تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال نوزدهم، شماره ۳، پائیز ۱۴۰۲، ویژه‌نامه تخصصی: آب زیرزمینی
Volume 19, No. 3, Fall 2023 (IR-WRR)- Special Issue: Groundwater
۱۳۶-۱۵۳

ارزیابی پایداری مدیریت منابع آب زیرزمینی در آبخوان‌های حوضه فلات مرکزی ایران

اسماعیل پاریزی[۱]، سیدموسی حسینی[۲*] و امیررضا صادقی[۳]

چکیده

در این پژوهش، وضعیت پایداری مدیریت منابع آب زیرزمینی تعداد ۱۸۴ آبخوان موجود در حوضه فلات مرکزی ایران بر اساس چهار شاخص کمی که با توجه به داده‌های در دسترس قابل پیاده‌سازی باشند، مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور، از داده‌های مشاهداتی کمی و کیفی ماهانه منابع آب زیرزمینی، میانگین نرخ تغذیه آبخوان، دبی پمپاژی چاه‌های بهره‌برداری، دبی ایستگاه‌های هیدرومتری و اطلاعات جمعیتی استفاده شد. شاخص‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل ردپای یکپارچه آب زیرزمینی (بعد محیط زیستی)، تراکم جمعیت در سطح آبخوان (بعد اجتماعی)، درصد آب زیرزمینی مورد استفاده برای بخش‌های کشاورزی و صنعتی (بعد اقتصادی) و تراکم چاه‌های مشاهده‌ای (بعد سازمانی) بودند که برای همه آبخوان‌ها طی دوره ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۵ محاسبه شدند. با توجه به مقادیر چهار شاخص محاسبه‌شده، رتبه‌بندی آبخوان‌ها توسط تکنیک PROMETHEE II و مقایسه زوجی شاخص‌ها انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داد که مدیریت پایدار منابع آب‌های زیرزمینی در فلات مرکزی ایران به ویژه نزدیک به کلان‌شهرها به دلیل تراکم جمعیت بالاتر، بهره‌برداری کمتر از منابع آب‌های زیرزمینی برای بخش کشاورزی و صنعت، شبکه پایش ضعیف آب زیرزمینی، افت شدید سطح آب و کیفیت نامناسب آب زیرزمینی، نسبتاً ضعیف است. نتایج نشان داد که ۱۴/۱ درصد از آبخوان‌های مورد مطالعه با پایداری خوب و ۳۲/۶ درصد آن‌ها با پایداری ضعیف ارزیابی شدند. نتایج این پژوهش در راستای شناسایی و اولویت‌بندی آبخوان‌هایی که نیاز به اتخاذ سیاست‌های جدید و یا بازنگری آن‌ها برای دستیابی به پایداری در بهره‌برداری از این منابع ارزشمند دارند، اهمیت دارد.

کلمات کلیدی: شاخص ارزیابی ترکیبی، پایداری منابع آب، آبخوان‌های فلات مرکزی، تکنیک تصمیم‌گیری چند معیاره.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۳/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۵/۱۵

۱- دانش‌آموخته دکتری ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۲- دانشیار گروه جغرافیای طبیعی دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۳- کارشناس ارشد هیدروژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران، تهران، ایران.
*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۴۰۲ امکانپذیر است.

Assessing the Sustainability of Groundwater Resource Management for Aquifers in Iran's Central Plateau Basin

E. Parizi [1], S.M. Hosseini [2], and A.R. Sadeghi [3]*

Abstract

In this research, the sustainability status of groundwater resources management has been assessed for 184 aquifers in the Central Plateau Basin of Iran based on four quantitative indicators which were implementable according to the available data. For this purpose, monthly quantity and quality observation data of groundwater resources, mean recharge rate, the pumping rate of exploitation wells, streamflow of hydrometric stations, and demographic information were used. The indicators used in this research included the integrated groundwater footprint (environmental dimension), population density at the aquifer level (social dimension), the percentage of groundwater used for agricultural and industrial sectors (economic dimension), and the density of observation wells (institutional dimension), which were calculated for all aquifers from 2000 to 2016. According to the calculated values of four indicators, aquifers were ranked by the PROMETHEE II technique and pairwise comparison of indicators. The results of this research showed that the sustainable management of groundwater resources in the Central Plateau of Iran, especially in the vicinity of the megacities, is relatively weak due to higher population density, less exploitation of groundwater resources for agriculture and industry, poor groundwater monitoring network, drastic groundwater level drop, and inappropriate quality of groundwater. The results indicated that 14.1% of the studied aquifers exhibited good sustainability, while 32.6% indicated poor sustainability. The results of this research are important to identify and prioritize the aquifers that need to adopt new or revised policies to achieve sustainability in the exploitation of these valuable resources.

Keywords: Integrated Assessment Index, Sustainability of Water Resources, Central Plateau Aquifers, Multi-Criteria Decision-Making Technique.

Received: May 1, 2022
Accepted: September 7, 2022

1- Ph.D. of Hydrogeomorphology, Physical Geography Department, University of Tehran, Tehran, Iran.
2- Associate Professor, Physical Geography Department, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: smhosseini@ut.ac.ir
3- M.Sc. of Geomorphology, Physical Geography Department, University of Tehran, Tehran, Iran.
*- Corresponding Author

Dor: 20.1001.1.17352347.1402.19.3.10.9

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

۱- مقدمه

منابع آب‌های زیرزمینی با تأمین ۳۶ درصد از آب آشامیدنی و ۴۲ درصد از آب کشاورزی، یک منبع ارزشمند آب شیرین تجدیدپذیر در سراسر دنیا هستند که تضمین‌کننده سلامت انسان، توسعه اجتماعی–اقتصادی و عملکرد اکوسیستم‌ها در تمام مناطق آب و هوایی، از جمله مناطق شهری و روستایی هستند (Ferguson and Gleeson, 2012; Fraser et al., 2020). بهره‌برداری از منابع آب‌های زیرزمینی عامل اصلی در حفظ معیشت کشاورزان روستایی، دستیابی به امنیت غذایی، امنیت ملی و ثبات در کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه است (Kelley et al., 2015). از سوی دیگر، نیاز روزانه حدود ۲/۵ میلیارد نفر در سراسر جهان به آب تنها از طریق منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود (UNESCO, 2007). منابع آب زیرزمینی در سطح جهان به دلایلی از جمله کاهش نرخ تغذیه از سطح زمین، استحصال بیش‌ازحد به دلیل تأمین نیازهای آبی جمعیت در حال رشد و توسعه فعالیت‌های اقتصادی، تعارض منافع در تأمین نیازها، آلودگی نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای، برنامه‌ریزی غیر بهینه و تغییرات اقلیمی تحت‌فشار رو به افزایش هستند (Doell et al., 2014). در کشور ایران، کسری تجمعی بیش از ۱۴۳ میلیارد مترمکعب از مخازن منابع آب زیرزمینی و ممنوعه بودن بیش از ۴۲۰ دشت از ۶۰۹ دشت کشور که بیش از ۹۰ درصد پتانسیل کل آب زیرزمینی کشور را شامل می‌شوند، قابل‌توجه است (Majlis Research Center, 2020).

در این دوره انسان‌ساخت[1] ذخایر منابع آب زیرزمینی به دلیل فشارهای طبیعی و انسانی تحت تنش بسیار زیادی قرار دارند (Ashraf et al., 2021). پیامدهای مشهود این گونه تنش‌ها بر منابع آب زیرزمینی شامل کاهش حجم ذخیره این منابع، کاهش کیفیت و افزایش تداخل آب شور و شیرین، خشک شدن تالاب‌ها و پیکره‌های آب سطحی که توسط منابع آب زیرزمینی تغذیه می‌شوند و فرونشست زمین است (Zarei et al., 2022). علیرغم فشارهای موجود بر منابع آب زیرزمینی، هنوز این منابع نقش مهمی در حفظ امنیت آب و غذا در کشورهای خشک و نیمه‌خشک دنیا به‌ویژه منطقه MENA[2] (خاورمیانه و شمال آفریقا) دارد. کشور ایران به عنوان دومین کشور بزرگ خاورمیانه، کشوری که در آن خشکی طبیعی با توسعه سریع اجتماعی–اقتصادی، تقاضای رو به رشد آب به ویژه برای کشاورزی و مدیریت ناپایدار زمین و آب آمیخته است، سالانه حدود ۶۰ کیلومتر مکعب در سال از منابع آب زیرزمینی را استحصال می‌کند. این کشور رتبه پنجم را در استحصال منابع آب زیرزمینی دنیا (۸/۷ درصد) بعد از هند (۳۶/۶ درصد)، چین (۱۶/۳ درصد)، ایالات‌متحده (۱۶ درصد) و پاکستان (۹/۳ درصد) و رتبه اول را در منطقه MENA (کشورهای عمده تولیدکننده نفت در منطقه خاورمیانه و شمال آفریقا) دارد (Trichakis et al., 2016).

اثرات کاهش منابع آب‌های زیرزمینی در ایران تنها محدود به امنیت آب و غذایی نیست و شامل چالش‌های اقتصادی (حفر چاه جدید، کف‌شکنی و توسعه چاه‌های موجود، صرف انرژی بیشتر برای پمپاژ آب از اعماق بیشتر و کاهش بازده چاه‌های آب) و بی‌ثباتی اجتماعی (مهاجرت روستاییان و گسترش حاشیه‌نشینی) نیز می‌شود (World Bank., 2010). United Nations (2015) پارادایم پایداری در بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی را به عنوان «توسعه و استفاده از این منابع برای مدت نامحدود بدون ایجاد پیامدهای اجتماعی–اقتصادی یا محیطی غیرقابل قبول» تعریف نموده است. دستیابی به مدیریت پایدار منابع آب‌های زیرزمینی که تمام جنبه‌های چشم‌انداز پایداری برای توسعه آب‌های زیرزمینی را برآورده می‌کند، یک چالش حیاتی برای توسعه پایدار کشورها است (Bui et al., 2019).

در اینجا، سؤال اصلی این است که چگونه می‌توان اطلاعات کمی را برای تصمیم‌گیرندگان جهت کمک به برنامه‌ریزی و مدیریت بهتر و بهبود پایداری منابع آب‌های زیرزمینی فراهم کرد. تلاش‌ها برای تعیین کمیت مدیریت پایدار منابع آب‌های زیرزمینی از طریق شاخص‌ها انجام شده است (Loucks, 2014). علی‌رغم توسعه شاخص‌های مدیریت پایدار منابع آب‌های زیرزمینی، استفاده از یک شاخص یکپارچه که جنبه‌های مختلف پایداری این منابع محدود را لحاظ نموده و در عین حال قابلیت کاربرد برای سفره‌های زیرزمینی با شرایط جغرافیایی مختلف را داشته و به‌راحتی قابل تفسیر برای مدیران باشد، بسیار ضروری است (Pires et al., 2017).

Schreiber (2008) بیان نمود که دولت‌ها مکلفند تا از طریق اقدامات مثبت از جمله سیاست‌گذاری صحیح و وضع قوانین داخلی مناسب در زمینه مدیریت یکپارچه و پایدار آب تلاش نمایند. همچنین، Fani et al. (2016) در پژوهشی چنین نتیجه گرفتند که با وجود اینکه آب یک عامل چندبخشی است و باید در یک مکان مدیریت شود ولی نحوه مدیریت آن باید طوری باشد که همه بخش‌های مصرف (اقتصادی، اجتماعی و محیطی) با یکدیگر تعامل سازنده داشته باشند. Nazari et al. (2019) در یک پژوهش بیان داشتند که تجدید نظر در زمینه کشاورزی تشدیدشده، افزایش آگاهی و نگرش تصمیم‌گیرندگان به سمت خطر برنامه‌های توسعه منابع آب کوتاه‌بینانه، ترقی دادن صنایع کشاورزی محور و توسعه دادن بـرنامه‌های یکپارچه بـرای بهبود بخشیدن کارایی آب، استراتژی‌هایی هستند کـه

می‌تـوانند در مدیریت مؤثرتر منابع آب کشاورزی در ایران ایفا نقش کنند. Gaye & Tindimugaya (2019)، Foster et al. (2004) و Singh et al. (2019) به ترتیب به ارزیابی تکنیک‌های برآورد تغذیه آب زیرزمینی برای مدیریت منابع پایدار، آبخوان کواترنر دشت شمال چین–ارزیابی و دستیابی به پایداری منابع آب زیرزمینی، ابزار نقشه‌برداری سطح آب زیرزمینی: یک برنامه وب منبع باز برای ارزیابی پایداری آب‌های زیرزمینی، چالش‌ها و فرصت‌ها برای مدیریت پایدار منابع آب‌های زیرزمینی در آفریقا پرداختند. Boazar et al. (2019) در تحقیقی در زمینه بحران آب ایران چنین ایراد نمودند که دولت ایران در پاسخ به بحران آب شدید رویکردش را در مورد مدیریت منابع آب در بخش‌های مختلف از مدیریت عرضه به مدیریت تقاضا تغییر داده است.

