محیط‌زیست، زیرساخت‌ها و دسترسی‌ها، منابع آب، مدیریت و اقلیم (۵۷ متغیر) (۱۳۹۸-۱۳۹۰) در استان آذربایجان‌غربی، است. ارزش شاخص فقر آبی جامع در دو مدل ریاضی-تحلیلی مؤثر و داده‌محور به ترتیب ۵۳/۰۳ و ۵۳/۶۷ به دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که در مدل‌های مذکور فاکتورهای منابع آب، مدیریت و اقلیم باعث ایجاد ناپایداری نسبی در سامانه‌های منابع آب زیرزمینی، می‌شود. بر اساس نتایج، شاخص فقر آبی جامع از سال ۱۳۹۰ تا سال ۱۳۹۶ روند صعودی داشته است، در حالیکه بعد از اجرای طرح‌ها و پروژه‌های مرتبط با مدیریت منابع آب زیرزمینی مقدار این شاخص نسبتاً به وضعیت ثابت رسیده است. سال‌های ۱۳۹۰، ۱۳۹۲ و ۱۳۹۶ به ترتیب نقطه عطف تغییر حالت شاخص فقر آبی جامع از حالت خیلی کم به کم، کم به متوسط و متوسط به زیاد، است. لحاظ نمودن فاکتور اقلیم به همراه پدیده‌های کلیماتولوژی حدی در سنجش فقر آبی جامع به عنوان یکی از نوآوری‌های منحصربفرد تحقیق حاضر می‌تواند در نحوه تصمیم‌گیری‌ها و تدوین برنامه‌های مدیریتی در صنعت آب، نقشی کلیدی ایفا کند. همچنین، توسعه مدل داده‌محور جهت سنجش شاخص فقر آبی با توجه به کاهش تعدد متغیرهای لحاظ شده، می‌تواند در جلوگیری از اتلاف زمان، هزینه و منابع در انجام مطالعات پروژه‌های مرتبط با صنعت آب، بسیار مؤثر واقع شود. نهایتاً، بررسی تأثیر دو زیرپروژه مرتبط با طرح احیاء و تعادل‌بخشی آب‌های زیرزمینی، شامل: ۱- طرح تجهیز چاه‌ها به ابزار اندازه‌گیری هوشمند و ۲- پروژه فرهنگ‌سازی و اطلاع‌رسانی، بر میزان شاخص فقر آبی نشان داد که پروژه‌های مذکور در مواردی نیاز به اصلاحات مدیریتی دارند که بایستی مورد توجه مدیران و سیاست‌گذاران قرار گیرند.

کلمات کلیدی: آب‌های زیرزمینی، داده‌محور، ریاضی-تحلیلی، فقر آبی.
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۸/۶
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۲۷

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.
۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.
۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.
۴- مدیر پروژه و رئیس هیئت مدیره شرکت مهندسین مشاور دانشوران عمران-آب، ارومیه.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۴۰۲ امکانپذیر است.

Innovative Measurement of Water Poverty Index in West Azerbaijan Province Based on Effective Data-Mining Mathematical-Analytical Models

R. Sobhani [1], A. Emadi [2], R. Fazloula[3], and S. Zamanzad-Ghavidel[4]*

Abstract

In recent years, due to drought, population growth, and the decline in groundwater reserves, the water poverty became an essential measure to consider. The main objective of this study is to quantitatively and qualitatively assess the of groundwater resources poverty based on two innovative effective and data-mining mathematical-analytical methods considering the six factors of capacity, environment, infrastructure and access, water resources, management and climate (57 variables) in the West Azerbaijan province for the period of 1390-1398 (2011-2019). The value of comprehensive water poverty index was obtained as 53.03 and 53.67 in two effective and data-mining mathematical-analytical models, respectively. The results showed that for the models the factors of water resources, management and climate cause relative unsustainability in groundwater resources systems. The comprehensive water poverty index has increased from 2012 to 2018, while the value of this index has reached a relatively stable status after the implementation of plans and projects related to groundwater resources management. The years 2011, 2013, and 2017 are respectively the milestones for the change of the status of the comprehensive water poverty index from very low to low, low to medium, and medium to high. As one of the unique innovations of the current research, considering the climate factor along with the extreme climatology phenomena in measuring comprehensive water poverty can play a key role in decision making and formulating management plans in water sector. Also, the development of a data-mining model which reduces the number of variables included in the measurement of the water poverty index, can effectively reduce the time, cost and resources used for the water projects. Finally, investigating the effect of the two sub-projects related to the Groundwater reclamation and balancing plan i.e. 1) equipping wells with smart measuring tools, and 2) culture and information project, on the water poverty index showed that the mentioned projects in some cases require management reforms that should be taken into consideration by the managers and the policy makers.

Keywords: Groundwater, Data-Mining, Mathematical-Analytical, Water Poverty.
Received: November 7, 2022
Accepted: January 17, 2023

1- Ph.D. Student of Water Structures, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. Email: rezasobhani.sn@gmail.com
2- Associate Professor, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. Email: emadia355@yahoo.com
3-Associate Professor, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. Email: raminfazl@yahoo.com.
4- Project Manager and Chairman of the Board at Daneshvaran Omran-Ab Consulting Engineers, Urmia, Iran. Email: snzghavidel@ut.ac.ir
*- Corresponding Author
Dor: 20.1001.1.17352347.1402.19.2.4.1

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، با توجه به پدیده‌های خشک‌سالی و کاهش ذخایر آب‌های سطحی و زیرزمینی، اهمیت منابع آب به‌عنوان عنصر اساسی برای ادامه زندگی موجودات زنده واضح و آشکار است. برای اینکه بتوان سیاست‌ها و راهکارهای ارائه شده را ارزیابی نموده و به میزان فقر آبی از دیدگاه‌های مختلف پی برد، نیاز است فاکتورهایی از جمله شاخص‌های کارایی اقتصادی، پایداری زیست‌محیطی، رفاه و عدالت اجتماعی و غیره برای ارزیابی سامانه منابع آب انتخاب شود (Carley and Christie, 2017; Garrick et al., 2017). توسعه پایدار[۱] در حقیقت ایجاد تعادل میان توسعه، محیط‌زیست و اکوسیستم با درنظر گرفتن اهداف اقتصادی، اجتماعی، سیاسی، فرهنگی و زیست‌محیطی است (Song et al., 2019). بررسی اندرکنش سامانه‌های آب و فاکتورهای مختلف نه تنها برای مشخص شدن وضعیت پایداری ضروری است، بلکه در نحوه تصمیم‌گیری و مدیریت سامانه‌های منابع آب نیز مؤثر است (Walker, 2015). از جمله روش‌های سنجش فقر آبی و پایداری سامانه‌های منابع آب می‌توان به مدل‌های ریاضی–تحلیلی اشاره کرد که بر اساس آن سنجش شاخص فقر آبی جامع[۲] (CWPI) می‌تواند شامل فاکتورهای ظرفیت[۳]، محیط‌زیست[۴]، زیرساخت‌ها و دسترسی‌ها[۵]، منابع آب[۶]، مدیریت[۷] و اقلیم[۸] باشد. همچنین، کاربرد روش‌های داده‌محور در بخش‌های مختلف علوم آب توسط محققین به اثبات رسیده است، در حالیکه این روش‌ها می‌توانند به عنوان ابزاری برای شناسایی اهمیت متغیرها، جایگزین مناسبی برای روش‌های آماری قدیمی در علوم چندشاخه آب–اجتماعی باشند (Zamanzad-Ghavidel et al., 2021).

Staben et al. (2010) پایداری منابع آب را بر اساس روش‌های ریاضی–تحلیلی اندازه‌گیری نمودند. نتیجه مطالعات ایشان منجر به ارائه یک چارچوب جامع برای اندازه‌گیری پایداری حفاظت از منابع و تأمین آب، مسئولیت اجتماعی و توسعه اقتصادی دراز مدت، شد. Shilling et al. (2013) منابع آب کالیفرنیا را با کمک چارچوبی بر اساس شاخص‌های پایداری منابع آب مورد مطالعه قرار دادند. Brown et al. (2015) در مطالعه‌ای به تجزیه و تحلیل سامانه‌های منابع آب در برنامه‌ریزی مدیریتی هاروارد[۹]، پرداختند. Gonzales and Ajami (2015) یک چارچوب شاخص مدیریت آب را در مقیاس منطقه‌ای تدوین کردند. El-Gafy (2015) با به کارگیری شاخص فقر آب متشکل از متغیرهای ظرفیت، منابع آب، کاربری، دسترسی و محیط‌زیست، به‌عنوان ابزاری برای اصلاح استراتژی‌های آب در مصر پرداخت. Naubi et al. (2017) یک شاخص پایداری در رودخانه اسکادای[۱۰] برای تجزیه و تحلیل پایداری آب آن رودخانه توسعه دادند. Friesen et al. (2017) جهت دستیابی به راهکارهای مدیریت یکپارچه منابع آب به ارزیابی ابعاد زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی پرداختند. نتایج ایشان حاکی از این بود که مدیریت یکپارچه منابع آب یک رویکرد جامع برای تمرکز بر محیط‌زیست، عوامل اجتماعی و اقتصادی مؤثر در تأمین آب جوامع به ویژه مناطق با شرایط اقلیمی نیمه‌خشک است. Sullivan et al. (2017) اهمیت دستیابی به پایداری مدیریت منابع آب را با مطالعه منابع آب حوضه رودخانه کلرادو، ایالات متحده توصیف کرد. Kefayati et al. (2018) پایداری یک حوزه آبخیز را با استفاده از یک چارچوب شاخص جامع منابع آب بررسی کردند. Bui et al. (2018) با انتخاب سیزده شاخص پایداری به ارزیابی پایداری اجتماعی منابع آب زیرزمینی هانوی[۱۱] در ویتنام[۱۲] پرداختند. نتایج مطالعات ایشان حاکی از کمبود و نامناسب بودن کیفیت منابع آب هانوی است. Liang et al. (2020) بر اساس فاکتورهای وضعیت منابع آب، سامانه توسعه و بهره‌برداری از منابع آب، سامانه حفاظت و مدیریت منابع آب و سامانه اجتماعی–اقتصادی به توسعه شاخص جامعی برای ارزیابی پایداری منابع آب در استان سیچوان[۱۳] پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که با کم شدن منابع آب، ظرفیت توسعه پایدار نیز کاهش می‌یابد. Singh and Bhakar (2021) بر اساس پنج بعد منابع آب زیرزمینی، سلامتی اکوسیستم، سلامتی بشر، در دسترس بودن زیرساخت‌ها و ظرفیت‌ها و ۱۵ متغیر به توسعه شاخص پایداری آب‌های زیرزمینی در منطقه خشک غربی راجستان، هند پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که آینده منابع آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه در خطر است. Zamanzad-Ghavidel et al. (2021) با توسعه شاخص پایداری سامانه‌های منابع آب در ۳۵ کشور قاره آمریکا به اهمیت توسعه شاخص پایداری با ابعاد اجتماعی–اقتصادی–زیست‌محیطی در مدیریت یکپارچه منابع آب پرداختند. Crispim et al. (2021) به توسعه شاخص پایداری آب روستایی در ۲۶ روستای کشور برزیل پرداختند. ایشان بر اساس نظرسنجی از ۱۶۵ متخصص و به کارگیری روش دلفی، وزن تأثیر هر یک از متغیرهای مرتبط با ابعاد مختلف ظرفیت، منابع آب، کاربری، دسترسی و محیط زیست را تعیین کرده و شاخص مذکور را توسعه دادند. نتایج ایشان نشان داد که شاخص توسعه یافته می‌تواند در سایر کشورها نیز کاربرد داشته باشد.

