

ارزیابی سطح مدیریت نرمال و پایدار در منابع آب زیرزمینی استان زنجان

محمدحسین فکوربان^۱، مصطفی نادری^{۲*} و مهدی تیموری^۳

چکیده

در این مطالعه میزان سطح مدیریت منابع آب زیرزمینی در هشت آبخوان آبرفتی واقع در استان زنجان توسط یک شاخص فیزیکی مبتنی بر مفاهیم آب موجود (آب قابل دسترس) و عرضه آب (برداشت آب) تحت شرایط تأمین نیاز آبی محیط برآورد شده است. سطح مدیریت منابع آب زیرزمینی تحت شرایط «نرمال» و «پایدار» کمی‌سازی شده و سپس براساس مقادیر سطح مدیریت نرمال و پایدار نوع کلاس مدیریتی آبخوان تعیین شد. مدیریت نرمال وضعیت مدیریت آبخوان را برای شرایطی برآورد می‌کند که حجم آب موجود از خود آبخوان و آبخوان‌های مجاور تأمین می‌شود؛ اما در مدیریت پایدار، آب موجود تنها از خود آبخوان تأمین می‌شود. مقادیر منفی نشان‌دهنده سوءمدیریت (برداشت بیشتر از آب موجود) و مقادیر مثبت نشان‌دهنده قابل قبول بودن مدیریت (برداشت کمتر از آب موجود) است. نتایج نشان داد که مقدار مدیریت نرمال در آبخوان‌های ماهنشان، طارم، مشمپا، زنجان، سجاس، زرین‌آباد، ابهر و قیدار به ترتیب برابر با ۳، ۶/۵، ۲، ۹، ۸/۹، ۱۸/۵، ۳۰ و ۱۴ درصد و مقدار مدیریت پایدار آن‌ها به ترتیب برابر با ۰/۱، ۰/۳۸، ۹/۷، ۴۱، ۱۷/۷، ۶۸، ۱۰۶ و ۱۰۶ درصد است. طبقه‌بندی کلاس مدیریتی آبخوان‌ها نیز نشان‌دهنده مدیریت پایدار برای آبخوان ماهنشان و شبه‌پایدار برای آبخوان‌های طارم و مشمپا بود. آبخوان‌های زنجان، سجاس، زرین‌آباد، ابهر و قیدار همگی دارای مدیریت نرمال و پایدار منفی بودند؛ بنابراین، نوع مدیریت در این آبخوان‌ها از نوع سوءمدیریت است و ضروری است تا برای مدیریت بهتر از منابع آبی، برداشت از آب زیرزمینی از طریق کاهش سطح زیر کشت، افزایش راندمان آبیاری و کشت محصولات با نیاز آبی کمتر صورت پذیرد.

واژه‌های کلیدی: استان زنجان، اضافه‌برداشت، منابع آب زیرزمینی، مدیریت پایدار، مدیریت نرمال

ارجاع: فکوربان م.ج. نادری م. و تیموری م. ۱۴۰۳ ارزیابی سطح مدیریت نرمال و پایدار در منابع آب زیرزمینی استان زنجان. مجله پژوهش آب ایران. ۵۳: ۶۸-۵۹. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2024.14687.2585>

۱- کارشناس ارشد مهندسی نقشه برداری (ژئودزی)، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، ایران.
۲- استادیار هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، ایران.
۳- کارشناس ارشد سیستم‌های اطلاعات مکانی، شرکت آب منطقه‌ای زنجان، ایران.

* نویسنده مسئول: m.naderi@iasbs.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۰