حوضه فلات مرکزی ایران، تحت اضافه برداشت شدید منابع آب‌های زیرزمینی است که در آن مقادیر برداشت، بیش از سه برابر نرخ تغذیه طبیعی آن است. این منجر به کاهش قابل‌توجه منابع آب‌های زیرزمینی و خشک‌شدن چاه‌ها در این حوضه شده است. در این حوضه پیامدهای اجرای پروژه‌های آب‌بر به طرق گوناگون از جمله کاهش تولیدات کشاورزی، تغییر کاربری اراضی، رشد بیکاری، افزایش مهاجرت و تخلیه روستاها و فرونشست زمین نمایان شده است (Bagheri et al., 2021). با توجه به اینکه کاهش کمیت و کیفیت گسترده منابع آب‌های زیرزمینی در ایران به‌ویژه در حوضه فلات مرکزی عمدتاً ناشی از محرک‌های انسانی است، ارزیابی مدیریت منابع آب زیرزمینی در این حوضه بر اساس شاخص‌های استاندارد بین‌المللی می‌تواند اطلاعات مفید و لازم را برای تصمیم‌گیرندگان در راستای کمک به تصمیمات مدیریتی برای بهبود پایداری منابع آب‌های زیرزمینی فراهم می‌کند.

شاخص‌ها، ابزارهای تصمیم‌گیری قدرتمندی هستند و اتخاذ شاخص‌ها برای ارزیابی و نظارت بر پیشرفت به سمت توسعه پایدار به شدت توسط دانشمندان، سیاست‌گذاران، نهادهای بین‌المللی، دولت‌ها، بخش تجارت و سازمان‌های غیردولتی توصیه می‌شود (Bolcárová and Kološta., 2015). کاربرد شاخص‌های بهره‌برداری و مدیریت آب بدون شک می‌تواند به تخصیص بهتر این منابع محدود کمک کند. با این وجود، برای تدوین آن‌ها، نه تنها باید به عنوان یک مسأله فنی درنظر گرفته شوند، بلکه باید سایر جنبه‌های محیط‌زیستی، اجتماعی، سازمانی و اقتصادی نیز در نظر گرفته شود (Kang and Lee, 2011). Pandey et al. (2011) پنج بعد اقتصادی، اجتماعی، محیط زیستی، سازمانی و روابط و اعتماد متقابل بین چهار بعد را پیشنهاد نمود. این محققین معتقدند که بعد پنجم توسعه پایدار، رد و بدل نمودن اطلاعات بین چهار بخش است.

با توجه به اهمیت منابع آب زیرزمینی در ایران، مطالعات در زمینه ارزیابی مدیریت پایدار منابع آب‌های زیرزمینی با درنظر گرفتن تمامی ابعاد توسعه پایدار (اجتماعی، اقتصادی، محیط‌زیستی و سازمانی) بسیار محدود است. Hosseini et al. (2019)، ۱۳ شاخص مرتبط با جنبه محیط‌زیست را برای ارزیابی مدیریت پایدار منابع آب‌های زیرزمینی در ۳۰ سفره اصلی در سراسر ایران پیاده نمودند. نتایج آن‌ها وضعیت ناپایدار مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی در این کشور را از منظر محیط‌زیستی نشان داد. با این وجود، تحلیل جامعی را به منظور ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی بر اساس شاخص کمی که شامل همه مؤلفه‌های پایداری (محیط‌زیست، اجتماعی، اقتصادی و نهادی) باشد، در داخل کشور انجام نشده است. Kardan Moghaddam et al. (2021) دو شاخص جدید را برای ارزیابی وضعیت پایداری کمی و کیفی آبخوان معرفی نمودند: ۱) شاخص احیای کمی آبخوان با استفاده از نتایج شبیه‌سازی شده مدل MODFLOW با درنظر گرفتن تفاوت بین سطح آب شبیه‌سازی شده و مقدار مطلوب بر اساس سناریوها و ۲) شاخص احیای کیفیت آبخوان بر اساس آسیب‌پذیری آبخوان DRASTIC-LU و درصد اهداف کل جامدات محلول (TDS^3) مورد نظر در پایان دوره شبیه‌سازی.

این پژوهش پایداری مدیریت منابع آب زیرزمینی حوضه فلات مرکزی را از طریق توسعه یک شاخص کمی مناسب که چهار مؤلفه ذکرشده پایداری در مقیاس آبخوان را شامل می‌شود، ارزیابی می‌کند. برای هر مؤلفه، شاخص‌های کمی بر اساس رعایت استانداردهای علمی بین‌المللی و در دسترس بودن داده‌های مربوط به آبخوان انتخاب‌شده و با فرآیند تحلیل سلسله مراتبی به شاخص یکپارچه مدیریت پایدار منابع آب‌های زیرزمینی تجمیع شدند. در نهایت، رتبه‌بندی ۱۸۴ سفره زیرزمینی موجود در حوضه مرکزی بر اساس مقادیر شاخص مدیریت پایدار منابع آب‌های زیرزمینی انجام شده است. لذا هدف از انجام این پژوهش ارائه شاخص‌های فوق‌الذکر در مدیریت منابع آب زیرزمینی و مشخص نمودن مقادیر پایداری آبخوان‌ها در محدوده تحت مطالعه جهت اولویت‌بندی آن‌ها برای اتخاذ راهکارها یا سیاست‌های جدید مدیریتی می‌باشد. نوآوری تحقیق حاضر در جهت شناخت شاخص‌های اشاره‌شده، تأثیر هر کدام بر منابع و به دست آوردن مقادیر هر شاخص در مدیریت پایداری منابع آب زیرزمینی است. آگاهی از وضعیت پایداری منابع آب زیرزمینی در آبخوان‌های مختلف و رتبه‌بندی آن‌ها به مدیران و تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا مناطقی را که نیاز به

سیاست‌های جدید و یا بازنگری آن‌ها برای دستیابی به پایداری در مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی دارند، اولویت‌بندی کنند.

۲- منطقه مورد مطالعه

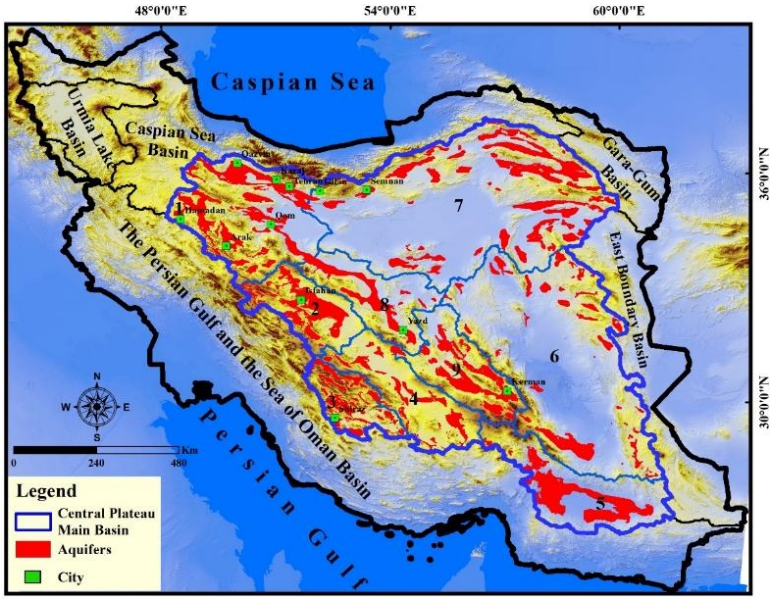
حوضه آبریز مرکزی، بزرگ‌ترین حوضه آبریز اصلی ایران به شمار می‌رود و وسعتی معادل ۸۲۵/۷ هزار کیلومترمربع دارد. این حوضه با اقلیم گرم و خشک به‌طور کامل درون کشور قرار دارد. این حوضه آبریز از شمال به رشته‌کوه‌های البرز، از غرب به رشته‌کوه‌های زاگرس، از جنوب به کوه‌های فارس و بلوچستان و از مشرق به ارتفاعات واقع در مشرق ایران محدود می‌شود (شکل ۱). این حوضه، کُل یا بخشی از استان‌های اصفهان، یزد، کرمان، فارس، کرج، تهران، قم، مرکزی، سمنان، همدان، زنجان، قزوین، هرمزگان، چهارمحال بختیاری، سیستان و بلوچستان، خراسان رضوی و جنوبی، شمالی را دربر می‌گیرد. این پهنه جغرافیایی از ۹ حوضه آبریز درجه دو شامل دریاچه نمک، گاوخونی، دریاچه‌های طشک-بختگان و مهارلو، کویر ابرقو–سیرجان، هامون جازموریان، کویر لوت، کویر مرکزی، کویر سیاه کوه، کویر درآنجیر تشکیل شده است. مقدار بارش متوسط سالانه این حوضه ۱۶۵ میلی‌متر در سال است و تنها ۳۰ درصد از حجم آب حاصل از نزولات جوی کل کشور را در خود دارد. بیشترین و کمترین مقدار بارش در حوضه آبریز تشک-بختگان و مهارلو (به مقدار ۴۱۴ میلی‌متر در سال) و کویر سیاه کوه (به مقدار ۸۶ میلی‌متر در سال) است (Iran Water Statistical Yearbook, 2014). متوسط حجم جریان سطحی در حوضه آبریز مرکزی ۱۳/۳۱ میلیارد مترمکعب در سال است. مقدار متوسط تبخیر–تعرق پتانسیل سالانه این حوضه حدود ۳۵۰۰ میلی‌متر در سال برآورد شده است (Iran Water Resources Management Company, 2014). بیشترین بهره‌برداری سالانه از آب‌های زیرزمینی در این حوضه حدود ۱۹۷۶ میلیون مترمکعب در سال که با توجه به میانگین بهره‌برداری در کشور که حدود ۱۲۵/۸ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد. از طرفی، بیشترین مصرف در بخش کشاورزی با میانگین ۱۶۸/۸ میلیون مترمکعب و برای بخش خانگی و صنعت در حدود ۲۶/۸ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد (Milan et al., 2023).

تعداد ۱۸۴ آبخوان از نوع آزاد در حوضه آبریز فلات مرکزی شناسایی‌شده و تغییرات تراز و کیفیت آب زیرزمینی به‌صورت ماهانه توسط وزارت نیرو پایش می‌شود. سفره‌های آب زیرزمینی این حوضه به دلیل بارش کمتر و افزایش پمپاژ در آن دارای کاهش قابل‌توجه سطح آب زیرزمینی هستند. بطوریکه تأثیرات ناشی از بهره‌برداری زیاد به‌صورت فرونشست، تخریب کیفیت آب زیرزمینی اعلام شده است. میانگین نوسانات سطح آب زیرزمینی این حوضه ۰/۵۶- متر در سال است و کسری مخزن آب زیرزمینی در کل حوضه حدود ۳/۵۶ میلیارد مترمکعب در سال برآورد شده است. حوضه آبریز کویر نمک دارای بیشترین کاهش سطح آب زیرزمینی (حوضه آبریز دریاچه نمک با وسعت ۹۳۴۱۰ کیلومترمربع، استقرار حدود ۳۰ درصد از کل جمعیت کشور در این حوضه که ۵/۶ درصد از کل وسعت کشور را به خود اختصاص داده است، باعث شده است فشار زیادی بر منابع آب زیرزمینی موجود وارد شود، (Sadeghi et al., 2022)) است (۰/۹۸- متر در سال) (Iran Water Statistical Yearbook, 2014). همچنین، با توجه به پژوهش Ashraf et al. (2021) بیشترین میزان افت سطح آب زیرزمینی از میان ۳۰ حوضه کشور، در حوضه دریاچه نمک اتفاق افتاده است.