با توجه به اینکه کشور ایران در اقلیم خشک و نیمه‌خشک قرار دارد، دچار کمبود منابع آب جهت رفع نیازهای بشری است. در این پژوهش، استان آذربایجان‌غربی که وضعیت کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی آن با چالش‌های جدی روبه رو است، جهت ارزیابی شاخص فقر آبی

انتخاب شد. در این استان در دهه اخیر طرح‌های کاربردی متعددی به مرحله اجرا رسیده است که در مواردی بنابه دلایل مختلف که می‌تواند ناشی از فاکتورهای ظرفیت، محیط‌زیست، دسترسی‌ها و زیرساخت‌ها، منابع، مدیریت و شرایط اقلیمی منطقه باشد، کارایی مؤثر و چشمگیری در تأمین نیازها از خود نشان ندادند. لذا، در شرایط کنونی بررسی و مطالعه تأثیر فاکتورهای مختلف در ایجاد ناپایداری منابع آب زیرزمینی ضروری است. هدف اصلی در این مطالعه ارزیابی فقر منابع آب زیرزمینی بر اساس دو روش نوآورانه ریاضی-تحلیلی مؤثر[14] و داده‌محور[15] می‌باشد. تاکنون فاکتورهای ظرفیت، محیط‌زیست، دسترسی‌ها و زیرساخت‌ها، منابع و مدیریت به عنوان فاکتورهای پنج‌گانه جهت توسعه شاخص‌های فقر آبی مطرح بوده است. در حالیکه، درنظر گرفتن فاکتور اقلیم به همراه پدیده‌های کلیماتولوژی حدی علاوه بر فاکتورهای پنج‌گانه مذکور و استفاده از روش‌های داده‌محور جهت انتخاب متغیرهای مؤثر بر فقر آبی به عنوان نوآوری و وجه تمایز ویژه این پژوهش در مقایسه با تحقیقات قبلی است که در پژوهش‌های پیشین مورد توجه محققان قرار نگرفته است. همچنین، بررسی تأثیر دو زیرپروژه طرح احیاء و تعادل‌بخشی آب‌های زیرزمینی، شامل طرح تجهیز چاه‌ها به ابزار اندازه‌گیری هوشمند و پروژه فرهنگ‌سازی و اطلاع‌رسانی بر میزان شاخص فقر آبی توسعه داده شده را می‌توان از دیگر اهداف پژوهش حاضر برشمرد.

۲- منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

استان آذربایجان‌غربی در شمال‌غربی ایران قرار گرفته است. این استان به عنوان یکی از مناطق مستعد کشاورزی در اقتصاد کشور اثرگذار است. با توجه به تغییرات اقلیمی در سال‌های اخیر، سنجش فقر منابع آب زیرزمینی در این استان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بدین منظور آمار و اطلاعات مرتبط با فاکتورهای شش‌گانه ظرفیت، محیط‌زیست، دسترسی‌ها و زیرساخت‌ها، منابع، مدیریت و شرایط اقلیمی از مرکز آمار ایران برای سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۸ اخذ شد. مشخصات جغرافیایی استان آذربایجان‌غربی به همراه شرایط اقلیمی آن در شکل ۱ نشان داده شده است. میزان متوسط تخلیه از منابع آب‌های زیرزمینی در استان آذربایجان‌غربی ۱۸۹۷/۸۹ میلیون مترمکعب است. همچنین، متغیرهای وابسته به فاکتورهای مذکور (۵۷ متغیر) در جدول ۱ ارائه شده است.

تأثیر متقابل منابع آب و ابعاد مختلف اجتماعی-اقتصادی-سیاسی-زیست‌محیطی یک مبحث بسیار پیچیده بوده و می‌تواند متغیرهای متعددی را در خود جای دهد. در مرحله اول، متغیرهای تحقیق با توجه به مرور منابع انجام گرفته، الگو قرار دادن نظرات خبرگان و در دسترس بودن آمار و اطلاعات مرتبط با فاکتورهای مختلف، بر اساس سالنامه‌های آماری استان آذربایجان‌غربی، جمع‌آوری شدند. بعد از تکمیل و تصحیح داده‌های ناقص، مقدار همبستگی هر یک از متغیرها با میزان تخلیه منابع آب‌های زیرزمینی محاسبه شد. متغیرهای دارای همبستگی معنی‌دار (سطح ۱ درصد) با میزان تخلیه منابع آب‌های زیرزمینی جهت به کارگیری در الگوی شاخص فقر آبی تعیین شدند. از میان متغیرهای درنظر گرفته شده متغیرهای اشتغال در بخش کشاورزی و صنعتی، درصد جمعیت زن، نسبت اشتغال زن به مرد در بخش کشاورزی، عملیات بیولوژیکی و بیومکانیکی در آبخیزداری، عملیات سنگی (شامل گابیون‌بندی و غیره) در آبخیزداری و درصد نم نسبی (۱۲ ساعته) رابطه معکوس با میزان تخلیه آب‌های زیرزمینی در استان آذربایجان‌غربی داشتند.

در این مطالعه، به منظور بی بعد نمودن متغیرهای منتخب مقادیر آن‌ها با استفاده از رابطه (۱) نرمال شدند.

$$I_{Nijk} = \frac{I_{ijk} - I_{ijk}(min)}{I_{ijk}(max) - I_{ijk}(min)} \times 100 \qquad (۱)$$

که در آن، I_{ijk}، $I_{ijk}(min)$ و $I_{ijk}(max)$ به ترتیب مقادیر نرمال‌شده، مقادیر واقعی، مقادیر حداقل و حداکثر هر متغیر در استان آذربایجان‌غربی را نشان می‌دهد. همچنین، i، j و k به ترتیب نشان‌دهنده فاکتورها، ابعاد و متغیرهای مربوطه هستند.

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- توسعه مدل‌های ریاضی-تحلیلی مؤثر و داده‌محور

رویکرد اصلی در این مطالعه، بررسی پایداری نسبی منابع آب زیرزمینی با درنظر گرفتن فاکتورهای شش‌گانه ظرفیت، محیط‌زیست، زیرساخت‌ها و دسترسی‌ها، منابع آب، مدیریت و اقلیم است. شاخص فقر آبی توسعه داده شده رابطه بین فاکتورهای شش‌گانه به همراه ابعاد و متغیرهای مختلف آن‌ها را با پایداری نسبی منابع آب زیرزمینی بر اساس تحلیل‌های کمی (مقدار شاخص) و کیفی (سطح شاخص)، ارزیابی می‌کند. بدین منظور، در این مطالعه، شاخص فقر آبی بر اساس دو مدل ریاضی-تحلیلی مؤثر و داده‌محور محاسبه شده است.