مقدمه

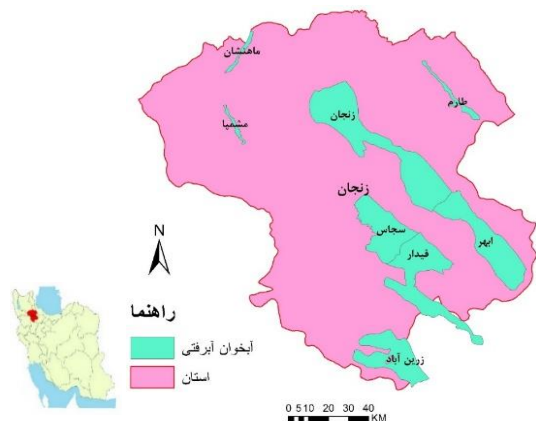
زیرزمینی به‌میزان ۱۰۰-۱۰ سانتی‌متر در سال در مناطق مختلف شده است، که به‌طور متوسط ۴۹ سانتی‌متر در سال در سراسر کشور است (Noori et al., 2021) و به اکوسیستم‌های وابسته به آب‌های زیرزمینی در برخی مناطق آسیب زده است؛ برای مثال، دریاچه پریشان که عمدتاً حاصل جریان آب زیرزمینی ورودی از نه چشمه است، به‌دلیل افزایش برداشت آب زیرزمینی در اطراف تالاب، کاهش عمق آب (حدود ۵ متر طی دوره ۱۹۹۵-۲۰۰۸) را تجربه کرده است (Ghazali, 2012). آبخوان چهارم در استان فارس نیز کاهش سطح آب حدود ۰/۷۵ متر در سال را تجربه کرده است (Naderi and Raeisi, 2018) یا سه آبخوان اسپاس، خسروشیرین و کامفیروز در شمال استان فارس به‌ترتیب کاهش سطح آب زیرزمینی به میزان حدود ۰/۷، ۱ و ۰/۳۵ متر در سال را به‌دلیل بهره‌برداری بیش از حد تجربه کرده‌اند (Naderi, 2020). مطالعه خطرپذیری نفوذ آب شور دریاچه ارومیه در آبخوان آزاد تاسوج واقع در آذربایجان شرقی نشان داد که قسمت‌های جنوبی و غربی آبخوان خطرپذیری بالایی را نشان می‌دهند (Sadeghfam et al., 2020). مطالعه ریسک خشکسالی در آبخوان آزاد مراغه-بناب نیز نشان داد که نواحی غربی آبخوان ریسک خشکسالی بیشتری را نسبت به نواحی شرقی آن دارند (Sadeghfam et al., 2018). اگرچه آب زیرزمینی منبع حیاتی برای نیازهای انسانی و مصرف است، برای حفظ محیط‌زیست نیز حیاتی است. کاهش سطح آب زیرزمینی هزینه‌های کشاورزان برای بهره‌برداری از آب زیرزمینی را افزایش (به‌دلیل عمیق‌ترکردن و تجهیز مجدد چاه‌ها) و درآمد آن‌ها را کاهش می‌دهد.

نکته اصلی در مدیریت منابع آب نادیده‌گرفتن نیاز آبی زیست‌محیطی بوده و به‌عبارت دیگر همه آب موجود در یک رودخانه یا آبخوان فقط برای مصرف انسان‌ها در نظر گرفته می‌شود؛ البته شاخصی فیزیکی که اخیراً توسط نادری (۲۰۲۱) ارائه شده، نیاز محیط‌زیست را در نظر گرفته و سطح مدیریت منابع آب را براساس مفاهیم آب موجود (آب قابل‌دسترس) و عرضه آب (برداشت آب) کمی‌سازی می‌کند (Naderi, 2021). در این مطالعه سعی شده است تا سطح مدیریت آبخوان‌های واقع در