۳- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، ارزیابی میزان پایداری مدیریت منابع آب زیرزمینی در حوضه مرکزی ایران، بر اساس آمار و اطلاعات ماهانه تراز و کیفیت آب زیرزمینی، دبی ایستگاه‌های هیدرومتری، دبی پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری برای بخش صنعت و کشاورزی برای سال‌های ۱۳۷۹- ۱۳۹۵ و همچنین مقادیر متوسط تغذیه آبخوان بر پایه گزارش‌های بیلان منتهی به ۱۳۹۰ و تراکم جمعیت بر اساس آمار و اطلاعات جمعیتی سال ۱۳۹۵ مورد بررسی و آنالیز قرار گرفته و برای تعداد ۱۸۴ آبخوان موجود در حوضه، با توجه به اطلاعات موجود در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.3 نقشه هر کدام از پارامترهای ارائه شده تهیه شد. از طرفی دیگر، جهت برآورد و تهیه شاخص‌ها با توجه به بعد درونی هر شاخص (شاخص محیطی، (اطلاعات کمیت و کیفیت)، شاخص اجتماعی، (آمار جمعیتی)، شاخص اقتصادی، (مقادیر مصرفی آب در بخش کشاورزی و صنعت) و شاخص سازمانی، (بر اساس تراکم چاه‌های مشاهده‌ای)) و بر اساس روابط ۲، ۳، ۴ و ۵ در محیط ArcGIS 10.3 با هم تلفیق و نتایج به دست آورده شد. رتبه‌بندی آبخوان‌ها با توجه به خروجی ۴ شاخص به‌دست‌آمده با استفاده از تکنیک PROMETHEE II و امتیاز جریان خالص مربوطه (Φ) و تابع ترجیحی نوع گاوسی انجام شده و نقشه آن تهیه گردید.

چهار شاخص بر اساس مطالعات قبلی، داده‌های در دسترس و امکان پیاده‌سازی آن‌ها در همه آبخوان‌های موجود در این حوضه، انتخاب شدند: ۱) شاخص ردپای یکپارچه آب زیرزمینی (IGWF)[۴] برای بعد محیط‌زیستی، ۲) شاخص تراکم جمعیت (DPop)[۵] برای بعد اجتماعی، ۳) شاخص درصد آب‌های زیرزمینی مورد استفاده برای بخش‌های کشاورزی و صنعتی (PGW_{ai})[۶] برای بعد اقتصادی و ۴) شاخص تراکم چاه‌های مشاهده‌ای (D_{OW})[۷] برای بعد سازمانی.



No.	Second Order Basin	Area (km^2)
1	Namak Lake	93,410
2	Ghavkhoni	41,778
3	Tashk-Bakhtegan and Maharloo	31,578
4	Abarkuh-Sirjan	57,225
5	Hamun-e Jaz Murian	69,417
6	Kavir-e Lut	206,242
7	Kavir-e Markazi	226,610
8	Kavir-e Siah Kuh	48,980
9	Kavir-e Daranjir	50,509

Fig. 1- Location of the Central Plateau Basin in the Iran, the second order basins included in this basin, and the 184 aquifers considered in this study

شکل ۱- موقعیت حوضه آبریز فلات مرکزی در ایران، حوضه‌های آبریز درجه دو موجود در این حوضه و محدوده ۱۸۴ آبخوان مورد مطالعه در حوضه آبریز فلات مرکزی

۳-۱- شاخص یکپارچه ردپای آب زیرزمینی (IGWF)

این شاخص وضعیت مؤلفه محیط‌زیستی پایداری منابع آب‌های زیرزمینی را بیان می‌کند و اولین بار توسط Gleeson et al. (2012) به عنوان مساحت مورد نیاز برای استفاده پایدار از آب‌های زیرزمینی برای یک سفره معرفی شد:

$$GWF = A_{aq} \times \frac{\Delta H}{R - BF} \quad (۱)$$

که در آن، GWF: ردپای آب زیرزمینی است، ΔH: میانگین تغییرات سالانه سطح آب زیرزمینی (m) است، R: متوسط نرخ تغذیه سالانه به آبخوان (m) است،BF: سهم آب زیرزمینی در جریان سطحی (m) است (که در طول دوره جریان کم بسیار مهم است). Aaq: مساحت آبخوان (m^2) است. به گفته Smakhtin et al. (2004)، BF را می‌توان برابر با دهک پایین جریان متوسط ماهانه رودخانه (Q_{10}) درنظر گرفت (جریان ماهانه که ۹۰٪ ماه‌های سال از آن فراتر می‌رود). مقادیر بیشتر GWFنشان‌دهنده مدیریت غیر پایدار منابع پایدار آب زیرزمینی است. متوسط نرخ تغذیه سالانه آبخوان‌های کشور توسط دفتر مطالعات پایه شرکت مدیریت منابع آب ایران بر اساس رابطه بیلان آبی طولانی‌مدت آبخوان به‌دست‌آمده است و از این مقادیر در این پژوهش نیز استفاده شده است. شاخصGWF، Kourgialas et al. (2018) با گنجاندن نقش حیاتی کیفیت آب زیرزمینی (به‌عنوان‌مثال، هدایت الکتریکی) در معادله (۱) به IGWF ارتقا یافت تا آن را به یک ابزار تصمیم‌گیری صحیح برای مدیریت آب زیرزمینی تبدیل کند:

$$IGWF = GWF \times \left(1 + \frac{A_{crit}}{A_{aq}}\right) \quad (۲)$$

که در آن A_{crit}: مساحت بخشی از سفره آب زیرزمینی با مشکل آلودگی است. در این مطالعه، بخشی از مساحت آبخوان که آب زیرزمینی آن دارای هدایت الکتریکی بالاتر از ۱۰۰۰ µS/cm دارد، بر اساس EPA (2001) به عنوان A_{crit} درنظر گرفته شده است. برای محاسبه شاخص IGWF، سری زمانی داده‌های ماهانه تراز آب زیرزمینی، دبی ایستگاه‌های هیدرومتری و کیفیت آب زیرزمینی در طی سال‌های ۱۳۷۹–۱۳۹۵ برای تمام آبخوان‌های موجود در حوضه فلات مرکزی از شرکت مدیریت منابع آب ایران اخذ شده است. همچنین مقادیر متوسط تغذیه آبخوان‌ها و مساحت هر آبخوان از گزارش‌های طرح جامع آب کشور (۱۳۸۷) استخراج شد.

۳-۲- شاخص تراکم جمعیت در سطح آبخوان (D_{pop})

این شاخص وضعیت مؤلفه اجتماعی مدیریت پایدار منابع آب‌های زیرزمینی را نشان می‌دهد و می‌توان با تقسیم تعداد افرادی که در سطح آبخوان (N_{pop}) زندگی می‌کنند بر مساحت آبخوان محاسبه کرد:

$$D_{pop} = \frac{N_{pop}}{A_{aq}} \quad (۳)$$

مقدار بیشتر D_{pop} نشان‌دهنده تراکم بیشتر جمعیت در سطح آبخوان است که منجر به بهره‌برداری بیشتر از منابع آب زیرزمینی برای پاسخگویی به تقاضای آب بیشتر در بخش‌های مختلف (شرب، کشاورزی و صنعت) می‌شود. داده‌های جمعیت شهرها و روستاها مربوط به سرشماری سال ۱۳۹۵ در محدوده هر آبخوان برای محاسبه این شاخص استفاده شده است.

۳-۳- شاخص درصد آب زیرزمینی مورد استفاده برای بخش‌های کشاورزی و صنعتی (PGW_{ai})

این شاخص نشان‌دهنده وضعیت مؤلفه اقتصادی مدیریت پایدار منابع آب‌های زیرزمینی است. کشاورزی جزء غالب اقتصاد جهانی است و در مناطقی که مصرف آب کشاورزی غالب است (مانند ایران)، فعالیت‌های کشاورزی جزء حیاتی اقتصاد هستند (World Bank, 2010). بنابراین جایی که منابع آب زیرزمینی برای آبیاری یا صنعت مصرف می‌شود، PGW_{ai} اهمیت منابع آب‌های زیرزمینی را در امنیت غذایی و توسعه اجتماعی و اقتصادی روستایی و شهری نشان می‌دهد (Shah et al., 2003):

$$PGW_{ai} = \frac{GW_{ai}}{GW_t} \qquad (۴)$$

GW_t: کل حجم آب برداشت‌شده از منابع آب زیرزمینی در سال و GW_{ai}: حجم آب زیرزمینی تخصیص داده‌شده به بخش‌های کشاورزی و صنعت است. داده‌های حجم آب زیرزمینی برداشت‌شده توسط چاه‌ها، چشمه‌ها و قنوات در هر آبخوان بر اساس داده‌های ارائه‌شده در طرح جامع آب کشور (۱۳۸۷) برای محاسبه این شاخص استفاده شده است.

۳-۴- شاخص تراکم چاه‌های مشاهده‌ای (D_{ow})

این شاخص میزان مسئولیت‌پذیری سازمانی را به منظور پایش تغییرات تراز آب زیرزمینی کمی می‌کند و می‌توان با تقسیم تعداد چاه‌های مشاهده‌ای فعال (۱۳۸۷) (N_{ow}) بر مساحت آبخوان (A_{aq}) محاسبه کرد:

$$D_{ow} = \frac{N_{ow}}{A_{aq}} \qquad (۵)$$

داده‌های پایش منابع آب زیرزمینی، اگر به موازات تهیه نقشه‌ها و مدل‌سازی استفاده شوند، تصویر کاملی از شرایط سفره‌های زیرزمینی مورد نیاز برای ارزیابی صحیح و کامل منابع آب زیرزمینی را منعکس می‌کنند و به فرآیند تصمیم‌گیری برای حفاظت از این منابع کمک می‌کنند (Pandey et al., 2011).

۳-۵- رتبه‌بندی آبخوان‌ها بر اساس روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره

پس از تعریف شاخص‌ها، تکنیک PROMETHEE II که توسط Brans et al. (1986) توسعه یافته است برای رتبه‌بندی آبخوان‌ها با توجه به مقادیر چهار شاخص درنظر گرفته شده، استفاده شد. این روش مبتنی بر مقایسه زوجی شاخص‌ها برای به دست آوردن ترجیح نسبی یک شاخص بر سایرین است. این تکنیک برای رتبه‌بندی n گزینه (تعداد آبخوان‌ها) بر اساس m معیار (چهار شاخص) سه مرحله را درنظر می‌گیرد (Brans and Vincke, 1985): ۱) تعریف یک تابع ترجیحی برای هر شاخص، ۲) محاسبه شاخص ترجیحی چند معیاره و ۳) محاسبه امتیاز جریان خالص (Φ):

$$\Phi(a_i) = \frac{1}{n-1} \times \sum_{k=1}^{m} \sum_{a_j \in A} w_k \times \left[P_k(a_i, a_j) - P_k(a_j, a_i)\right] \qquad (۶)$$

که $P_k(a_i, a_j)$: تابع ترجیحی است که درجه ترجیح بیان شده توسط تصمیم‌گیرندگان را برای گزینه a_i نسبت به a_j را نشان می‌دهد. شش نوع توابع ترجیحی شامل تابع معمولی، U شکل، V شکل، پله‌ای، خطی و گاوسی در ادبیات فنی استفاده شده است، W_K: وزن نسبی شاخص I_k است (k=1,2,3,4). رتبه‌بندی گزینه‌ها توسط PROMETHEE II بر اساس مقادیر Φ است که در بازه مقداری در محدوده [0, 1] است. بهترین آبخوان از نظر شاخص‌های مورد نظر آن است که دارای بالاترین امتیاز جریان خالص (Φ) باشد. برای به دست آوردن وزن‌های نسبی مناسب شاخص‌ها (W_K)، دنباله‌ای از قضاوت‌های مقایسه زوجی توسط خبره‌ها بر اساس فرآیند تحلیل سلسله مراتبی Saaty (2008) استفاده می‌شود.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- داده‌های اولیه

توزیع مکانی داده‌های اولیه مورد نیاز برای محاسبه چهار شاخص محیط‌زیستی (IGWF)، اجتماعی (D_{pop})، اقتصادی (PGW_{ai}) و نهادی (D_{OW}) در ۱۸۴ آبخوان در شکل ۲ نشان داده شده است. در ادامه هر یک از این لایه‌های اطلاعاتی تشریح شده‌اند:

۴-۱-۱- تغذیه متوسط سالانه آبخوان: با توجه به شکل ۲-a، مقادیر تغذیه سالانه آبخوان‌های موردمطالعه طی بازه ۱۳۷۹- ۱۳۹۵ بین صفر (آبخوان علی‌آباد هامون) تا بیش از یک متر در سال (آبخوان‌های ارسنجان و سعادت‌آباد) و به‌طور متوسط ۰/۱۸ متر در سال است. آبخوان‌های بخش غربی حوضه آبریز دارای تغذیه سالانه بالاتری نسبت به بقیه هستند.