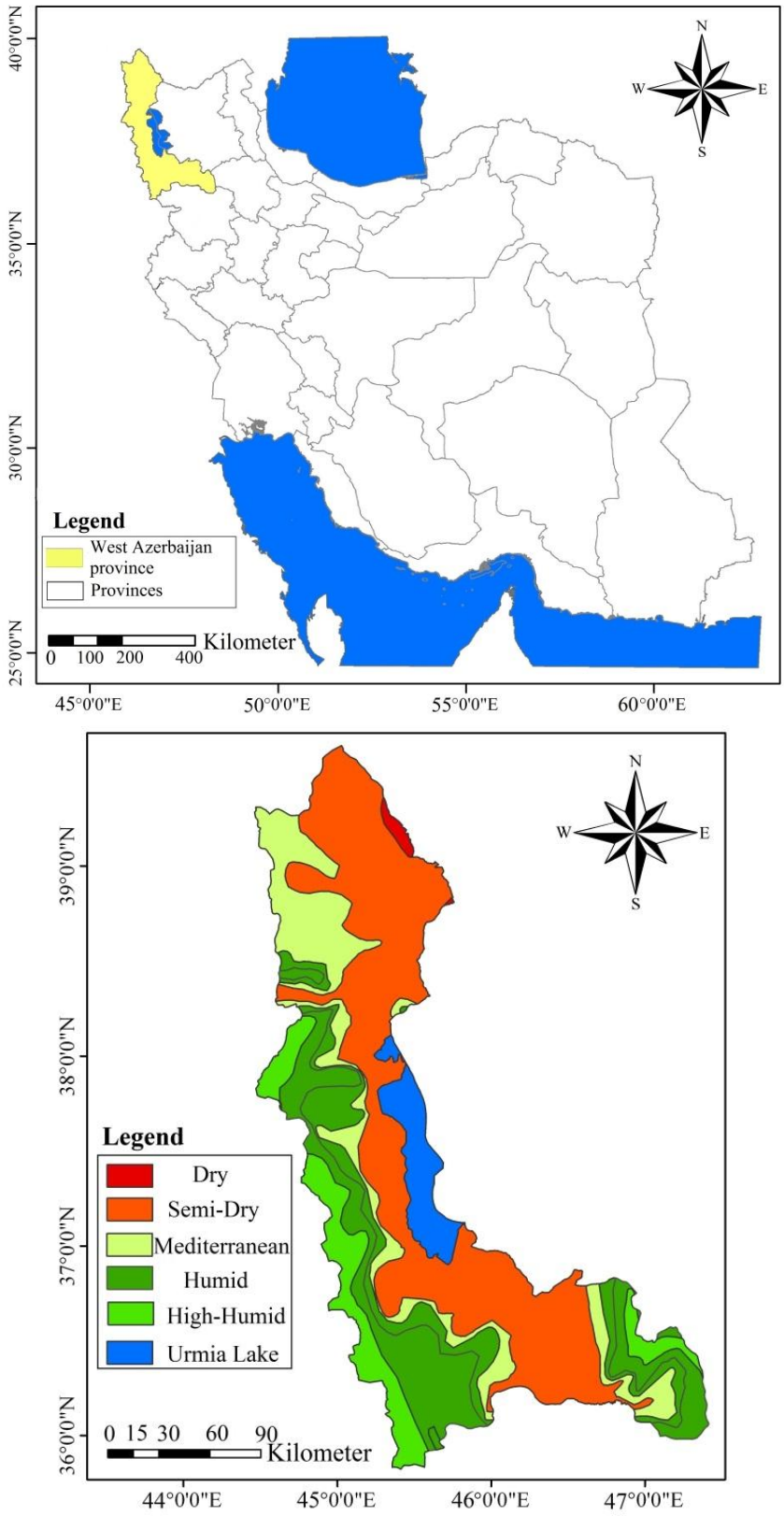

Fig. 1- Geographical characteristics of the West Azerbaijan province along with the climatic conditions

شکل ۱- مشخصات جغرافیایی استان آذربایجان‌غربی به همراه شرایط اقلیمی

Table 1- Introducing the factors, dimensions, and variables used in the research

جدول ۱- معرفی فاکتورها، ابعاد و متغیرهای به کارگرفته شده در تحقیق

Factors (i=1,…, 6)	j-Dimensions (j=1, 2,…, 4)	k-Variables (unit) (K=1, 2,…, 10) (References)
Capacity (i=1)	1-Socio-economic	1-Population density (people per square kilometer) (Bui et al. 2018), 2-The number of issued life insurance (life), 3-Unemployment rate (percent) (Zamanzad-Ghavidel et al., 2020), 4-Average of rural income (thousands-rials), 5-Average of urban income (thousands-rials), 6-Employment in the industry sector (percentage), 7-Employment in the agriculture sector (percentage), 8-Export amount (tons), 9- Share of the agriculture, hunting, forestry, and fishing from the GDP (percentage) (El-Gafy, 2015), 10-Share of the water supply, wastewater management, and treatment activities from the GDP (percentage) (El-Gafy, 2015)
	2-Education-communication and technology	1-Literate population (percentage) (Forouzani et al., 2013), 2-Internet users (population 6 years old and older) (people) (Zamanzad-Ghavidel et al., 2020), 3-Computer users (population 6 years old and older) (people) (Zamanzad-Ghavidel et al., 2020)
	3-Hygiene and health	1-Death of children under 5-years old (people) (El-Gafy, 2015), 2-Number of patients (adults) due to internal diseases (people)
	4-Gender	1-Female population (percentage) (El-Gafy, 2015), 2-Female to male employment in the agricultural sector (percentage) (Zamanzad-Ghavidel et al., 2020), 3-Female to male employment in the industrial sector (percentage) (Zamanzad-Ghavidel et al., 2020)
Environment (i=2)	1-Industries and chemicals	1-The amount of distributed chemical fertilizers (tons), 2-Poisons sold (kilograms)
	2-Natural events	1-Fire area in pastures (hectares)
	3-Agriculture	1-The area under cultivation of annual crops (hectares), 2-Amount of production of main agricultural products annually (hectares) (El-Gafy, 2015)
	4- Fisheries	1-Amount of aquaculture production (collection from natural and semi-natural resources - rivers and dams) (tons)
Infrastructure and access (i=3)	1-Sewage	1-The population covered by urban wastewater collection and sanitary disposal services (people) (Liang et al., 2020), 2-The length of the collection network in urban areas covered by the Water and Wastewater Company (kilometers) (Haak and Pagilla, 2020), 3-The number of sewage branches in the urban areas covered by the Water and Wastewater Company (Haak and Pagilla, 2020)
	2-Water	1-The volume of water tanks in the circuit (thousand cubic meters), 2-The number of water treatment plants in the circuit, 3-The number of branches in urban areas covered by the water and sewage company, 4-The capacity of water supply sources in rural areas (thousand cubic meters), 5-The number of water branches in rural areas, 6-The volume of reservoirs in rural areas (thousand cubic meters), 7-The length of distribution network in rural areas (kilometers), 8-The length of water transmission lines in rural areas (kilometers)
	3-Electricity	1-Gross production of electricity (million KWh) (El-Gafy, 2015), 2-Number of electricity subscribers in the agricultural sector (percentage), 3- Number of electricity subscribers in the industrial sector (percentage), 4-Amount of electricity sales in the agricultural sector (MWh), 5-Amount of electricity sales in the industry sector (MWh)
Water resources (i=4)	1-Water consumption (quantity)	1-The volume of water sales in urban areas covered by the Urban Water and Wastewater Company (cubic meters) (Haak and Pagilla, 2020), 2-The volume of water sales in rural areas covered by the Rural Water and Wastewater Company (cubic meters) (Haak and Pagilla, 2020)
	2-Water quality	1-Electrical conductivity (µmho/cm) (El-Gafy, 2015), 2-Water temperature (Celsius) (El-Gafy, 2015)
Management (i=5)	1-Management actions of institutions	1-Biological and biomechanical operations in watershed management (hectares), 2-Stone operations (including gabions, etc.) in watershed management (cubic meters), 3-Mounding and direct cultivation for pasture management and its improvement (hectares)
	2-Goverment	Performance of credits for the acquisition of capital assets (million-rials) in the following sectors: 1-Water resources, 2-Agriculture and natural resources, 3-Environment, 4-Industry
Climate (i=6)	1-Humidity	1-Relative humidity-12hr (percentage)
	2-Temperature	1-Average monthly temperature (Celsius), 2-Average minimum temperature (Celsius), 3-Average maximum temperature (Celsius)
	3-Precipitation	1-Sum of precipitation (mm)
Representative of water resources systems (RWS)		The amount of discharge from groundwater resources (million cubic meters)

برای پیاده‌سازی مدل‌های به کار گرفته شده، بعد از انتخاب فاکتورها و ابعاد تأثیرگذار بر وضعیت پایداری سامانه‌های منابع آب زیرزمینی و تعیین متغیرهای مرتبط با هر یک از ابعاد لحاظ شده بر اساس معنی‌داری همبستگی (سطح ۱ درصد) آن‌ها با میزان تخلیه منابع آب زیرزمینی (معرف منابع آب زیرزمینی)، به محاسبه وزن تأثیر هر یک از متغیرها پرداخته شد. وزن اثربخشی هر یک از متغیرها بر اساس شدت همبستگی متغیر (El-Gafy, 2015; Zamanzad-Ghavidel et al., 2021) با میزان تخلیه منابع آب زیرزمینی تعیین شد (رابطه ۲ و ۳). در گام بعدی، میزان فقر آبی برای هر یک از ابعاد فاکتورهای شش‌گانه بر اساس رابطه ۴ محاسبه شد. نهایتاً، بر اساس مجموع مقادیر فقر آبی ابعاد و فاکتورها به ترتیب مقادیر فقر آبی هر یک از فاکتورهای شش‌گانه (رابطه ۵) و فقر آبی جامع (رابطه ۶) بدست آمد.

$$R_{ijk,RWS} = \frac{\mathrm{cov}(r_{ijk}, r_{RWS})}{s_{r.ijk} \times s_{r.RWS}} \quad (۲)$$

$$W_{ijk} = \frac{R_{ijk,RWS}}{\sum_{j=1}^{y} R_{ijk,RWS}}, \sum W_{ijk} = 1.00 \quad (۳)$$

$$WPI_{ij} = \sum_{j=1}^{y} W_{ijk} \times \bar{I}_{Nijk} \quad (۴)$$

$$WPI_{i} = \sum_{i=1}^{m} WPI_{ij} \quad (۵)$$

$$CWPI = \sum_{i=1}^{m} WPI_{i} \quad (۶)$$

$$\text{IF: } \begin{cases} \bar{I}_{Nijk} \geq WPI_{ij}, \\ WPI_{ij} \geq WPI_{i}, \\ WPI_{i} \geq CWPI, \end{cases} \text{Then: } \begin{cases} \text{Relatively unsustainable variable} \\ \text{Relatively unsustainable dimension} \\ \text{Relatively unsustainable factor} \end{cases} \quad (۷)$$

and,

$$\text{IF: } \begin{cases} \bar{I}_{Nijk} < WPI_{ij}, \\ WPI_{ij} < WPI_{i}, \\ WPI_{i} < CWPI, \end{cases} \text{Then: } \begin{cases} \text{Relatively sustainable variable} \\ \text{Relatively sustainable dimension} \\ \text{Relatively sustainable factor} \end{cases}$$

که در آن، W_{ijk}، R_{ijk}، $\bar{I}_{Nijk}$، $\mathrm{cov}(r_{ijk}, r_{RWS})$، $s_{r.ijk}$، $s_{r.RWS}$، WPI_{ij}، WPI_{i} و CWPI به ترتیب وزن تأثیر متغیرها، همبستگی بین هر متغیر و معرف سامانه‌های منابع آب، میانگین متغیرهای نرمال‌شده، کوواریانس بین هر متغیر و معرف سامانه‌های منابع آب، انحراف معیار هر یک از متغیرها، انحراف معیار معرف سامانه‌های منابع آب، شاخص فقر آبی برای ابعاد، فاکتورها و شاخص فقر آبی جامع را نشان می‌دهد.