آب زیرزمینی یک منبع حیاتی برای مصارف انسانی، تولید محصولات کشاورزی و توسعه صنایع مرتبط با آب به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک است (Woldeamlak et al., 2007). افزایش تقاضای مصرف آب به‌دلیل رشد جمعیت به‌ویژه در ایران برای توسعه بخش‌های کشاورزی و صنعتی که با کمبود آب شیرین در دسترس (آب سطحی و منابع آب زیرزمینی) همراه است، منجر به شیوه‌های نامناسب مدیریت آب شده است. با این حال، بحران کم‌آبی ممکن است به‌ویژه در چند دهه اخیر به‌دلیل وقوع خشکسالی‌های شدید تشدید شده باشد (Ashraf et al., 2021, Moshir, 2020). منابع آب زیرزمینی و سطحی به‌ترتیب حدود ۶۰ و ۴۰ درصد از کل منابع تأمین آب در ایران را فراهم می‌کنند؛ به‌طوری‌که مصرف نسبی آب در بخش‌های مختلف کشاورزی، شهری و صنعتی به‌ترتیب حدود ۹۲، ۷ و ۱ درصد است (Noori et al., 2021). ایجاد سدهای زیاد روی رودخانه‌های اصلی همراه با برداشت آب منجر به کاهش جریان رودخانه‌ها شده یا آن‌ها را خشک کرده و به اکوسیستم‌های وابسته به رودخانه نیز آسیب رسانده است؛ برای مثال، احداث سدهای زیاد در حوضه آبریز دریاچه ارومیه و برداشت آب رودخانه در بالادست موجب کاهش وسعت، حجم و عمق آب آن به‌میزان ۴۵ درصد، ۸۵ درصد و ۶/۵ متر شده است؛ البته خشکسالی‌های مکرر نیز آن را تشدید کرده است (Sima et al., 2021). دبی ورودی به دریاچه‌های تشک و بختگان واقع در استان فارس، به‌دلیل ساخت سدهای بالادست و استفاده از آب رودخانه برای آبیاری در دهه گذشته کاهش یافته و منجر به خشک‌شدن کامل این دریاچه‌ها در سال ۲۰۱۳ شده است (Haghighi and Kløve, 2017).

توسعه فناوری‌های حفاری مدرن کشاورزان را تشویق کرده تا از برداشت سنتی آب زیرزمینی توسط قنات‌ها خودداری کرده و به‌جای آن، آب زیرزمینی را با چاه‌های عمیق پمپ کنند. بهره‌برداری بیش از حد از آب‌های زیرزمینی به‌میزان ۵/۴ میلیارد مترمکعب در سال طی دوره ۲۰۱۵-۲۰۰۲ منجر به کاهش سطح آب‌های

آبخوان‌های موجود در استان زنجان آبخوان‌های آبرفتی ابهر و قیدار در حوضه آبریز دریاچه نمک بوده و مابقی آبخوان‌ها در حوضه آبریز سفیدرود بزرگ قرار دارند. در شکل ۱ نقشه موقعیت آبخوان‌های استان زنجان قابل مشاهده است.



شکل ۱- نقشه موقعیت آبخوان‌های آبرفتی استان زنجان

روش مطالعه

مدیریت یکپارچه منابع آب (IWRM^۲) توسط مشارکت جهانی آب (GWP^۳) این‌گونه تعریف شده است: «فرایندی که توسعه و مدیریت هماهنگ آب، زمین و منابع مرتبط را به منظور به حداکثر رساندن رفاه اقتصادی و اجتماعی حاصل در یک محیط عادلانه بدون به خطر انداختن پایداری اکوسیستم‌های حیاتی ترویج می‌دهد». نبود یک شاخص جهانی واحد و علمی بر مبنای چرخه آب برای ارزیابی سطح مدیریت منابع آب، موجب شد تا اخیراً یک شاخص فیزیکی، مبتنی بر مفاهیم آب موجود (آب قابل دسترس) و عرضه آب (برداشت آب) برای کمی‌سازی سطح مدیریت در منابع آب سطحی و زیرزمینی با در نظر گرفتن نیاز آبی محیط زیست توسط (Naderi, 2021) ارائه شود. «آب زیرزمینی موجود» حجم کل تغذیه آب زیرزمینی منهای حجم مرتبط با نیاز زیست‌محیطی در یک منطقه معین است (Naderi, 2020, Rodrigues et al., 2014, Vanham et al., 2018). «تقاضای آب^۴» حجم خالص