۴-۱-۲- تغییرات سطح آب زیرزمینی: تغییرات متوسط سالانه سطح آب زیرزمینی که از داده‌های بلندمدت ثبت شده در آبخوان‌های موردمطالعه طی دوره ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۵ به دست آمده است، در شکل ۲-b نشان داده شده است. مقادیر تغییرات سطح آب زیرزمینی بین ۲/۳۷- متر در سال (آبخوان ارسنجان) تا ۰/۲۵+ (آبخوان دماوند) به‌طور متوسط ۰/۵۴- برای آبخوان‌های این حوضه آبریز به دست آمده است. از بین ۱۸۴ آبخوان موردمطالعه در حوضه آبریز فلات مرکزی، تنها دو آبخوان دماوند (عبور رودخانه دماوند و رودبار و تغذیه از ارتفاعات کوهستانی) و انارک (اتخاذ تصمیمات مدیریتی در برداشت از منابع) دارای افزایش تراز آب زیرزمینی هستند، ۳ آبخوان بدون تغییرات تراز آب زیرزمینی و بقیه (۹۷٪) دارای روند کاهشی در تراز آب زیرزمینی هستند. آبخوان‌های مرکزی و جنوب شرقی حوضه فلات مرکزی دارای کاهش تراز آب زیرزمینی کمتری هستند.

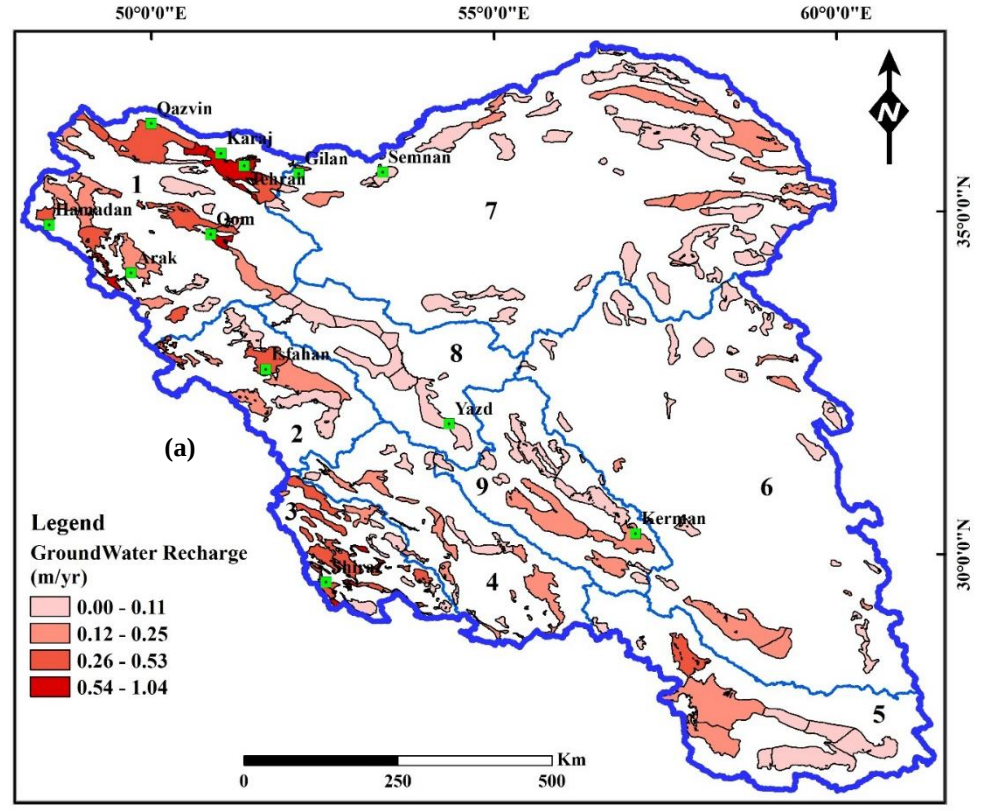
۴-۱-۳- هدایت الکتریکی (EC) آب زیرزمینی: به عنوان نماینده مقدار املاح موجود در آب زیرزمینی، تغییرات مکانی این پارامتر کیفی مربوط به سال آبی ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۵ در شکل ۲-c نشان داده شده است. بیشترین مقدار EC آب زیرزمینی مربوط به آبخوان مسیله در استان قم (۱۴۸۳۰ میکرو موس بر سانتی‌متر) و سپس آبخوان کویرسیاه‌کوه استان یزد (۱۲۷۴۴ میکروموس بر سانتی‌متر) و کمترین EC در آب زیرزمینی مربوط به آبخوان‌های چهل خانه و چادگان (استان اصفهان) با EC کمتر از ۳۵۰ میکرو موس بر سانتی‌متر است. به‌طورکلی مقدار املاح در آب زیرزمینی آبخوان‌های واقع در بخش مرکزی و شرقی حوضه آبریز فلات مرکزی بالاتر از بقیه مناطق است. مقدار متوسط EC همه ۱۸۴ آبخوان مورد مطالعه حدود ۳۷۱۰ میکروموس بر سانتی‌متر است.

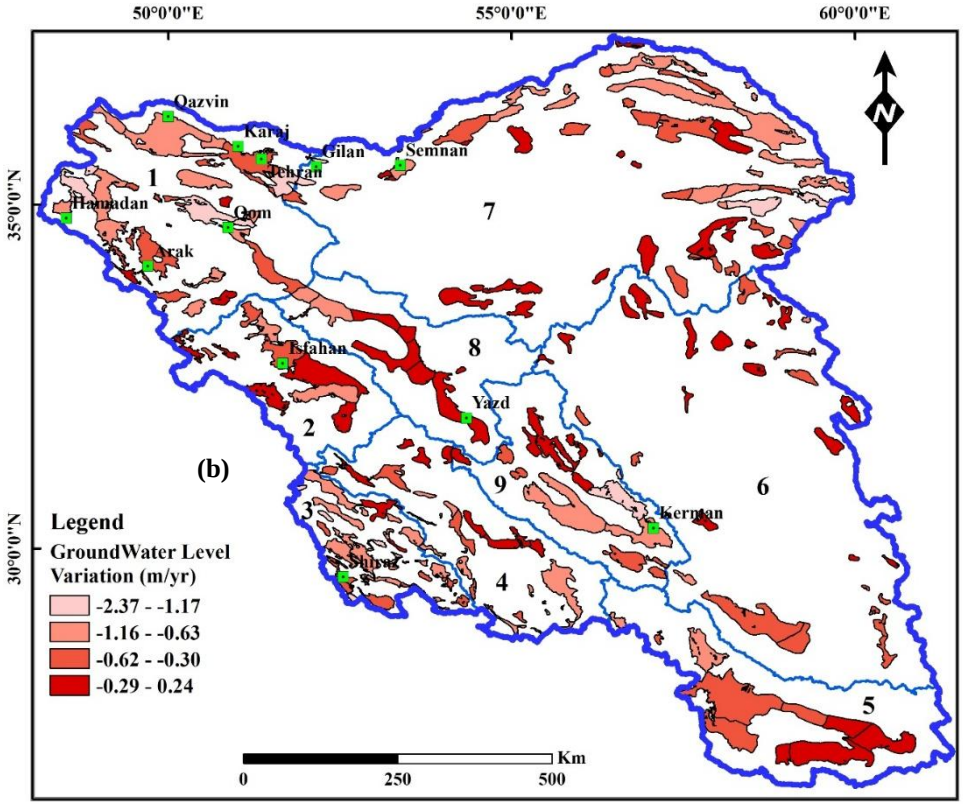
۴-۱-۴- مشارکت آب زیرزمینی در جریان رودخانه (دبی پایه رودخانه): به عنوان یکی دیگر از متغیرهای مورد نیاز برای محاسبه ردپای آب زیرزمینی طی بازه ۱۳۷۹-۱۳۹۵ (رابطه ۱)، مقدار دبی پایه متوسط رودخانه‌های جاری در سطح آبخوان بر اساس روش آماری دهک پایین محاسبه و نقشه توزیع مکانی مقادیر آن در شکل ۲-d ارائه شده است. بیش از ۹۲ درصد آبخوان‌های موجود در حوضه فلات مرکزی هیچ مشارکتی در منابع آب سطحی ندارند (دبی پایه رودخانه‌های موجود در سطح آبخوان، صفر هستند). آبخوان کوهپایه-سگزی (واقع در استان اصفهان) دارای بیشترین مقدار دبی پایه به مقدار ۲/۲۶ مترمکعب در ثانیه است. بعد از آن آبخوان‌های بوئین-میان‌دشت در استان اصفهان (۰/۴۷ مترمکعب در ثانیه) و ورامین در استان تهران (جاجرود) (۰/۲۸ مترمکعب در ثانیه) دارای بیشترین مقدار مشارکت آب زیرزمینی در آب سطحی هستند.

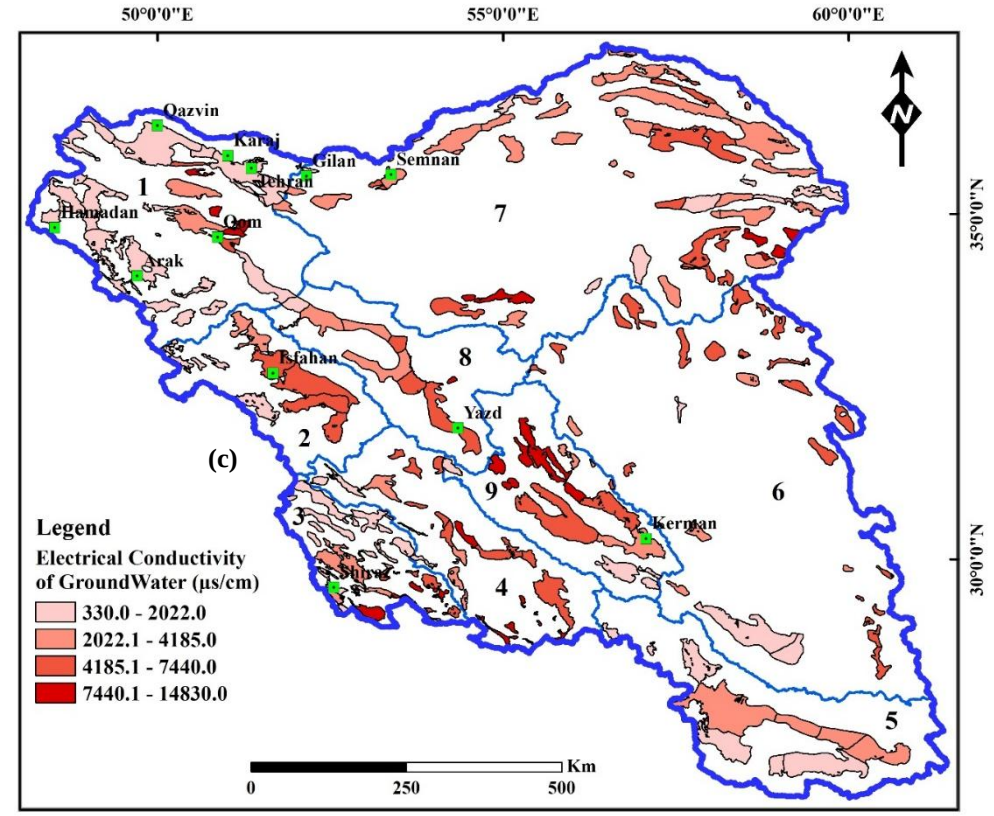
۴-۱-۵- تعداد چاه‌های مشاهده‌ای پایش آب زیرزمینی: به عنوان یک شاخص مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی مربوط به بعد سازمانی، تعداد چاه‌های مشاهده‌ای که وزارت نیرو و شرکت‌های تابعه آن در آبخوان‌های موردمطالعه حفر نمودند و در سال ۱۳۸۷ فعال بودند، در نظر گرفته شدند. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۲-e، بیشترین تعداد چاه‌های مشاهده‌ای در شبکه پایش منابع آب زیرزمینی مربوط به آبخوان کوهپایه-سگزی استان اصفهان (تعداد ۲۲۱ چاه) و سپس آبخوان یزد-اردکان (۱۹۲ چاه) و کمترین آن مربوط به آبخوان کویربجستان (۲ چاه) است. متوسط تعداد چاه‌های مشاهده‌ای آبخوان‌های مورد مطالعه ۴۱ چاه است.