جهت توسعه مدل داده‌محور از ابزار برنامه‌ریزی بیان ژن استفاده شد. برنامه‌ریزی بیان ژن جزو روش‌های الگوریتم گردشی محسوب می‌شود که مبنای تمام آن‌ها براساس نظریه تکامل داروین استوار است. این الگوریتم به طور خودکار می‌تواند متغیرهای ورودی که در مدل بیشترین تأثیر را دارند، انتخاب کند. فرآیند گام به گام حل یک مسئله با استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن متشکل از پنج مرحله به شرح زیر است: ۱- انتخاب مجموعه ترمینال، ۲- انتخاب مجموعه توابع، ۳- شاخص اندازه‌گیری دقت مدل، ۴- مؤلفه‌های کنترل، ۵- معیارهای توقف برنامه (Emadi et al., 2022).

مقادیر شاخص توسعه داده شده در بازه ۰ تا ۱۰۰ متغیر است. اگر مقدار شاخص محاسبه شده برای هر بعد و متغیر به ترتیب در مقایسه با مقدار شاخص محاسبه شده برای هر فاکتور و بعد (آستانه) بیشتر باشد، بدین مفهوم است که آن بعد یا متغیر مسبب ایجاد ناپایداری نسبی و فقر آبی است. همچنین، اگر مقدار شاخص محاسبه شده برای هر فاکتور بیشتر از مقدار محاسبه شده برای شاخص فقر آبی جامع باشد می‌توان انتظار داشت که آن فاکتور مسبب ایجاد ناپایداری نسبی در سامانه‌های منابع آب زیرزمینی باشد (رابطه ۷). مقادیر شاخص‌های فقر آبی محاسبه شده علاوه بر تحلیل کمی قابلیت تحلیل‌های کیفی را نیز دارند. در تحلیل کیفی، مقادیر شاخص فقر آبی را می‌توان در پنج دسته ۰-۲۰، ۲۰-۴۰، ۴۰-۶۰، ۶۰-۸۰ و ۸۰-۱۰۰ طبقه‌بندی کرد. طبقه‌بندی مذکور به ترتیب ناپایداری خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد در سامانه‌های منابع آب زیرزمینی را نشان می‌دهد.

۳-۲- وجه تمایز مدل‌های ریاضی-تحلیلی مؤثر و داده‌محور

در مدل ریاضی-تحلیلی مؤثر، همه متغیرهای منتخب در محاسبه و سنجش میزان فقر آبی و پایداری سامانه‌های منابع آب زیرزمینی لحاظ شده است. در حالیکه، هدف اصلی در مدل ریاضی-تحلیلی داده‌محور انتخاب متغیرهای با اولویت بالا و تأثیرگذار بر مقدار شاخص فقر آبی است. از آنجایی که در پروژه‌های وسیع مهندسین و مدیران با تعدد متغیرهای مرتبط با ابعاد و فاکتورهای مختلف مواجه می‌شوند، لذا توسعه روش‌هایی که بتواند حداقل تعداد متغیرهای مرتبط با ابعاد و فاکتورها را در تعیین میزان شاخص فقر آبی در منطقه لحاظ کند، بسیار کاربردی به نظر می‌رسد. برای تحقق این هدف، مهم‌ترین گام به کار گرفتن ابزاری از روش‌های داده‌محور مانند برنامه‌ریزی بیان ژن است که بتواند توانایی تشخیص، انتخاب و معرفی هوشمند مهمترین پارامترهای مؤثر در هر بعد را داشته باشد (Zamanzad-Ghavidel et al., 2021). به عنوان نمونه شماتیکی از عملکرد روش برنامه‌ریزی بیان ژن (نرم‌افزار GeneXpro tools) برای انتخاب متغیرهای فاکتور منابع آب در روش داده‌محور در شکل ۲ نشان داده شده است.

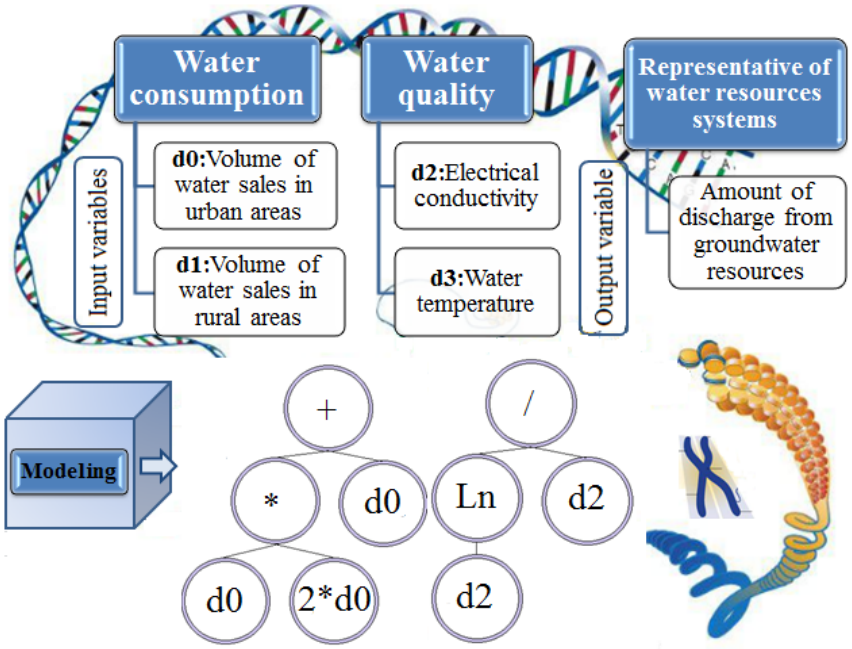

Fig. 2- Schematic of the function of gene expression programming method to select the variables of water resources factor in the data-mining method

شکل ۲- شماتیکی از عملکرد روش برنامه‌ریزی بیان ژن جهت انتخاب متغیرهای فاکتور منابع آب در روش داده‌محور

۴- نتایج و بحث

۴-۱- فاکتور ظرفیت

فاکتور ظرفیت شامل چهار بعد اساسی اجتماعی-اقتصادی، آموزش-ارتباطات و تکنولوژی، بهداشت و سلامت و جنسیت است که به ترتیب ۱۰، ۳، ۲ و ۳ متغیر را در خود جای داده است. در چهار بعد مذکور به ترتیب متغیرهای سهم آبرسانی، مدیریت پسماند، فاضلاب و فعالیت‌های تصفیه از تولید ناخالص داخلی، جمعیت باسواد، تعداد مراجعه‌کننده به دلیل بیماری‌های داخلی و جمعیت زن بیشترین وزن اثرگذاری با ارزش‌های ۰/۱۳، ۰/۳۴، ۰/۵۱ و ۰/۴۴ را بر فقر آبی در سامانه‌های منابع آب زیرزمینی استان آذربایجان‌غربی دارد. در مدل داده‌محور در بعد اجتماعی-اقتصادی متغیرهای تعداد بیمه‌نامه صادر شده زندگی، متوسط درآمد روستایی و شهری و اشتغال در بخش صنعت توسط مدل برنامه‌ریزی بیان ژن مؤثر شناخته نشده و از چارچوب الگوی فقر آبی حذف شدند. همچنین، مقادیر شاخص فقر آبی در فاکتور ظرفیت برای مدل‌های مؤثر و داده‌محور به ترتیب ۴۹/۸۵ و ۴۹/۳۸ بدست آمد. نتایج حاصل در مدل مؤثر نشان می‌دهد که ابعاد اجتماعی-اقتصادی و جنسیت می‌تواند مسبب ایجاد فقر آبی و ناپایداری نسبی در سامانه‌های منابع آب زیرزمینی باشد. بنابراین، ابعاد مذکور نیاز به اصلاحات مدیریتی در استان مورد مطالعه دارد. با توجه به اینکه در بعد جنسیت علاوه بر جمعیت زن، نسبت اشتغال در بخش کشاورزی و صنعت زن به مرد نیز درنظر گرفته شده، اصلاحات مدیریتی فاکتور ظرفیت از لحاظ بعد جنسیت می‌تواند با اشتغال زنان در بخش‌های مختلف کشاورزی و صنعت تغییر کند. محاسبه شاخص فقر آبی با تکیه بر فاکتور ظرفیت با استفاده از مدل‌های ریاضی-تحلیلی مؤثر و داده‌محور در جدول ۲ ارائه شده است. به عنوان نمونه، بر اساس نتایج هر دو مدل توسعه داده شده در بعد اجتماعی-اقتصادی، متغیرهای تراکم جمعیت و سهم آبرسانی، مدیریت پسماند، فاضلاب و فعالیت‌های تصفیه از تولید ناخالص داخلی مسبب ایجاد ناپایداری نسبی در منابع آب زیرزمینی هستند. لذا، نیاز است که متغیرهای مذکور مورد توجه ویژه مدیران بخش‌های مختلف استان قرار گیرند.

۴-۲- فاکتور محیط‌زیست

فاکتور محیط‌زیست شامل چهار بعد اساسی صنایع و مواد شیمیایی، رخدادهای طبیعی، کشاورزی و شیلات است که به ترتیب ۲، ۱، ۲ و ۱ متغیر را در خود جای داده است. در چهار بعد مذکور به ترتیب سموم فروخته شده، مساحت آتش‌سوزی در مراتع، سطح زیر کشت محصولات سالانه و مقدار تولید آبزی‌پروری بیشترین وزن اثرگذاری با ارزش‌های ۰/۶۰، ۱/۰۰، ۰/۵۲ و ۱/۰۰ را بر فقر آبی در سامانه‌های منابع آب زیرزمینی استان مورد مطالعه، دارند. در مدل داده‌محور بعد رخدادهای طبیعی و شیلات توسط مدل برنامه‌ریزی بیان ژن مؤثر

شناخته نشده و از چارچوب الگوی فقر آبی حذف شدند. همچنین، مقادیر شاخص فقر آبی در فاکتور محیطزیست برای مدل‌های مؤثر و داده‌محور به ترتیب ۳۹/۶۸ و ۴۲/۸۵ بدست آمد. نتایج حاصل در مدل مؤثر حاکی از آن است که ابعاد صنایع و مواد شیمیایی و کشاورزی می‌تواند مسبب ایجاد فقر آبی و ناپایداری نسبی در سامانه‌های منابع آب زیرزمینی باشد.