استان زنجان توسط این شاخص ارزیابی شود. استان زنجان دارای ۸ آبخوان آبرفتی بوده که تغییرات مساحت آن‌ها بین ۳۰ تا ۱۱۴۶ کیلومتر مربع، تغییرات برداشت متوسط سالانه بین ۳۶ تا ۲۹۵ میلیون مترمکعب، تغییرات نفوذ بارش بین ۱ تا ۴۷ میلیون مترمکعب و در نهایت تغییرات حجم ذخیره آن‌ها بین ۴۶- تا ۳/۸+ میلیون مترمکعب در سال است. همچنین اقلیم این استان نیز بسیار متنوع است، به طوری که اقلیم مناطق مختلف از خشک تا مدیترانه‌ای، نیمه مرطوب و مرطوب متغیر است (Zanjani Jam and Soufi, 2005)؛ بنابراین با توجه به تنوع موارد گفته شده، هدف این مطالعه کمی‌سازی سطح مدیریت (LOM^۱) آبخوان‌های استان زنجان در شرایط مدیریتی «نرمال» و «پایدار» است و سپس بر اساس مقادیر سطح مدیریت نرمال و پایدار کلاس مدیریتی هر آبخوان نیز ارائه شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه شامل آبخوان‌های آبرفتی استان زنجان (شمال غربی ایران) است که در بخشی از حوضه‌های آبریز سفیدرود بزرگ و حوضه آبریز دریاچه نمک قرار دارد. استان زنجان در محدوده ۴۷ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۵ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۱۰ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. ارتفاع متوسط آن ۱۵۰۰ متر بوده و کمترین و بیشترین ارتفاعات نیز بین ۳۰۰ متر در منطقه گیلوان (شمال شرق استان) و بیش از ۳۰۰۰ متر در کوه‌های تخت سلیمان در ارتفاعات شهرستان ماهنشان واقع شده است. حدود ۱/۶ درصد از مساحت استان اقلیم خشک، ۷۶ درصد اقلیم نیمه خشک، ۲۰ درصد مدیترانه‌ای و ۲/۴ درصد نیمه مرطوب تا مرطوب است (Zanjani Jam and Soufi, 2005). آبخوان‌های آبرفتی شامل طارم، زنجان، ماهنشان، مشمپا، سجاس، زرین‌آباد، ابهر و قیدار بوده که به ترتیب دارای مساحت ۷۵/۵، ۱۱۴۶/۱۳، ۳۰/۰۶، ۳۶/۱، ۵۰۱/۷، ۴۹۵/۴، ۶۵۷/۶ و ۶۹۹/۲ کیلومتر مربع هستند. از میان

² Integrated Water Resources Management

³ Global Water Partnership

⁴ Water demand

¹ Level of Management

$$LOM_s = \frac{AGW_s - TWS}{AGW_s} \quad (5)$$

در روابط بالا، اندیس‌های n و s به ترتیب بیانگر شرایط نرمال و پایدار هستند. در نتیجه، آب‌های زیرزمینی موجود نرمال (AGW_n) و آب‌های زیرزمینی موجود پایدار (AGW_s) را می‌توان با استفاده از معادلات زیر محاسبه کرد:

$$AGW_n = R_n - EFR = (I_p + I_r + I_s + I_{irg} + I_{mi} + I_{net}) - EFR \quad (6)$$

$$AGW_s = R_s - EFR = (I_p + I_r + I_s + I_{irg} + I_{mi}) - EFR \quad (7)$$

که در آن R_n به معنی تغذیه آب زیرزمینی از هر دو منطقه سفره و آب زیرزمینی مجاور است و R_s تغذیه آب زیرزمینی فقط از آبخوان منطقه است. مقدار EFR نیز نیاز آبی محیط‌زیست است. تغذیه آب زیرزمینی می‌تواند ناشی از مؤلفه‌های مختلفی باشد که شامل: نفوذ از بارش (I_p)، تغذیه آب زیرزمینی از رودخانه (I_r)، تغذیه آب زیرزمینی از رواناب (I_s)، تغذیه آب زیرزمینی ناشی از آب برگشتی کشاورزی (I_{irg}) و شهری-صنعتی (I_{mi}) و تغذیه خالص آب زیرزمینی از آب‌های زیرزمینی مجاور (I_{net}) است؛ بنابراین، تفاوت بین حجم آب زیرزمینی موجود نرمال و پایدار برابر با خالص ورودی آب زیرزمینی (I_{net}) است.

بر اساس مقادیر سطح مدیریت نرمال و پایدار چهار کلاس مدیریتی را می‌توان ارائه داد که شامل موارد زیر (جدول ۱) است (Naderi and Hajiketabi, 2023):

- کلاس مدیریتی «سوءمدیریت» که در این حالت هر دو شاخص مدیریت نرمال و پایدار منفی هستند و کاهش سطح آب زیرزمینی را به دنبال دارند.