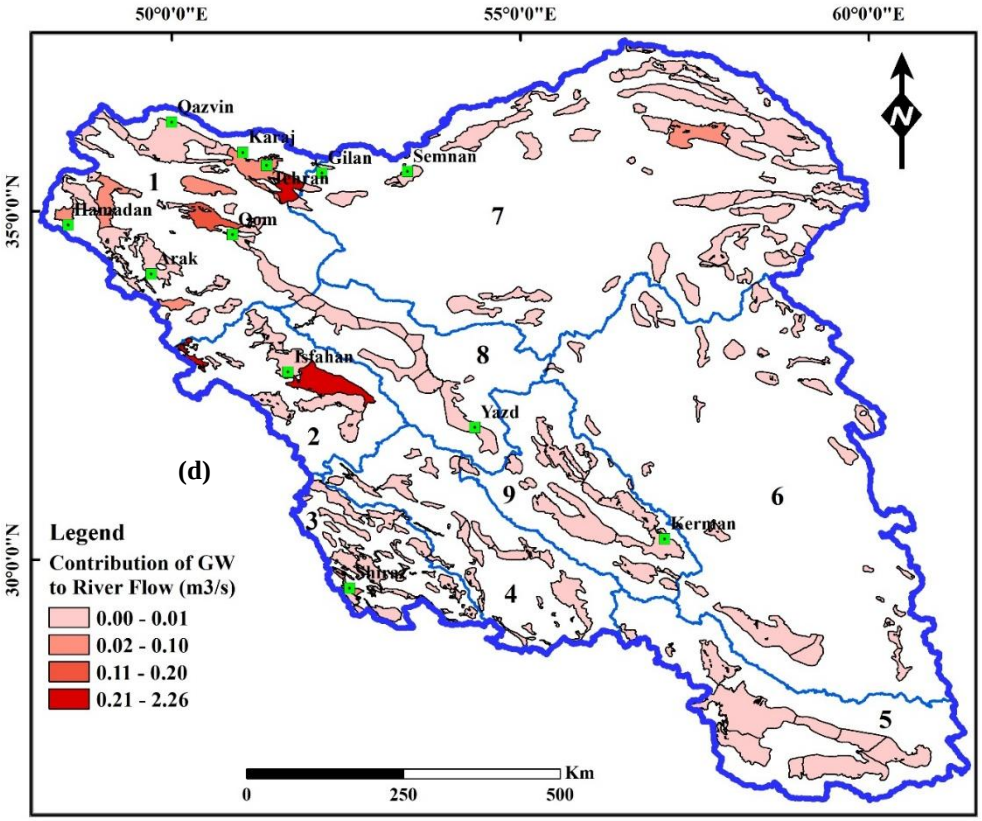
۴-۱-۶- جمعیت ساکن در سطح آبخوان: بر اساس آمار سرشماری سراسری نفوس و مسکن در سال ۱۳۹۵، توزیع جمعیت ساکن در سطح آبخوان‌های مورد مطالعه در شکل ۲-f نشان داده شده است. بیشترین جمعیت ساکن مربوط به آبخوان تهران-کرج (بیش از ۱۲/۳ میلیون نفر) و سپس آبخوان اصفهان-برخوار (بیش از ۲/۷ میلیون نفر) ساکن هستند که بیشتر بر شهرهای بزرگ مانند تهران، اصفهان، شیراز، قم و قزوین منطبق هستند. حدود ۹ درصد (۱۶ آبخوان) از آبخوان‌های مورد مطالعه که بیشترین در نواحی کویری و مرکزی حوضه هستند، هیچ جمعیتی ساکن نیست. در ۱۶ درصد آبخوان‌ها (۳۰ آبخوان) جمعیت ساکن کمتر از ۱۰۰۰ نفر است. متوسط جمعیت ساکن در سطح آبخوان‌های مورد مطالعه حدود ۱۷۱ هزار نفر است.

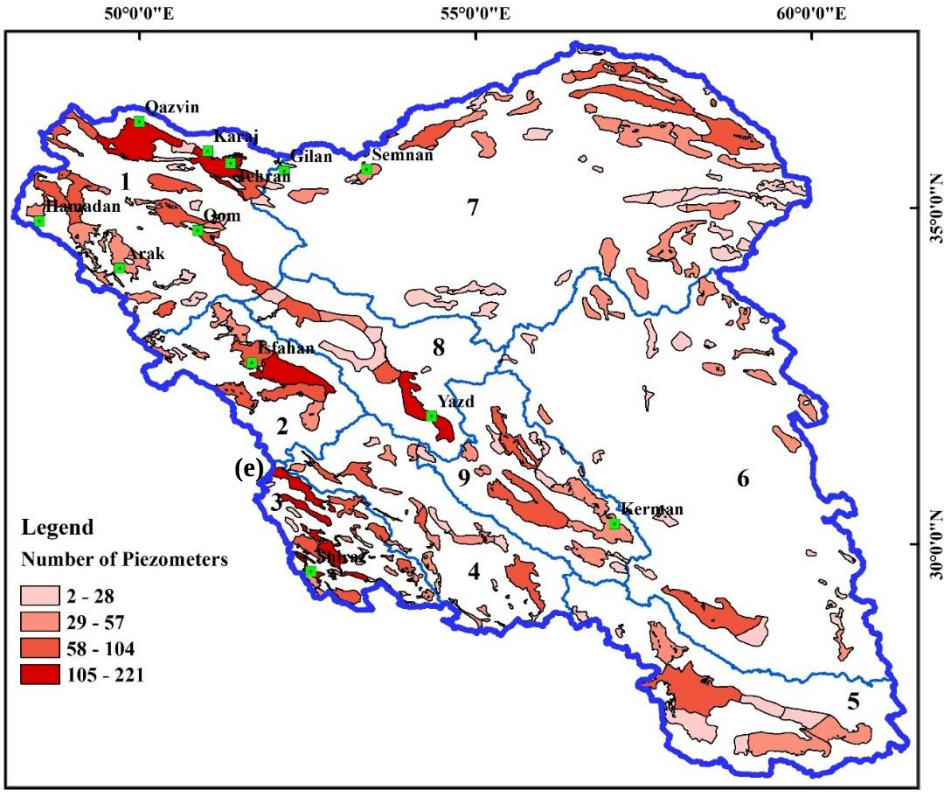
۴-۱-۷- مصرف آب زیرزمینی در بخش‌های صنعت و کشاورزی: حجم آب زیرزمینی مصرفی توسط بخش‌های صنعت و کشاورزی در آبخوان‌های مورد مطالعه بر اساس آمار سال آبی ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۵ در شکل‌های ۲-g و ۲-h نشان داده شده است. بیشترین حجم آب زیرزمینی مصرفی در بخش صنعت به ترتیب در آبخوان تهران-کرج (بیش از ۷۳ میلیون مترمکعب در سال)، آبخوان مرودشت-خرامه (۵۶ میلیون مترمکعب در سال) و سپس آبخوان قزوین (۵۳ میلیون مترمکعب در سال) است. در ۱۸ درصد آبخوان‌های مورد مطالعه (۳۴ آبخوان)، آب زیرزمینی برای بخش صنعت تخصیص داده نمی‌شود.

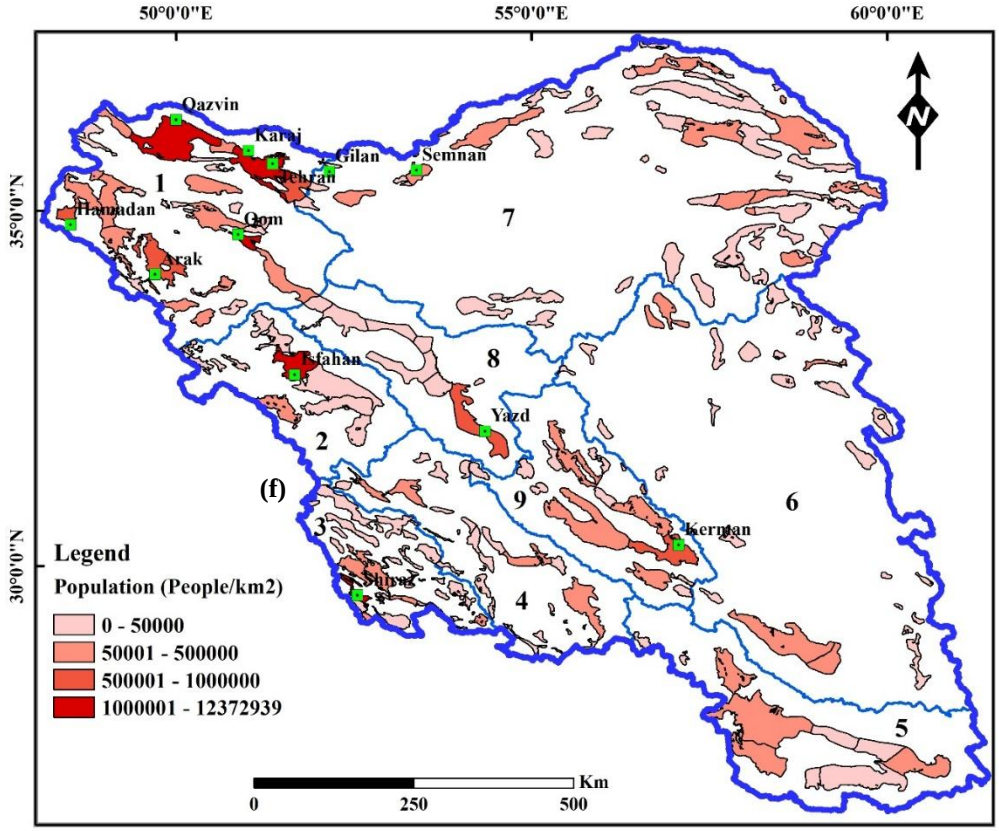

50°0'0"E
55°0'0"E
60°0'0"E
35°0'0"N
30°0'0"N
Qazvin
Karaj
Gilan
Semnan
Tehran
Hamadan
Qom
Arak
Isfahan
Yazd
Kerman
Shiraz
1
2
3
4
5
6
7
8
9
(a)
Legend
GroundWater Recharge (m/yr)
0.00 - 0.11
0.12 - 0.25
0.26 - 0.53
0.54 - 1.04
Km
0
250
500
N


50°0'0"E
55°0'0"E
60°0'0"E
35°0'0"N
30°0'0"N
Qazvin
Karaj
Gilan
Semnan
Tehran
Hamadan
Qom
Arak
Isfahan
Yazd
Kerman
Shiraz
1
2
3
4
5
6
7
8
9
(b)
Legend
GroundWater Level Variation (m/yr)
-2.37 - -1.17
-1.16 - -0.63
-0.62 - -0.30
-0.29 - 0.24
Km
0
250
500
N


50°0'0"E
55°0'0"E
60°0'0"E
35°0'0"N
30°0'0"N
Qazvin
Karaj
Gilan
Semnan
Tehran
Hamadan
Qom
Arak
Esfahan
Yazd
Kerman
Shiraz
1
2
3
4
5
6
7
8
9
(c)
Legend
Electrical Conductivity
of GroundWater (µs/cm)
330.0 - 2022.0
2022.1 - 4185.0
4185.1 - 7440.0
7440.1 - 14830.0
Km
0
250
500


50°0'0"E
55°0'0"E
60°0'0"E
35°0'0"N
30°0'0"N
Qazvin
Karaj
Gilan
Semnan
Tehran
Hamadan
Qom
Arak
Esfahan
Yazd
Kerman
Shiraz
1
2
3
4
5
6
7
8
9
(d)
Legend
Contribution of GW
to River Flow (m3/s)
0.00 - 0.01
0.02 - 0.10
0.11 - 0.20
0.21 - 2.26
Km
0
250
500


50°0'0"E
55°0'0"E
60°0'0"E
35°0'0"N
30°0'0"N
Qazvin
Karaj
Gilan
Semnan
Tehran
Hamadan
Qom
Arak
Esfahan
Yazd
Kerman
Shiraz
1
2
3
4
5
6
7
8
9
(e)
Legend
Number of Piezometers
2 - 28
29 - 57
58 - 104
105 - 221


50°0'0"E
55°0'0"E
60°0'0"E
35°0'0"N
30°0'0"N
N
Qazvin
Karaj
Gilan
Semnan
Tehran
Hamadan
Qom
Arak
Esfahan
Yazd
Kerman
Shiraz
1
2
3
4
5
6
7
8
9
(f)
Legend
Population (People/km2)
0 - 50000
50001 - 500000
500001 - 1000000
1000001 - 12372939
Km
0
250
500