Table 2- Water poverty index based on the capacity factor using effective and data-mining mathematical-analytical models

جدول ۲- مقادیر شاخص فقر آبی با تکیه بر فاکتور ظرفیت با استفاده از مدل‌های ریاضی-تحلیلی مؤثر و داده‌محور

Dimensions (i)	Variables (k)	$\bar{I}_{Nijk}$	R_{ijk}	W_{ijk}		WPI_{ij}		WPI_i	
				Effective	Data-mining	Effective	Data-mining	Effective	Data-mining
Socio-economic	Population density	57.90*/*	0.97	0.12	0.20	51.19	49.79	49.85	49.38
	The number of issued life insurance	30.97	0.74	0.09	-				
	Unemployment rate	46.77	0.67	0.08	0.14				
	Average of rural income	66.68*/-	0.83	0.10	-				
	Average of urban income	70.10*/-	0.82	0.10	-				
	Employment in the industry sector	40.00	0.59	0.07	-				
	Employment in the agriculture sector	31.50	0.64	0.08	0.13				
	Export amount	47.01	0.70	0.09	0.14				
	Share of the agriculture, hunting, forestry, and fishing from the GDP	49.14	0.96	0.12	0.19				
	Share of the water supply, wastewater management, and treatment activities from the GDP	58.35*/*	0.99	0.13	0.20				
Education-Communication and Technology	Literate population	50.00*/*	0.94	0.34	0.51	49.57	49.46		
	Internet users-older 6 years old	48.89	0.89	0.32	0.49				
	Computer users older 6 years old	49.78*/-	0.93	0.34	-				
Sanitation and Health	Death of children under 5-years old	46.40	0.86	0.49	-	47.04	47.66		
	Number of patients (adults) due to internal diseases	47.66*/*	0.88	0.51	1.00				
Gender	Female population	54.57*/-	0.90	0.44	-	51.59	50.61		
	Female to male employment in the agricultural sector	50.61/*	0.66	0.32	1.00				
	Female to male employment in the industrial sector	47.44	0.49	0.24	-				

/ Unsustainable variables in Effective model / Unsustainable variables in Data-mining model

*/- Unsustainable variables in Effective model / Sustainable variables in Data-mining model

/* Sustainable variables in Effective model / Unsustainable variables in Data-mining model

Table 3- Water poverty index based on the environmental factor using effective and data-mining mathematical-analytical models

جدول ۳- مقادیر شاخص فقر آبی با تکیه بر فاکتور محیط‌زیست با استفاده از مدل‌های ریاضی-تحلیلی مؤثر و داده‌محور

Dimensions (i)	Variables (k)	$\bar{I}_{Nijk}$	R_{ijk}	W_{ijk}		WPI_{ij}		WPI_i	
				Effective	Data-mining	Effective	Data-mining	Effective	Data-mining
Industries and chemicals	The amount of distributed chemical fertilizers	63.36*/-	0.59	0.40	-	47.56	36.90	39.68	42.85
	and pesticides sold	36.90/*	0.87	0.60	1.00				
Natural events	Fire area in pastures	27.69	0.40	1.00	-	27.69	-		
Agriculture	The area under cultivation of annual crops	40.53	0.87	0.52	0.52	48.81	48.81		
	Amount of production of main agricultural products annually	57.88*/*	0.79	0.48	0.48				
Fisheries	Amount of aquaculture production	34.66	0.61	1.00	-	34.66	-		

/ Unsustainable variables in Effective model / Unsustainable variables in Data-mining model

*/- Unsustainable variables in Effective model / Sustainable variables in Data-mining model

/* Sustainable variables in Effective model / Unsustainable variables in Data-mining model

بنابراین، ابعاد مذکور نیاز به اصلاحات مدیریتی در توزیع و مصارف سموم شیمیایی و کشت محصولات کشاورزی در استان دارد. محاسبه شاخص فقر آبی با تکیه بر فاکتور محیط‌زیست با استفاده از مدل‌های ریاضی-تحلیلی مؤثر و داده‌محور در جدول ۳ ارائه شده است. به عنوان نمونه در مقدار تولید محصولات کشاورزی اصلی سالانه (بعد کشاورزی) نیاز به اصلاحات مدیریتی ویژه وجود دارد، بطوریکه در آینده مقدار این تولیدات مسبب ناپایداری نسبی منابع آب زیرزمینی نشود.

۴-۳- فاکتور زیرساخت‌ها و دسترسی‌ها

فاکتور زیرساخت‌ها و دسترسی‌ها شامل سه بعد اساسی فاضلاب شهری، آب و برق است که به ترتیب ۳، ۸ و ۵ متغیر را در خود جای داده است. مقادیر شاخص فقر آبی در ابعاد فاضلاب شهری، آب و برق به ترتیب برای مدل‌های مؤثر و داده‌محور (۵۰/۹۷، ۵۶/۷۸، ۵۲/۷۸) و (۵۰/۸۲، ۵۵/۰۴، ۵۵/۰۱) به دست آمد. همچنین، مقادیر شاخص فقر آبی در فاکتور زیرساخت‌ها و دسترسی‌ها برای مدل‌های مؤثر و داده‌محور به ترتیب ۵۳/۵۱ و ۵۳/۶۲ محاسبه شد. نتایج حاصل در مدل مؤثر حاکی از آن است که بعد آب می‌تواند مسبب ایجاد فقر آبی و ناپایداری نسبی در سامانه‌های منابع آب زیرزمینی باشد. این درحالی است که با پیاده‌سازی مدل داده‌محور علاوه بر بعد آب، بعد برق نیز مسبب فقر آبی شناسایی شد. محاسبه شاخص فقر آبی با تکیه بر فاکتور زیرساخت‌ها و دسترسی‌ها با استفاده از مدل‌های ریاضی-تحلیلی مؤثر و داده‌محور در جدول ۴ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که تولید ناخالص برق و مقدار فروش برق در بخش کشاورزی استان آذربایجان‌غربی نیاز به اصلاحات و تدوین برنامه‌های مدیریتی نوین دارد.

۴-۴- فاکتور منابع آب

فاکتور منابع آب شامل دو بعد اصلی کمیت و کیفیت آب است که هر یک دو متغیر را در خود جای داده است. مقادیر شاخص فقر آبی در ابعاد فاضلاب شهری، آب و برق به ترتیب برای مدل‌های مؤثر و داده‌محور (۵۸/۲۱، ۴۹/۷۷) و (۵۹/۲۳، ۶۰/۰۵) به دست آمد. همچنین، مقادیر شاخص فقر آبی در فاکتور منابع آب برای مدل‌های مؤثر و داده‌محور به ترتیب ۵۳/۹۹ و ۵۹/۶۴ بدست آمد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که بعد مصارف آب در مدل مؤثر و بعد کیفیت آب در مدل داده‌محور به عنوان عامل ایجاد فقر آبی و ناپایداری نسبی در سامانه‌های منابع آب زیرزمینی، شناسایی شد. محاسبه شاخص فقر آبی با تکیه بر فاکتور منابع آب با استفاده از مدل‌های ریاضی-تحلیلی مؤثر و داده‌محور در جدول ۵ ارائه شده است. همچنین، به عنوان نمونه در بخش کیفیت منابع آب زیرزمینی نتایج حاصل حاکی از اعمال ناپایداری بر سامانه‌های منابع آب زیرزمینی توسط میزان هدایت الکتریکی وجود دارد. بنابراین، توصیه می‌شود کیفیت منابع آب‌های زیرزمینی در برنامه‌های مدیریتی آینده استان به عنوان یکی از مسائل اولویت‌دار لحاظ شود.

Table 4- Water poverty index based on the infrastructure and access factor using effective and data-mining mathematical-analytical models

جدول ۴- مقادیر شاخص فقر آبی با تکیه بر فاکتور زیرساخت‌ها و دسترسی‌ها با استفاده از مدل‌های ریاضی-تحلیلی مؤثر و داده‌محور

Dimensions (i)	Variables (k)	$\bar{I}_{Nijk}$	R_{ijk}	W_{ijk}		WPI_{ij}		WPI_i	
				Effective	Data-mining	Effective	Data-mining	Effective	Data-mining
Sewage	The population covered by urban wastewater collection and sanitary disposal services	50.82$^{/*}$	0.92	0.33	1.00	50.97	50.82	53.51	53.62
	The length of the collection network in urban areas covered by the Water and Wastewater Company	49.11	0.93	0.33	-				
	The number of sewage branches in the urban areas covered by the Water and Wastewater Company	52.94$^{*/-}$	0.95	0.34	-				
Water	The volume of water tanks in the circuit	69.88$^{*/*}$	0.81	0.12	0.25	56.78	55.04		
	The number of water treatment plants in the circuit	36.11	0.60	0.09	0.19				
	The number of branches in urban areas covered by the water and sewage company	68.19$^{*/-}$	0.80	0.12	-				
	The capacity of water supply sources in rural areas	61.13$^{*/*}$	0.90	0.13	0.28				
	The number of water branches in rural areas	53.05	0.94	0.14	-				
	The volume of reservoirs in rural areas	48.03	0.87	0.13	0.27				
	The length of distribution network in rural areas	57.59$^{*/-}$	0.94	0.14	-				
	The length of water transmission lines in rural areas	55.89	0.96	0.14	-				
Electricity	Gross production of electricity	57.93$^{*/*}$	0.85	0.19	0.23	52.78	55.01		
	Number of electricity subscribers in the agricultural sector	52.27	0.94	0.21	0.26				
	Number of electricity subscribers in the industrial sector	52.01	0.94	0.21	0.26				
	Amount of electricity sales in the agricultural sector	58.17$^{*/*}$	0.92	0.20	0.25				
	Amount of electricity sales in the industry sector	43.26	0.85	0.19	-				