- کلاس «مدیریت پایدار» که هر دو شاخص نرمال و پایدار مثبت بوده و افزایش سطح آب زیرزمینی یا عدم تغییر سطح آب زیرزمینی را به دنبال خواهد داشت.

- کلاس مدیریتی «شبه پایدار» که در این حالت مدیریت پایدار منفی، اما مقدار نرمال آن مثبت است و افزایش سطح آب زیرزمینی رخ خواهد داد. در این حالت

آبی است که یک بخش (کشاورزی، صنعت یا شرب) برای تولید کالا و ارائه خدمات به آن نیاز دارد. «تأمین آب» حجم ناخالص آب زیرزمینی برداشت‌شده برای تأمین نیاز آب همه بخش‌ها در یک منطقه معین است. سطح مدیریت برای یک منبع آبی از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Naderi, 2021):

$$LOM = \frac{AGW - TWS}{AGW} \quad (1)$$

$$TWS = \sum_{i=1}^n WS_i = WS_{agriculture} + WS_{municipal-industrial} \quad (2)$$

در روابط بالا LOM میزان سطح مدیریت آب زیرزمینی، AGW آب زیرزمینی موجود^۲ و TWS میزان برداشت چاه‌ها و قنات‌ها^۳ از آب‌های زیرزمینی است. آب زیرزمینی موجود یا قابل‌دسترس (AGW) نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$AGW = R - EFR \quad (3)$$

در رابطه بالا، R میزان تغذیه کل آبخوان (میلیون مترمکعب در سال) و EFR نیاز آبی محیط (میلیون مترمکعب در سال) است.

در ادامه، سطح مدیریت آب زیرزمینی (LOM)، تحت شرایط «نرمال» و «پایدار» کمی‌سازی می‌شود. تفاوت بین دو مقدار LOM از تعاریف برای منشأ آب‌های زیرزمینی موجود ناشی می‌شود. حجم آب زیرزمینی موجود پایدار از خود منطقه سفره آب زیرزمینی سرچشمه می‌گیرد، اما آب‌های زیرزمینی نرمال از هر دو منطقه آبخوان محلی و سفره‌های زیرزمینی مجاور سرچشمه می‌گیرند تا نیازهای آبی منطقه را برآورده کنند. سطح مدیریت نرمال و پایدار از روابط زیر محاسبه می‌شود (Naderi and Hajiketabi, 2023):

$$LOM_n = \frac{AGW_n - TWS}{AGW_n} \quad (4)$$

¹ Water supply

² Available groundwater

³ Total water supply

⁴ Environmental flow requirement

که برابر با ۳۶/۵۶ میلیون مترمکعب در سال است؛ بنابراین سطح مدیریت نرمال و پایدار برای آبخوان آبرفتی طارم به ترتیب برابر با ۶/۵ و ۰/۳۸- درصد است.

آبخوان آبرفتی زنجان: آبخوان زنجان با وسعت ۱۱۴۶/۱۳ کیلومتر مربع بزرگترین آبخوان استان است. مؤلفه‌های بیلان برای این آبخوان در جدول ۲ ارائه شده است (Consulting Engineers, Sefidroud-Gilan, 2023b). مجموع تخلیه و تغذیه آبخوان برابر با ۲۹۷/۸۴ و ۲۷۲/۲۳ میلیون مترمکعب است که منجر به تغییرات حجم ذخیره ۲۵/۶۱- میلیون مترمکعب شده است (جدول ۲). نیاز آبی محیط برابر با ۴/۰۲ میلیون مترمکعب در سال است. همچنین برداشت از آب زیرزمینی نیز مطابق با رابطه ۲ برابر با مجموع تخلیه توسط چاه و قنات است که برابر با ۲۹۲/۴۴ میلیون مترمکعب در سال است. در نهایت، سطح مدیریت نرمال و پایدار برای آبخوان آبرفتی زنجان به ترتیب برابر با ۹- و ۴۱- درصد است (جدول ۲).