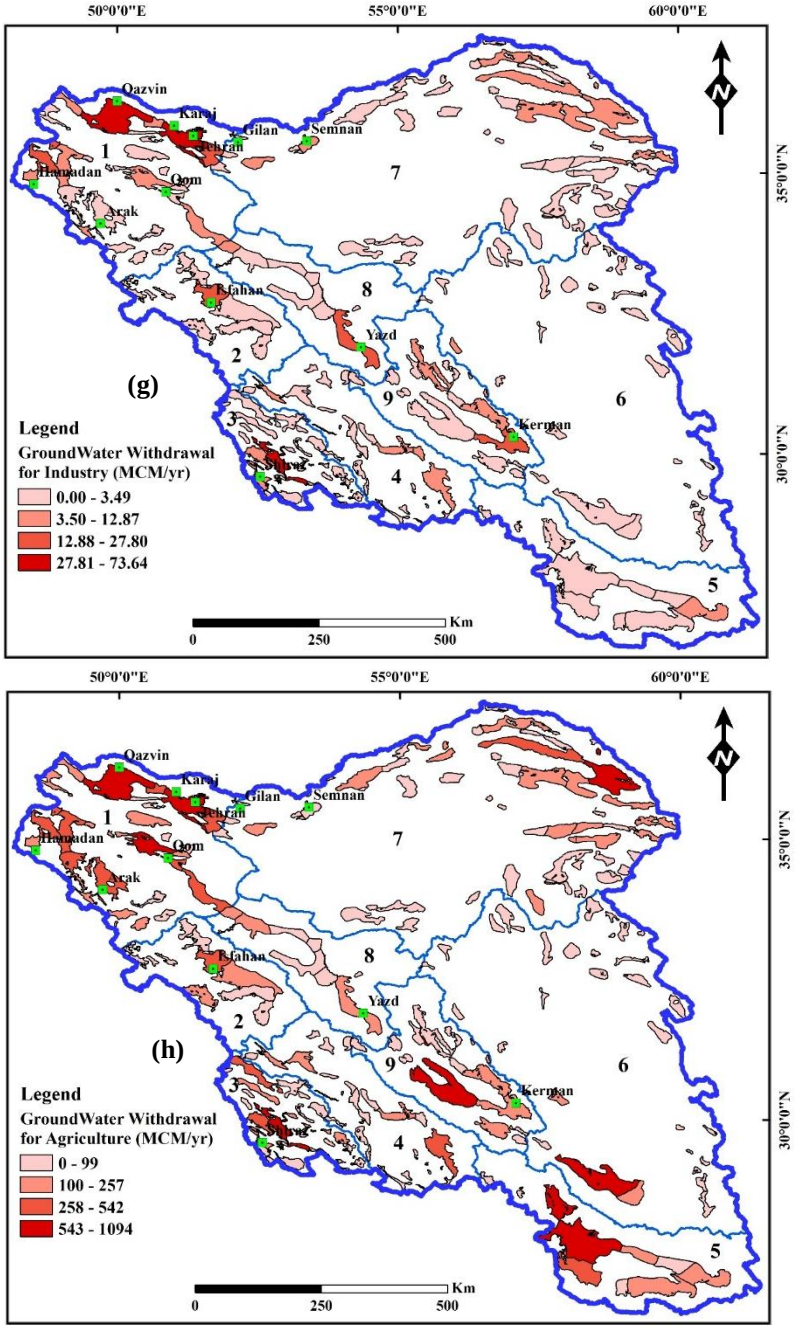


Fig. 2- Average annual recharge values of groundwater resources (a), Changes in Groundwater Level (b), Electrical Conductivity in Groundwater (c), Contribution of Groundwater in Surface (river) Flow (d), Number of Observation Wells (e), Resident Population (f), Consumption Volume of Groundwater Resources for the Industry (g) and Consumption Volume of Groundwater Resources for the Agriculture (h) in 184 studied aquifers in the central plateau basin of Iran. Note; The source of data opresented in part f is the Iran's Statistics Center (Census report, 2016-2017) and for other parts are the Iran's Water Resources Management Company (2000-2016)

شکل ۲- مقادیر متوسط تغذیه سالانه منابع آب زیرزمینی (a)، تغییرات تراز آب زیرزمینی (b)، هدایت الکتریکی (c)، مشارکت آب زیرزمینی در جریان آب سطحی (d)، تعداد چاه‌های مشاهده‌ای (e)، جمعیت ساکن (f)، حجم مصرفی منابع آب زیرزمینی در بخش صنعت (g) و کشاورزی (h) در ۱۸۴ آبخوان مورد مطالعه در حوضه فلات مرکزی ایران

برای تأمین نیاز بخش کشاورزی، بیشترین منابع آب زیرزمینی (۱۰۹۴ میلیون مترمکعب در سال) از آبخوان رودبار–جیرفت و سپس از آبخوان تهران–کرج (۱۰۲۷ میلیون مترمکعب در سال) برداشت می‌شود. کمترین حجم آب برداشت شده از منابع آب زیرزمینی برای بخش کشاورزی در این حوضه آبریز مربوط به آبخوان کویر الهآباد استان یزد (۰/۳ میلیون مترمکعب در سال) و سپس آبخوان علی‌آباد هامون (۰/۷ میلیون مترمکعب در سال) است.

۴-۲- محاسبه شاخص‌ها

مقادیر شاخص‌های چهارگانه درنظر گرفته شده به منظور ارزیابی میزان پایداری منابع آب زیرزمینی آبخوان‌های فلات مرکزی بر اساس داده‌های اولیه ارائه شده در شکل‌های ۲–a تا ۲–h و روابط ۲ تا ۵ محاسبه و توزیع مکانی مقادیر هر یک در شکل‌های ۳–a تا ۳–d ارائه شده است. توزیع مقادیر هر یک از این شاخص‌ها در ادامه تشریح شده است.

۴-۲-۱- شاخص محیطی: شاخص یکپارچه ردپای آب زیرزمینی (IGWF) که داده‌های کمیت (تراز)، تغذیه، دبی پایه رودخانه‌ها و کیفیت (هدایت الکتریکی) آب زیرزمینی را در آبخوان‌های مورد مطالعه بر اساس رابطه (۲) درنظر می‌گیرد، به عنوان یک شاخص محیط‌زیستی ارزیابی درجه پایداری منابع آب زیرزمینی آبخوان‌های مورد مطالعه درنظر گرفته شده و مقادیر آن در شکل ۳–a ارائه شده است. بر اساس این شاخص، آبخوان‌های دارای IGWF بالاتر، پایداری کمتری دارند. بالاترین مقدار شاخص IGWF مربوط به آبخوان چوپانان استان اصفهان (۲/۷۶) و سپس آبخوان محولات استان خراسان جنوبی (۲/۵۴) و کمترین آن نیز مربوط به آبخوان انارک استان اصفهان (۲/۰) است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که مقادیر بالاتر IGWF در آبخوان‌های مطالعاتی به دلیل کاهش بیشتر سطح آب زیرزمینی، تغذیه کمتر و هدایت الکتریکی بالاتر است.

۴-۲-۲- شاخص اجتماعی: مقادیر شاخص اجتماعی پایداری منابع آب زیرزمینی که تراکم جمعیت ساکن در سطح آبخوان را بر اساس رابطه (۳) نشان می‌دهد، در شکل ۳–b ارائه شده است. بیشترین مقدار این شاخص که ناپایداری منابع آب زیرزمینی را نشان می‌دهد به مقدار ۵۱۳۷ نفر در کیلومترمربع، مربوط به آبخوان تهران–کرج و سپس آبخوان شیراز (۳۹۵۸ نفر در کیلومترمربع) تعلق دارد. ۱۶ آبخوان (حدود ۹ درصد) که بیشتر در نواحی مرکزی حوضه قرار دارند و هیچ جمعیتی در سطح آبخوان ساکن نیست، دارای کمترین مقدار این شاخص هستند (پایداری بالاتر منابع آب زیرزمینی از حیث بعد اجتماعی).

۴-۲-۳- شاخص اقتصادی: این شاخص که بر اساس درصدی از منابع آب زیرزمینی برداشت شده برای تخصیص به بخش‌های کشاورزی و صنعت درنظر گرفته شده است، بر اساس رابطه (۴) محاسبه و نتایج آن در شکل ۳–c ارائه شده است. بالاترین مقدار این شاخص به میزان ۱۰۰ مربوط به هفت آبخوان جنگل، محولات، شریف‌آباد، کویر ابرقو، کویر سیاه‌کوه، کویر گرمسار و کویر الهآباد است. در این آبخوان‌ها، تمام آب برداشت‌شده از منابع آب زیرزمینی به بخش صنعت و کشاورزی تخصیص می‌یابد. کمترین مقدار این شاخص مربوط به آبخوان تهران–کرج (۵۲/۳) است. بالاتر بودن این شاخص همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، حاکی از پایداری بیشتر منابع آب زیرزمینی است.

۴-۲-۴- شاخص سازمانی: پایش منابع آب زیرزمینی به عنوان یک شاخص سازمانی ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی به منظور تولید داده‌های مورد نیاز و اطلاعات که می‌تواند اساس برنامه‌ریزی، مدل‌سازی و تصمیمات را در این حوزه تشکیل دهد، درنظر گرفته شده است. تراکم چاه‌های مشاهده‌ای موجود در آبخوان بر اساس رابطه (۵) محاسبه و نتایج آن در شکل ۳–d ارائه شده است. بالاترین مقدار این شاخص مربوط به آبخوان گشنگان در استان فارس (۰/۹۶ چاه در هر کیلومترمربع) و سپس تفرش (۰/۶۵ چاه در هر کیلومترمربع) و کمترین آن مربوط به آبخوان‌های قلعه‌گنج و رودبار–جیرفت به مقدار ۰/۰۱ چاه در هر کیلومترمربع است.

۴-۳- رتبه‌بندی آبخوان‌ها

رتبه‌بندی ۱۸۴ آبخوان در حوضه فلات مرکزی با توجه به چهار شاخص توسعه یافته با استفاده از تکنیک PROMETHEE II بر اساس امتیاز جریان خالص مربوطه (Φ) و تابع ترجیحی نوع گاوسی انجام شد (رابطه ۶). توزیع فضایی مقادیر امتیاز جریان خالص (Φ) بر اساس روش PROMETHEE II در حالی که وزن‌های نسبی مساوی برای چهار شاخص درنظر گرفته شده است ($w_k = 0.25$) در شکل ۴ نشان داده شده است. وزن‌های نسبی یکسان برای شاخص‌ها برای جلوگیری از سوگیری در نتیجه به دلیل وزن‌های نابرابر و اهمیت یکسانی به شاخص برای محاسبه شاخص مدیریت پایدار منابع آب‌های زیرزمینی، به چهار شاخص اختصاص داده شدند. حداکثر و حداقل مقدار Φ به ترتیب ۰/۳۸ (برای سفره‌های زیرزمینی کفه طاغستان، کویر ابرقو، کویر سیاه‌کوه، الهآباد و کویر گرمسار) و ۰/۴۸– (برای آبخوان تهران–کرج و دماوند) به دست آمد. مقادیر کمتر Φ نشان‌دهنده مدیریت ضعیف آب زیرزمینی در این سفره‌ها در مقایسه با سایرین بر اساس شاخص‌های استفاده شده است. مدیریت پایدار منابع

آب‌های زیرزمینی نسبتاً ضعیف نزدیک به کلان‌شهرها (مانند تهران، شیراز، اصفهان، قم و همدان) مشاهده شد.

مقادیر شاخص مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی برای ۱۸۴ سفره آب زیرزمینی موردمطالعه در چهار دسته طبقه‌بندی شده است و در شکل ۴ نشان داده شده است. در ادامه تعدادی از آبخوان‌های شاخص در هر دسته به عنوان نمونه ارائه شده است: ۱) آبخوان‌های با پایداری خوب (۲۶ آبخوان یا ۱۴/۱ درصد) مانند آبخوان‌های رودبار–جیرفت، کوهپایه–سگزی، قلعه‌گنج، دشت نمدان، جوین، عطائیه، بزمان، چوپانان، محولات و دق‌سرخ، ۲) آبخوان‌های با پایداری نسبتاً خوب (۳۲ آبخوان یا ۱۷/۴ درصد) مانند اسپکه ـ مسکوتان، بافق، نائین، بجستان–یونسی، اردستان، زرند، بردسیر، کمیجان، ابرقو و خور–فرخی، ۳) آبخوان‌های با پایداری متوسط (۶۶ آبخوان یا ۳۵/۹ درصد) مانند آبخوان‌های رفسنجان، بم، نیشابور، جیرفت، کاشان، رزن، اصفهان–برخوار، ساوه، دامغان، کبودر آهنگ، ۴) آبخوان‌های با پایداری ضعیف (۶۰ آبخوان یا ۳۲/۶ درصد) مانند آبخوان‌های قزوین، یزد–اردکان، تهران–کرج، ایرانشهر–بمپور، اراک، سبزوار، کرمان–باغین، ورامین، تربیت حیدریه و کاشمر. ویژگی‌های بارز آبخوان‌های با پایداری خوب شامل تراکم جمعیت کمتر، بهره‌برداری بیشتر از منابع آب‌های زیرزمینی برای بخش کشاورزی و صنعت، داشتن شبکه پایش کارآمدتر آب زیرزمینی و کاهش کمتر سطح آب زیرزمینی و کیفیت بالاتر آب زیرزمینی است.