$^{*/*}$ Unsustainable variables in Effective model / Unsustainable variables in Data-mining model

$^{*/-}$ Unsustainable variables in Effective model / Sustainable variables in Data-mining model

$^{/*}$ Sustainable variables in Effective model / Unsustainable variables in Data-mining model

Table 5- Water poverty index based on the water resources factor using effective and data-mining mathematical-analytical models

جدول ۵- مقادیر شاخص فقر آبی با تکیه بر فاکتور منابع آب با استفاده از مدل‌های ریاضی-تحلیلی مؤثر و داده‌محور

Dimensions (i)	Variables (k)	$\bar{I}_{Nijk}$	R_{ijk}	W_{ijk}		WPI_{ij}		WPI_i	
				Effective	Data-mining	Effective	Data-mining	Effective	Data-mining
Water consumption (quantity)	The volume of water sales in urban areas covered by the Urban Water and Wastewater Company	59.23*/*	0.95	0.51	1.00	58.21	59.23	53.99	59.64
	The volume of water sales in rural areas covered by the Rural Water and Wastewater Company	57.15	0.91	0.49	-				
Water quality	Electrical conductivity	60.05*/*	0.63	0.53	1.00	49.77	60.05		
	Water temperature	38.35	0.57	0.47	-				

/ Unsustainable variables in Effective model / Unsustainable variables in Data-mining model

۴-۵- فاکتور مدیریت

فاکتور مدیریت شامل دو بعد اصلی اقدامات مدیریتی نهادها و دولت می‌باشد. در دو بعد مذکور به ترتیب متغیرهای کپه‌کاری و کشت مستقیم جهت مرتع‌داری و اصلاح مراتع و عملکرد اعتبارات تملک دارایی‌های سرمایه‌ای در بخش محیط‌زیست بیشترین وزن اثرگذاری با ارزش‌های ۰/۳۷ و ۰/۳۰ را بر ایجاد فقر آبی در سامانه‌های منابع آب زیرزمینی استان آذربایجان‌غربی دارد. مقادیر شاخص فقر آبی در ابعاد مذکور به ترتیب برای مدل‌های مؤثر و داده‌محور (۸۲/۳۵، ۸۰/۹۴) و (۳۹/۱۹، ۴۴/۶۲) به دست آمد. همچنین، مقادیر شاخص فقر آبی در فاکتور مدیریت برای مدل‌های مؤثر و داده‌محور به ترتیب ۶۰/۷۷ و ۶۲/۷۸ محاسبه شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که اقدامات مدیریتی نهادها در هر دو مدل مؤثر و داده‌محور به عنوان مسبب ایجاد فقر آبی و ناپایداری نسبی در سامانه‌های منابع آب زیرزمینی، شناسایی شد. محاسبه شاخص فقر آبی با تکیه بر فاکتور مدیریت با استفاده از مدل‌های ریاضی-تحلیلی مؤثر و داده‌محور در جدول ۶ ارائه شده است.

Table 6- The amount of water poverty index based on the management factor using effective and data-mining mathematical-analytical models

جدول ۶- مقادیر شاخص فقر آبی با تکیه بر فاکتور مدیریت با استفاده از مدل‌های ریاضی-تحلیلی مؤثر و داده‌محور

Dimensions (i)	Variables (k)		$\bar{I}_{Nijk}$	R_{ijk}	W_{ijk}		WPI_{ij}		WPI_i	
					Effective	Data-mining	Effective	Data-mining	Effective	Data-mining
Management actions of institutions	Biological and biomechanical operations in watershed management		79.60	0.56	0.35	0.49	82.35	80.94	60.77	62.78
	Stone operations in watershed management		86.04*/-	0.44	0.28	-				
	Mounding and direct cultivation for pasture management and its improvement		82.22/*	0.59	0.37	0.51				
Government	Performance of credits for the acquisition of capital assets:	Water resources	44.99*/*	0.58	0.23	0.43	39.19	44.62		
		Agriculture and natural resources	32.45	0.50	0.20	-				
		Environment	44.34*/	0.76	0.30	0.57				
		Industry	33.44	0.68	0.27	-				

/ Unsustainable variables in Effective model / Unsustainable variables in Data-mining model

*/- Unsustainable variables in Effective model / Sustainable variables in Data-mining model

/* Sustainable variables in Effective model / Unsustainable variables in Data-mining model

۴-۶- فاکتور اقلیم

فاکتور اقلیم شامل سه بعد اصلی رطوبت، دما و بارش است. مقادیر شاخص فقر آبی در ابعاد مذکور به ترتیب برای مدل‌های مؤثر و داده‌محور (۷۳/۷۷، ۵۲/۰۲، ۵۵/۴۳) و (-، ۵۲/۰۲، ۵۵/۴۳) به دست آمد. همچنین، مقادیر شاخص فقر آبی در فاکتور اقلیم برای مدل‌های مؤثر و داده‌محور به ترتیب ۶۰/۴۰ و ۵۳/۷۲ محاسبه شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که مدل داده‌محور با حذف بعد رطوبت از محاسبه شاخص فقر آبی، بعد بارش را به عنوان بعد تهدیدکننده جهت ایجاد فقر آبی و ناپایداری نسبی در سامانه‌های منابع آب زیرزمینی، معرفی می‌کند. مدل داده–محور علاوه بر اینکه توانایی کاهش متغیرها را دارد، نتایج منطقی را نیز در محاسبه شاخص فقر آبی مرتبط با اقلیم، می‌تواند ارائه دهد. محاسبه شاخص فقر آبی با تکیه بر فاکتور اقلیم با استفاده از مدل‌های ریاضی–تحلیلی مؤثر و داده‌محور در جدول ۷ ارائه شده است. همچنین، نتایج حاکی از اهمیت ویژه پدیده‌های کلیماتولوژی حدی، دمای میانگین حداکثر، در ایجاد ناپایداری نسبی منابع آب‌های زیرزمینی وابسته به بعد درجه حرارت است.

۴-۷- شاخص فقر آبی جامع

ارزش شاخص فقر آبی جامع در دو مدل ریاضی–تحلیلی مؤثر و داده‌محور به ترتیب ۵۳/۰۳ و ۵۳/۶۷ به دست آمد. پایداری فاکتورهای شش‌گانه جهت سنجش میزان فقر آبی بر اساس مدل‌های توسعه داده شده در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در مدل مؤثر فاکتورهای زیرساخت‌ها و دسترسی‌ها، منابع آب، مدیریت و اقلیم از عوامل ایجاد ناپایداری نسبی در سطوح متوسط، متوسط، زیاد و زیاد در سامانه‌های منابع آب زیرزمینی است. در حالیکه، به کارگیری روش داده‌محور با متغیرهای محدودتر، فاکتورهای منابع آب، مدیریت و اقلیم را از عوامل ایجاد ناپایداری نسبی در سامانه‌های منابع آب زیرزمینی معرفی می‌کند. بر اساس مقادیر شاخص فقر آبی جامع می‌توان به ترتیب ضعف اقدامات و برنامه‌ریزهای مرتبط با فاکتورهای مدیریت، اقلیم و منابع آب را مؤثرترین عامل ایجادکننده ناپایداری نسبی در آب‌های زیرزمینی استان آذربایجان‌غربی دانست. همانطور که نتایج نشان می‌دهد فاکتور اقلیم جز عامل مسبب ناپایداری نسبی در هر دو مدل مؤثر و داده‌محور شناسایی شد، در حالیکه تاکنون محققان و مدیران در توسعه شاخص فقر آبی به فاکتور مذکور توجه ویژه نداشتند.

شناسایی عوامل مؤثر بر ارزش شاخص‌های توسعه یافته بر اساس اقدامات و رخدادهای تاریخی می‌تواند برای تدوین برنامه‌های مدیریتی آینده بسیار مؤثر باشد. در استان آذربایجان‌غربی از سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۸ اقدامات مدیریتی گسترده‌ای در زمینه حفظ پایداری منابع آب زیرزمینی انجام شده است. تحلیل و بررسی میزان اثربخشی هر یک از اقدامات بر فقر آبی و نهایتاً ایجاد ناپایداری منابع آب زیرزمینی می‌تواند در تدوین و اصلاح برنامه‌های مدیریتی آینده کمک بسزایی داشته باشد. روند تغییرات شاخص فقر آبی به ازای فاکتورهای مورد مطالعه در جدول ۸ ارائه شده است. همچنین، روند تغییرات شاخص فقر آبی جامع بر اساس مدل‌های ریاضی–تحلیلی مؤثر و داده‌محور در شکل ۴ نشان داده شده است.