آبخوان آبرفتی ماهنشان: بررسی مؤلفه‌های بیلان (Consulting Engineers, 2023c Sefidroud-Gilan) نشان می‌دهد که مجموع تخلیه و تغذیه برابر با ۱۲۴/۲ و ۱۲۸/۰۳ میلیون مترمکعب است که موجب تغییرات ذخیره ۳/۸۳ میلیون مترمکعب در سال شده است (جدول ۲). در آبخوان ماهنشان نیاز آبی محیط برابر با ۱/۴۵ میلیون مترمکعب در سال است. همچنین برداشت از آب زیرزمینی نیز برابر با ۱۲۲/۲۶ میلیون مترمکعب در سال است. سطح مدیریت نرمال و پایدار نیز به ترتیب برابر با ۳ و ۰/۱- درصد است (جدول ۲).

آبخوان آبرفتی مشمپا: براساس مؤلفه‌های بیلان (Consulting Engineers, 2023c Sefidroud-Gilan) مجموع تخلیه و تغذیه آبخوان آبرفتی مشمپا (مساحت ۳۶/۱ کیلومتر مربع) برابر با ۳۶/۹۲ و ۳۷/۷۴ میلیون مترمکعب است که منجر به تغییرات ذخیره ۰/۸۲ میلیون مترمکعب شده است (جدول ۲). در این آبخوان نیاز آبی محیط برابر با ۱/۰۳ میلیون مترمکعب در سال برداشت از آب زیرزمینی نیز برابر با ۳۵/۳۹ میلیون مترمکعب در سال است. همچنین سطح مدیریت نرمال

مقدار برداشت بیشتر از آب تجدیدپذیر سالانه خود آبخوان است (مدیریت پایدار منفی)، اما شرایط هیدروژئولوژیکی موجب شده تا سطح آب زیرزمینی افزایش یابد (مدیریت نرمال مثبت). در این حالت بخشی از اضافه برداشت از آبخوان‌های مجاور تأمین شده است. - کلاس مدیریتی «شبه ناپایدار» که در این حالت مقدار مدیریت پایدار مثبت، اما مدیریت نرمال منفی است و کاهش سطح آب زیرزمینی رخ خواهد داد. در چنین حالتی اگرچه مقدار برداشت از آبخوان کمتر از آب تجدیدپذیر سالانه خود آبخوان است (مدیریت پایدار مثبت)، اما آب مازاد به جای ذخیره در خود آبخوان، به دلیل شیب هیدرولیکی موجود به آبخوان‌های مجاور انتقال یافته و سطح آب زیرزمینی کاهش می‌یابد (مدیریت نرمال منفی).

جدول ۱- انواع کلاس‌های مدیریتی آبخوان‌ها (Naderi and Hajiketabi, 2023)

مدیریت نرمال	مدیریت پایدار	کلاس مدیریتی
مثبت	مثبت	پایدار
منفی	منفی	سوءمدیریت
مثبت	منفی	شبه پایدار
منفی	مثبت	شبه ناپایدار

نتایج و بحث

آبخوان آبرفتی طارم: وسعت این آبخوان برابر با ۷۵/۵ کیلومتر مربع است. مجموع تخلیه آبخوان آبرفتی طارم برابر با ۳۹/۸ میلیون مترمکعب و مجموع تغذیه آبخوان برابر با ۴۲/۳۷ میلیون مترمکعب است (جدول ۲)؛ بنابراین با کسر مجموع تخلیه از تغذیه آبخوان، تغییرات حجم ذخیره آبخوان برابر با ۲/۵۷ میلیون مترمکعب است (Sefidroud-Gilan Consulting Engineers, 2023a). مطابق با روابط ۴ و ۵، سطح مدیریت نرمال و پایدار برای آبخوان آبرفتی طارم محاسبه شده که نتایج آن در جدول ۲ قابل مشاهده است. نیاز آبی محیط برابر مجموع زهکشی آب زیرزمینی توسط رودخانه و دبی چشمه‌ها است که برابر با ۲/۷۵ میلیون مترمکعب در سال است. همچنین برداشت از آب زیرزمینی نیز مطابق با رابطه ۲ برابر با مجموع تخلیه توسط چاه و قنات است

مترمکعب است (جدول ۲). تغییرات حجم ذخیره در آبخوان سجاس برابر با ۶/۴۶- میلیون مترمکعب است (جدول ۲). نیاز آبی محیط و برداشت از آب زیرزمینی نیز برابر با ۲/۳۳ و ۷۸/۸۹ میلیون مترمکعب در سال است که منجر به سطح مدیریت نرمال و پایدار ۸/۹- و ۱۷/۷- درصد شده است (جدول ۲).