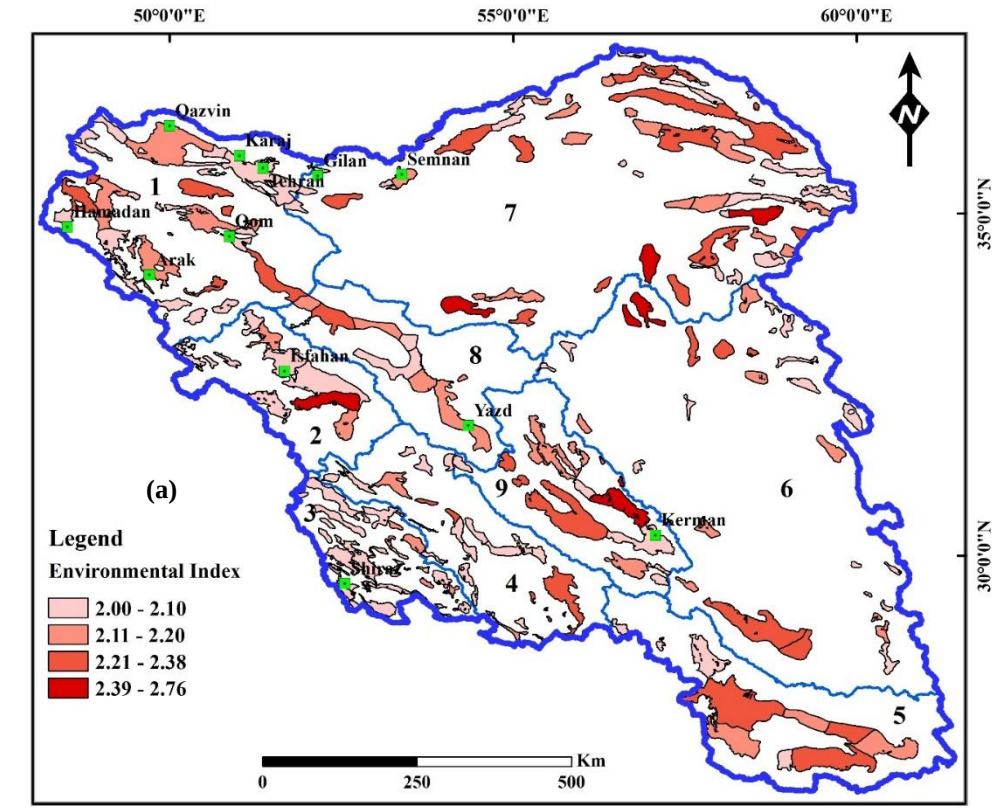
۵- نتیجه‌گیری

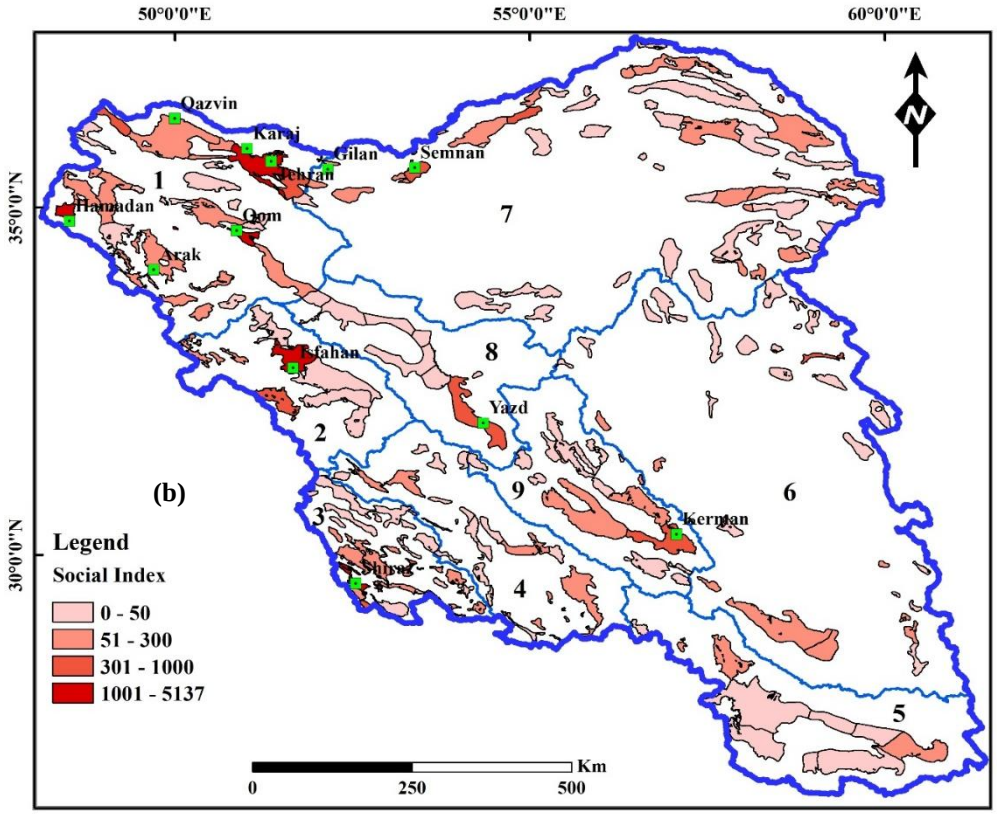
مطالعه حاضر با هدف توسعه یک شاخص جامع قابل‌اجرا در مقیاس آبخوان برای ارزیابی پایداری مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی در ۱۸۴ سفره زیرزمینی در فلات مرکزی ایران انجام شد. نتایج این پژوهش وضعیت فعلی مدیریت پایدار منابع آب‌های زیرزمینی در حوضه آبریز مورد مطالعه را نشان داده و می‌تواند به ارزیابی پیشرفت مدیران حوضه آبریز مربوطه در دستیابی به پایداری منابع آب‌های زیرزمینی و اصلاح استراتژی‌های مدیریت تطبیقی منابع آب‌های زیرزمینی کمک کند. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که مدیریت پایدار منابع آب‌های زیرزمینی در سفره‌های زیرزمینی فلات مرکزی ایران به ویژه نزدیک به کلان‌شهرها نسبتاً ضعیف است.

ویژگی بارز این آبخوان‌ها شامل تراکم جمعیت بالاتر، بهره‌برداری کمتر از منابع آب‌های زیرزمینی برای بخش کشاورزی و صنعت، شبکه پایش ضعیف آب زیرزمینی و افت شدید سطح آب و کیفیت نامناسب آب زیرزمینی است. در این حوضه به منظور نظارت و تقویت قوانین و مقررات با توجه به شرایط محلی حوضه، به بهبود حکمرانی منابع آب‌های زیرزمینی نیاز است. ترکیب سایر گزینه‌های مدیریتی مرتبط، از جمله محدودیت‌های سیاسی، فرهنگی و/یا بودجه‌ای، ممکن است شاخص مدیریت پایدار منابع آب‌های زیرزمینی توسعه‌یافته را تقویت کند.

در دهه اخیر جهت‌گیری وظایف و فعالیت‌های شرکت مدیریت منابع آب ایران که وظیفه هماهنگی، اکتشاف، توسعه و تأمین آب در کشور را بر عهده دارد، از توسعه‌دهی و اکتشاف منابع آب زیرزمینی به ارزیابی، برنامه‌ریزی و مدیریت یکپارچه منابع آب زیرزمینی تغییر یافته است.

به عنوان نمونه، شورای عالی آب ایران طرح جدیدی تحت عنوان «طرح تعادل‌بخشی و احیای منابع آب زیرزمینی» در سال ۱۳۹۳ تصویب کرد که شامل ۱۵ پروژه اجرایی با هدف کاهش نرخ برداشت از منابع آب زیرزمینی است که می‌تواند نویدبخش اثرات مثبت بر کاهش روند سطح آب زیرزمینی و بهبود کیفیت این منابع باشد. نتایج شاخص‌های توسعه داده شده در این پژوهش می‌تواند مدیران حوضه آبریز فلات مرکزی را در راستای شناسایی و اولویت‌بندی آبخوان‌هایی که نیاز به اتخاذ سیاست‌های جدید و یا بازنگری آن‌ها برای دستیابی به پایداری در بهره‌برداری این منابع ارزشمند دارند، کمک نماید. از آنجایی‌که شاخص‌های زیادی توسط محققین به منظور ارزیابی توسعه پایدار منابع آب توسعه داده شده است، استفاده از شاخص‌های بیشتر در مقیاس آبخوان که امکان دسترسی به داده‌های بیشتری وجود دارد و نیز استفاده از روش‌های رتبه‌بندی دیگر به عنوان پیشنهاد، می‌تواند در پژوهش‌های آتی مورد توجه قرار گیرد. همچنین، به جهت در دسترس نبودن اطلاعات کافی و جامع و بر اساس داشته‌های حاضر نظر به انجام این پژوهش شد. با توجه به مطالعه Pires et al. (2017)، ۱۴ شاخص کاربردی و معنی‌دار برای ارزیابی مدیریت پایدار منابع آب بر اساس نظر کارشناسان بین‌المللی سازمان ملل معرفی شد. هرچند برای ارائه تصویر واقعی‌تر از وضعیت پایداری منابع آب زیرزمینی لازم است از تعداد شاخص‌های بیشتری در ابعاد اقتصادی، اجتماعی، محیط‌زیستی و سازمانی استفاده شود؛ اما وجود داده‌ها و در دسترس بودن آن‌ها خود یکی از موانع مهم در انجام چنین پژوهش‌هایی در مقیاس بزرگ است.


50°0'0"E
55°0'0"E
60°0'0"E
35°0'0"N
30°0'0"N
Qazvin
Karaj
Gilan
Semnan
Tehran
Hamadan
Qom
Arak
Isfahan
Yazd
Kerman
Shiraz
1
2
3
4
5
6
7
8
9
(a)
Legend
Environmental Index
2.00 - 2.10
2.11 - 2.20
2.21 - 2.38
2.39 - 2.76
Km
0
250
500


50°0'0"E
55°0'0"E
60°0'0"E
35°0'0"N
30°0'0"N
Qazvin
Karaj
Gilan
Semnan
Tehran
Hamadan
Qom
Arak
Isfahan
Yazd
Kerman
Shiraz
1
2
3
4
5
6
7
8
9
(b)
Legend
Social Index
0 - 50
51 - 300
301 - 1000
1001 - 5137
Km
0
250
500