Table 7- Water poverty index based on the climate factor using effective and data-mining mathematical-analytical models

جدول ۷- مقادیر شاخص فقر آبی با تکیه بر فاکتور اقلیم با استفاده از مدل‌های ریاضی–تحلیلی مؤثر و داده‌محور

Dimensions (i)	Variables (k)	$\bar{I}_{Nijk}$	R_{ijk}	W_{ijk}		WPI_{ij}		WPI_i	
				Effective	Data-mining	Effective	Data-mining	Effective	Data-mining
Humidity	Relative humidity-12hr	73.77*/-	0.65	1.00	-	73.77	-	60.40	53.72
Temperature	Average monthly temperature	51.36	0.65	0.33	0.33	52.02	52.02		
	Average minimum temperature	50.94	0.55	0.28	0.28				
	Average maximum temperature	53.38*/*	0.75	0.38	0.38				
Precipitation	Sum of precipitation	55.43*/*	0.44	1.00	1.00	55.43	55.43		

/ Unsustainable variables in Effective model / Unsustainable variables in Data-mining model

*/- Unsustainable variables in Effective model / Sustainable variables in Data-mining model

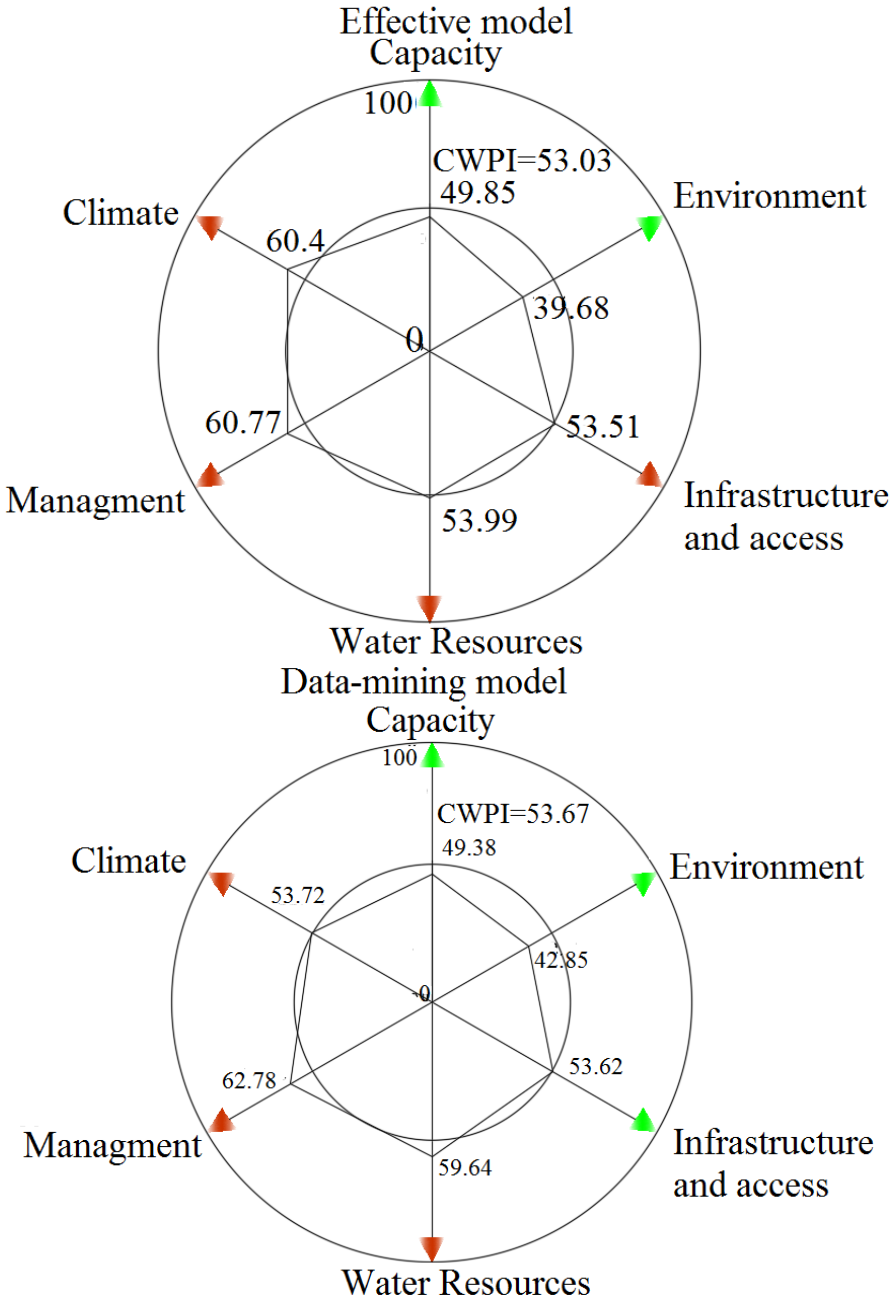

Fig. 3- The sustainability of studied factors to measure water poverty index based on effective and data-mining mathematical-analytical models

شکل ۳- پایداری فاکتورهای مورد مطالعه جهت سنجش میزان فقر آبی بر اساس مدل‌های ریاضی-تحلیلی مؤثر و داده‌محور

نتایج نشان می‌دهد که شاخص فقر آبی از سال ۱۳۹۰ تا سال ۱۳۹۶ روند صعودی داشته است در حالیکه بعد از اجرای بسیاری از طرح‌ها و پروژه‌های مدیریت منابع آب زیرزمینی مقدار این شاخص نسبتاً به وضعیت ثابت رسیده است. سال‌های ۱۳۹۰، ۱۳۹۲ و ۱۳۹۶ نقطه عطف تغییر حالت شاخص فقر آبی جامع به ترتیب از حالت خیلی کم به کم، کم به متوسط و متوسط به زیاد می‌باشد. نتایج این مطالعه، با نتایج مطالعات Zamanzad-Ghavidel et al. (2021) و Crispim et al. (2021) در راستای اهمیت توسعه شاخص فقر آبی در تدوین برنامه‌ها و اعمال اصلاحات مدیریتی، مطابقت دارد.

Table 8- Trend of water poverty index changes according to the studied factors

جدول ۸- روند تغییرات شاخص فقر آبی به ازای فاکتورهای مورد مطالعه

Type of models	Factors	Year								
		1390	1391	1392	1393	1394	1395	1396	1397	1398
Effective model	Capacity	26.45	28.91	35.60	37.74	58.86	62.00	65.76	65.19	68.10
	Environment	22.03	19.99	29.04	19.79	34.10	41.81	49.68	58.85	81.80
	Infrastructure and access	1.66	16.51	31.61	48.20	54.93	62.92	78.48	87.30	100.00
	Water Resources	0.00	30.01	41.61	53.30	59.50	52.76	73.49	78.78	96.46
	Management	49.67	23.33	53.13	60.07	54.76	63.15	89.59	87.57	65.65
	Climate	33.33	65.77	61.83	72.59	57.39	57.39	76.78	85.24	33.32
Data-mining model	Capacity	20.72	28.04	28.40	38.63	66.29	67.15	63.43	57.97	73.80
	Environment	25.18	27.56	27.80	21.57	19.74	62.35	75.57	64.27	61.65
	Infrastructure and access	0.00	18.43	34.89	49.72	58.57	59.62	75.80	85.59	100.00
	Water Resources	0.00	22.81	53.45	64.11	84.12	58.23	82.54	78.25	93.26
	Management	47.41	34.35	57.44	55.00	49.25	70.99	93.19	84.46	72.93
	Climate	0.00	38.21	33.35	45.44	30.24	30.24	54.00	57.53	33.32

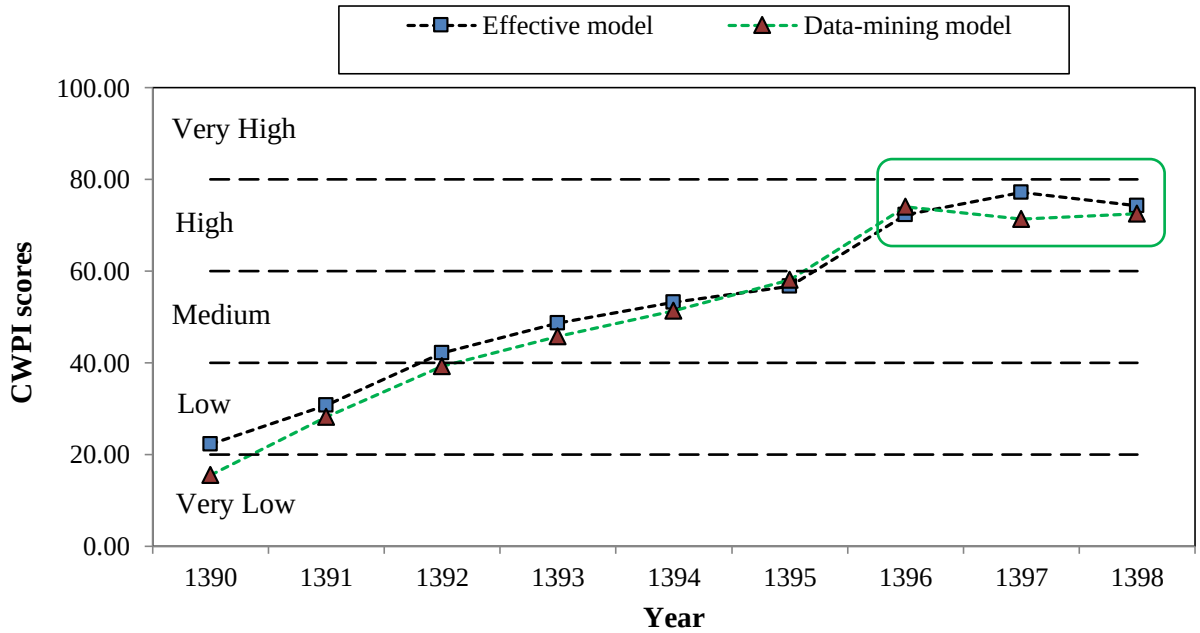

Fig. 4- Trend of changes of comprehensive water poverty index based on effective and data-mining mathematical-analytical models

شکل ۴- روند تغییرات شاخص جامع فقر آبی بر اساس مدل‌های ریاضی-تحلیلی مؤثر و داده‌محور

۵- جمع‌بندی

استفاده خردمندانه از امکانات صنعت آب به عنوان ابزار حفظ سلامت، حفاظت از محیط‌زیست و افزایش رفاه اجتماعی نیازمند آگاهی از ظرفیت‌های اجتماعی-فرهنگی-سیاسی-زیست‌محیطی موجود در هر منطقه است. برای اتخاذ راهبردهای مدیریت منابع آب، رویکردهای مختلفی مطرح می‌شود و اقدامات بنیادی در این زمینه به طور مستقیم و غیرمستقیم در بهبود بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی تأثیرگذار هستند. اتخاذ بهترین روش مدیریت، مستلزم شناخت فاکتورهای

ظرفیت، محیط‌زیست، زیرساخت‌ها و دسترسی‌ها، منابع آب، مدیریت و اقلیم منطقه است تا موفقیت در اجرا و بهره‌برداری از پروژه‌های مدنظر را تضمین نماید. در این مطالعه، فقر آبی منابع آب زیرزمینی بر اساس دو روش ریاضی-تحلیلی مؤثر و داده‌محور در استان آذربایجان‌غربی با درنظر گرفتن فاکتورهای شش‌گانه ظرفیت، محیط‌زیست، زیرساخت‌ها و دسترسی‌ها، منابع آب، مدیریت و اقلیم، ارزیابی شده که در گام بعدی تأثیر دو زیرپروژه از طرح احیاء و تعادل‌بخشی آب‌های زیرزمینی شامل طرح تجهیز چاه‌ها به ابزار اندازه‌گیری هوشمند و پروژه فرهنگ‌سازی و اطلاع‌رسانی بر میزان شاخص فقر آبی توسعه داده شده بررسی شده است. طرح احیاء و تعادل‌بخشی آب‌های زیرزمینی در سال ۱۳۹۳ در منطقه مورد مطالعه اجرا شده است که شامل پانزده زیرپروژه است. نتایج نشان می‌دهد که با اجرای این طرح ارزش شاخص فقر آبی فاکتور محیط‌زیست در سال ۱۳۹۳ نسبت به سال قبلی در مدل‌های مؤثر و داده‌محور به ترتیب ۹/۲۵ و ۶/۲۳ واحد کاهش یافته است. همچنین، بر اساس طرح تجهیز چاه‌ها به ابزار اندازه‌گیری هوشمند در سال ۱۳۹۳ تعداد ۹۱۴ چاه مجهز به کنتورهای هوشمند آب و برق شدند که تأثیر آن را در می‌توان در کاهش فقر آبی فاکتور محیط‌زیست مشاهده کرد. در حالیکه از سال‌های بعدی با توجه به اینکه تعداد نصب کنتورهای هوشمند حجمی بسیار پایین بوده است، به نظر می‌رسد تاکنون نتوانسته کاهش مؤثری در میزان فقرآبی نشان دهد. بنابراین توصیه می‌گردد که سرعت پیشرفت اجرای این طرح در سال‌های آتی بیشتر گردد تا بتواند در حفاظت از پایداری منابع آب زیرزمینی نقش مؤثرتری ایفا کند. اجرای پروژه فرهنگ‌سازی و اطلاع‌رسانی از دیگر طرح‌های مدیریتی است که در استان مورد مطالعه از سال ۱۳۹۵ شروع به اجرا شده است. نتایج هر دو مدل توسعه داده شده نشان داد که در سال ۱۳۹۵-۱۳۹۴، شیب افزایش شاخص فقر آبی جامع نسبت به سال‌های قبل کاهش یافته است. در حالیکه در سال‌های بعدی روند افزایش فقر آبی جامع تشدید یافته است. نتایج هر دو مدل توسعه داده شده نشان می‌دهد که اجرای این پروژه ارتباط مستقیم با شاخص فقر آبی فاکتور ظرفیت داشته است به طوریکه از سال ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۴ شیب افزایش شاخص مذکور شدید بوده ولی اجرای پروژه فرهنگ‌سازی و اطلاع‌رسانی شیب شاخص را از سال ۱۳۹۵ به بعد به شدت کاهش داده است. با وجود اینکه با اجرای این پروژه شاخص فقر آبی مرتبط با منابع آب در سال ۱۳۹۵ نسبت به سال قبل برای دو مدل مؤثر و داده‌محور ۶/۷۴ و ۲۵/۸۹ واحد کاهش یافته است، ولی کاهش فقرآبی فاکتور مذکور موقتی بوده و در سال ۱۳۹۶ به روند افزایشی خود ادامه داده است. لذا، نتایج حاکی از این است که این طرح تاکنون عملکرد حداکثری مطلوب نداشته و نیاز به اصلاحات مدیریتی دارد. شاخص فقر آبی مرتبط با فاکتور اقلیم در طول سال‌های مورد مطالعه دارای روند ثابتی نبوده است. بنابراین، لحاظ نمودن آن در سنجش میزان فقر آبی جامع علاوه بر فاکتورهای پنج‌گانه قبلی می‌تواند بسیار مؤثر بوده و در نحوه تصمیم‌گیری‌های و تدوین برنامه‌های مدیریتی نقش کلیدی ایفا کند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که لحاظ نکردن فاکتور اقلیم و همچنین مقادیر حدی پدیده‌های کلیماتولوژی در توسعه شاخص‌های فقر آبی از دیرباز تاکنون توسط محققین توانسته است در شناخت ابعاد مسبب ناپایداری سامانه‌های منابع آب، ضعف‌هایی ایجاد کند. همچنین، توسعه مدل داده‌محور با کاهش تعدد متغیرهای لحاظ شده در توسعه شاخص فقر آبی، می‌تواند در جلوگیری از اتلاف زمان، هزینه و منابع در انجام مطالعات پروژه‌های مرتبط با صنعت آب، بسیار مؤثر واقع شود. در نهایت، توسعه شاخص فقر آبی جامع با لحاظ نمودن فاکتور اقلیم به همراه پدیده‌های حدی هیدروکلیماتولوژی علاوه بر فاکتورهای پنج‌گانه اصلی در سایر مناطق کشور و جهان با شرایط اقلیمی مختلف، پیشنهاد می‌شود. همچنین، توسعه روشی برای شناسایی میزان همپوشانی اثرات متغیرها و اقدامات مدیریتی مختلف بر میزان شاخص فقر آبی، به عنوان یکی از محدودیت‌های این پژوهش، می‌تواند از دیگر پیشنهادات ویژه برای محققین آینده در این زمینه باشد.

پی‌نوشت‌ها

1- Sustainable Development
2- Comprehensive Water Poverty Index (CWPI)
3- Capacity
4- Environment
5- Infrastructure and Access
6- Water Resources
7- Management
8- Climate
9- Harvard
10- Skudai
11- Hanoi
12- Vietnam
13- Sichuan
14- Effective
15- Data-mining

۶- مراجع

Brown CM, Lund JR, Cai X, Reed PM, Zagona EA, Ostfeld A ... and Brekke L (2015) The future of water resources systems analysis: Toward a scientific framework for sustainable water management. Water Resources Research 51(8):6110-6124

Bui NT, Kawamura A, Amaguchi H, Du Bui D, Truong NT, and Nakagawa K (2018) Social sustainability assessment of groundwater resources: A case study of Hanoi, Vietnam. Ecological Indicators 93:1034-1042

Bury J, Mark BG, Carey M, Young KR, McKenzie JM, Baraer M, ... and Polk MH (2013) New geographies of water and climate change in Peru: Coupled natural and social transformations in the Santa River watershed. Annals of the Association of American Geographers 103(2):363-374

Carley M and Christie I (2017) Managing sustainable development. Routledge

Crispim DL, Pimentel Da Silva GD, and Fernandes LL (2021) Rural water sustainability index (RWSI): An innovative multicriteria and participative approach for rural communities. Impact Assessment and Project Appraisal 39(4):320-334

El-Gafy IKED (2018) The water poverty index as an assistant tool for drawing strategies of the Egyptian water sector. Ain Shams Engineering Journal 9(2):173-186

Emadi A, Sobhani R, Ahmadi H, Boroomandnia A, Zamanzad-Ghavidel S, and Azamathulla HM (2022) Multivariate modeling of agricultural river water abstraction via novel integrated-wavelet methods in various climatic conditions. Environment, Development and Sustainability 24(4):4845-4871

Friesen J, Sinobas LR, Foglia L, and Ludwig R (2017) Environmental and socio-economic methodologies and solutions towards integrated water resources management. Science of the Total Environment 581:906-908

Forouzani M, Karami E, Zamani GH, and Moghaddam KR (2013) Agricultural water poverty: Using Q-methodology to understand stakeholders' perceptions. Journal of Arid Environments 97:190-204

Garrick DE, Hall JW, Dobson A, Damania R, Grafton RQ, Hope R ... and O'donnell E (2017) Valuing water for sustainable development. Science 358(6366):1003-1005

Gonzales P and Ajami NK (2015) Urban water sustainability: An integrative framework for regional water management. Hydrology and Earth System Sciences Discussions 12(11):11291-11329

Haak L, and Pagilla K (2020) The water-economy nexus: A composite index approach to evaluate urban water vulnerability. Water Resources Management 34(1):409-423

Kefayati M, Saghafian B, Ahmadi A, and Babazadeh H (2018) Empirical evaluation of river basin sustainability affected by inter-basin water transfer using composite indicators. Water and Environment Journal 32(1):104-111

Liang X, Yang L, Ye M, and Deng G (2020) Quantitative analysis of the sustainable development capacity of regional water resources: A case study of Sichuan Province. In E3S Web of Conferences 143:02005

Naubi I. Zardari NH, Shirazi SM, Roslan NA, Yusop Z, and Haniffah MRBM (2017) Ranking of Skudai river sub-watersheds from sustainability indices–application of promethee method. GEOMATE Journal 12(29):124-131

Shilling F, Khan A, Juricich R, and Fong V (2013) Using indicators to measure water resources sustainability in California. In World environmental and water resources congress 2013: Showcasing the future 2708–2715

Singh AP and Bhakar P (2021) Development of groundwater sustainability index: A case study of western arid region of Rajasthan, India. Environment, development and sustainability 23(2):1844-1868

Song ML, Cao SP and Wang SH (2019) The impact of knowledge trade on sustainable development and environment-biased technical progress. Technological Forecasting and Social Change 144:512-523

Staben N, Hein A, and Kluge T (2010) Measuring sustainability of water supply: Performance indicators and their application in a corporate responsibility report. Water Science and Technology: Water Supply 10(5):824-830

Sullivan A, White D, Larson K, and Wutich A (2017) Towards water sensitive cities in the Colorado River Basin: A comparative historical analysis to inform future urban water sustainability transitions. Sustainability 9(5):761

Walker WE, Loucks DP, and Carr G (2015) Social responses to water management decisions. Environmental Processes 2(3):485-509

Zamanzad-Ghavidel S, Sobhani R, Etaei S, Hosseini Z, and Montaseri M (2021) Development of hydro-

social-economic-environmental sustainability index (HSEESI) in integrated water resources management. Environmental Monitoring and Assessment 193(8):1-29