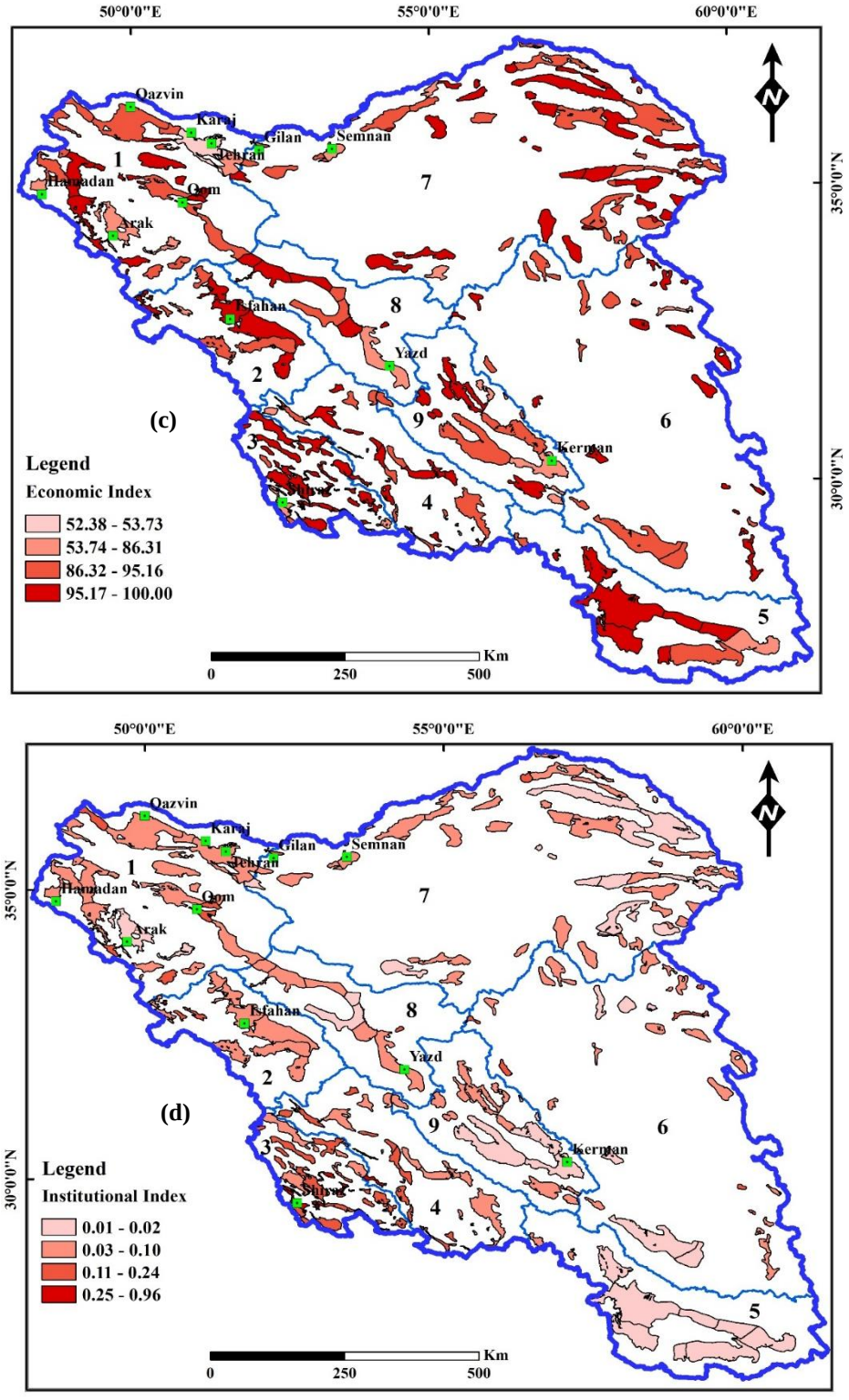


Fig. 3- Spatial distribution of the values obtained for the Environmental (a), Social (b), Economic (c) and Institutional (d) indicators in the 184 aquifers studied in the Central Plateau Basin of Iran

شکل ۳- توزیع مکانی مقادیر شاخص‌های محیطی (a)، اجتماعی (b)، اقتصادی (c) و سازمانی (d) در ۱۸۴ آبخوان مورد مطالعه در حوضه آبریز فلات مرکزی ایران

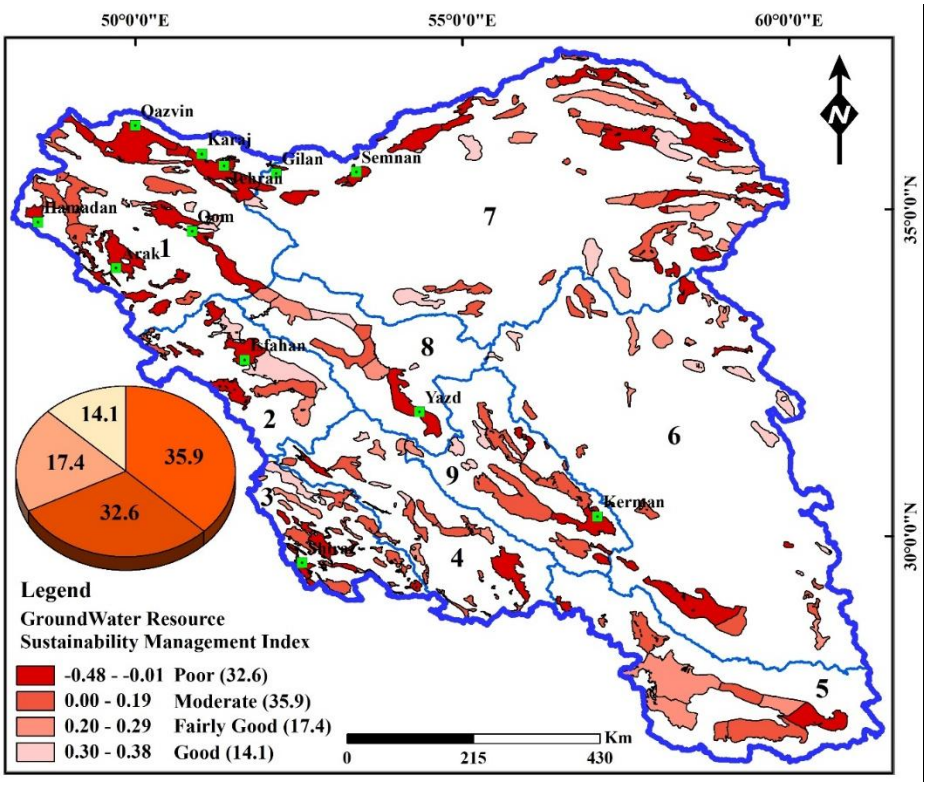


Fig. 4- Spatial distribution of sustainable management index values for groundwater resources (Φ value) for 184 aquifers considered in the Central Plateau Basin with applying the same weights for the four investigated indicators

شکل ۴- توزیع مکانی مقادیر شاخص مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی (مقدار Φ) در ۱۸۴ آبخوان حوضه آبریز فلات مرکزی با لحاظ وزن‌های یکسان برای چهار شاخص مورد بررسی

پی‌نوشت‌ها

1- Anthropocene
2- Middle East and North Africa
3- Total Dissolved Solids
4- Integrated Groundwater Footprint Index
5- Population Density Index
6- Index of the Percentage of Groundwater Used for Agricultural and Industrial Sectors
7- Density Index of Observation Wells

۶- مراجع

Ashraf S, Nazemi A, & AghaKouchak A (2021) Anthropogenic drought dominates groundwater depletion in Iran. Scientific Reports 11:9135

Bagheri-Gavkosh M, Hosseini S M, Ataie-Ashtiani B, Sohani Y, Ebrahimian H, Morovat F, & Ashrafi S (2021) Land subsidence: A global challenge. Science of the Total Environment 778:146193

Boazar M, Yazdanpanah M, & Abdeshahi A (2019) Response to water crisis: How do Iranian farmers think about and intent in relation to switching from rice to less water-dependent crops? Journal of Hydrology 570:523–530

Brans J P, & Vincke P (1985) Note– A preference ranking organisation method: (The PROMETHEE method for multiple criteria decision-making). Management Science 31(6):647–656

Brans J P, Vincke P, & Mareschal B (1986) How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method. European journal of operational research 24(2):228-238

Bui N T, Kawamura A, Du Bui D, Amaguchi H, Bu D D, Truong N T, Do H H T, & Nguyen C T (2019) Groundwater sustainability assessment framework: A demonstration of environmental sustainability index for Hanoi, Vietnam. Journal of Environmental Management 241:479–487

Doell P, Mueller Schmied H, Schuh C, Portmann F T, & Eicker A (2014) Global scale assessment of groundwater depletion and related groundwater abstractions: Combining hydro-logical modeling with information from well observations and GRACE satellites. Water Resources Research 50(7):5698–5720

Fani A, Ghazi I, Malekian A (2016) Challenges of water resource management in Iran. American Journal of Environmental Engineering 6 (4):23-28

Ferguson G & Gleeson T (2012) Vulnerability of coastal aquifers to groundwater use and climate change. Nature Climate Change 2(5):342

Fraser C M, Kalin R M, Kanjaye M, & Uka Z (2020) A methodology to identify vulnerable transboundary aquifer hotspots for multi-scale groundwater management. Water International 45(7–8):865–883

Foster S, Garduno H, Evans R, Olson D, Tian, Y, Zhang W, & Han Z (2004) Quaternary aquifer of the North China Plain-assessing and achieving groundwater resource sustainability. Hydrogeology Journal 12:81-93

Gaye C B & Tindimugaya C (2019) Challenges and opportunities for sustainable groundwater management in Africa. Hydrogeology Journal 27(3):1099-1110

Gleeson T, Wada Y, Bierkens M F, & van Beek L P (2012) Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. Nature 488(7410):197

Hosseini S M, Parizi E, Ataie-Ashtianz B, & Simmons C T (2019) Assessment of sustainable groundwater resources management using integrated environmental index: Case studies across Iran. Science of the Total Environment 676:792-810

Iran Water Statistical Yearbook (2014) Published by Iran's Bureau of water and wastewater planning. Ministry of Energy 302p.

Iran's WRM Company (2017) Iran's Water Resources Management Company. https://www.wrm.ir/

Iran's water Master plan (2008) synthesis report. Jamab Consulting Engineers Company

Iran's Ministry of Energy (1997) The results of studies of long-term water strategies. Water Planning Office of the Deputy Water Affairs Department

Kelley C P, Mohtadi S, Cane M A, Seager R, & Kushnir Y (2015) Climate change in the 645Fertile Crescent and implications of the recent Syrian drought. Proceedings of the National Academy of Sciences 112(11):3241–3246

Kourgialas N N, Karatzas G P, Dokou Z, & Kokorogiannis A (2018) Groundwater footprint methodology as policy tool for balancing water needs (agriculture & tourism) in water scarce islands- The case of Crete, Greece. Science of the Total Environment 615:381–389

Loucks D P (1997) Quantifying trends in system sustainability. Hydrological Sciences Journal 42(4):513–530

Milan S G, Kayhomayoon Z, Azar N A, Berndtsson R, Ramezani M R, & Moghaddam H K (2023) Using machine learning to determine acceptable levels of groundwater consumption in Iran. Sustainable Production and Consumption 35:388-400

Majlis Research Center (2020) Office of Infrastructure Studies. https://rc.majlis.ir/fa

Nazari B, Liaghat A, Akbari M R, & Keshavarz M (2018) Irrigation water management in Iran: Implications for water use efficiency improvement. Agricultural Water Management 208:7-18

Kardan Moghaddam H, Banihabib M E, Javadi S, & Randhir T O (2021) A framework for the assessment of qualitative and quantitative sustainable development of groundwater system. Sustainable Development 29(6):1096-1110

Pandey V P, Shrestha S, Chapagain S K, & Kazama F (2011) A framework for measuring 695groundwater sustainability. Environmental Science & Policy 14(4):396–407

Pires A, Morato J, Peixoto H, Botero V, Zuluaga L, & Figueroa A (2017) Sustainability Assessment of indicators for integrated water resources management. Science of the Total Environment 578:139–147

Saaty T L (2008) Decision making with the analytic hierarchy process. International Journal of Services Sciences 1(1):83–98

Schreiber W (2008) Realizing the right to water in international investment law: An interdisciplinary approach to BIT obligations. Natural Resources Journal 431-478

Supreme Water Council (2008) State of water resources and consumption and the general policies of the system in the water sector. Ministry of Energy

Singh A, Panda S N, Uzokwe V N, & Krause P (2019) An assessment of groundwater recharge estimation techniques for sustainable resource management. Groundwater for Sustainable Development 9:100218

Smakhtin V, Revenga C, & Döll P (2004) A pilot global assessment of environmental water requirements and scarcity. Water International 29(3):307-317

Shah T, Roy A D, Qureshi A S, & Wang J (2003) Sustaining Asia's groundwater boom: An overview of issues and evidence. In Natural Resources Forum (27(2):130–141) Blackwell Publishing Ltd.

Trichakis I, Burek P, de Roo A, & Pistocchi A (2016) Development of an integrated ground-water and surface water model in a pan-European scale. Paper Presented at 2nd EWaS International Conference Chania, Greece

UNESCO (2007) GW Resources Sustainability Indicators. IHP-VI Series on GW No. 14

United Nations (2015) The millennium development goals report 2015. http://www. undp.org/content/dam/undp/library/MDG/english/UNDP_MDG_Report_2015.pdf.

World Bank (2010) World development indicators database. The World Bank

Zarei B, Parizi E, Hosseini S M, & Ataie-Ashtiani B (2022) A multifaceted quantitative index for sustainability assessment of groundwater management: application for aquifers around Iran. Water International 1-23