و پایدار نیز به ترتیب برابر با ۲ و ۹/۷- درصد است (جدول ۲).

آبخوان آبرفتی سجاس: براساس مؤلفه‌های بیلان (Consulting Engineers, 2023d Sefidroud-Gilan) مجموع تخلیه و تغذیه آبخوان آبرفتی سجاس با مساحت ۵۰۱/۷ کیلومتر مربع برابر با ۸۱/۹۵ و ۷۵/۴۹ میلیون

جدول ۲- میانگین سالیانه مؤلفه‌های بیلان، حجم آب موجود نرمال و پایدار و نیاز آبی محیط‌زیست (میلیون مترمکعب) و سطح مدیریت نرمال و پایدار (درصد) در آبخوان‌های آبرفتی استان زنجان

مؤلفه بیلان	آبخوان طارم	آبخوان زنجان	آبخوان ماهنشان	آبخوان مشمیا	آبخوان سجاس	آبخوان زرین‌آباد	آبخوان ابهر	آبخوان قیدار
خروجی زیرزمینی	۰/۵	۱/۳۸	۰/۵	۰/۵	۰/۷	۰/۸۷	۸/۷۸	۳
تبخیر	۰	۰	۰	۰	۰/۰۳	۰/۲۱	۰	۰
زهکشی رودخانه	۲/۷۴	۲/۲۴	۱/۰۲	۱/۰۳	۰/۶	۰	۰	۰
تخلیه (چاه‌ها)	۳۵/۹۳	۲۹۱/۷۱	۱۲۲/۲	۳۵/۳۹	۷۷/۸۵	۵۹/۴۵	۱۹۷/۱۱	۱۶۰/۱۷
تخلیه (چشمه)	۰/۰۱	۱/۷۸	۰/۴۳	۰	۱/۷۳	۱/۳۴	۰/۰۶	۰/۳۹
تخلیه (قنوات)	۰/۶۳	۰/۷۳	۰/۰۶	۰	۱/۰۴	۰/۳۲	۰/۱۷	۱/۹۴
نفوذ (آب شرب)	۰/۸۱	۴۷/۸۸	۱/۰۷	۰/۶۹	۳/۴۸	۲/۲۹	۱۴/۴	۳/۱۷
نفوذ (آب صنعت)	۰/۰۲	۵/۳۲	۰/۳۹	۰/۰۲	۰/۲۱	۰/۰۴	۰	۰
نفوذ (آبیاری)	۲۴/۹۶	۷۷/۷۱	۷۵/۳۵	۱۶/۰۹	۲۰/۴	۶/۲۴	۴۵/۵۰	۳۹/۹۸
نفوذ (بارش)	۱/۶۷	۴۷/۱۴	۱/۰۱	۱/۰۵	۳۴/۲۲	۲۳/۷۱	۱۰/۸۵	۱۹/۳۰
نفوذ (آب سطحی)	۱۱/۷۱	۳۳/۳۴	۴۵/۷۵	۱۵/۴۲	۱۱/۰۴	۴/۶۴	۲۵/۱۳	۱۶/۷۴
ورودی زیرزمینی	۳/۲	۶۰/۸۴	۴/۴۶	۴/۴۷	۶/۱۴	۱۵/۷۴	۶۴/۴۴	۶۶/۷۶
مجموع تخلیه	۳۹/۸	۲۹۷/۸۴	۱۲۴/۲	۳۶/۹۲	۸۱/۹۵	۶۲/۱۸	۲۰۶/۱۲	۱۶۵/۵
مجموع تغذیه	۴۲/۳۷	۲۷۲/۲۳	۱۲۸/۰۳	۳۷/۷۴	۷۵/۴۹	۵۲/۶۶	۱۶۰/۳۲	۱۴۵/۹۵
نیاز محیط‌زیست	۲/۷۵	۴/۰۲	۱/۴۵	۱/۰۳	۲/۳۳	۱/۳۴	۰/۰۶	۰/۳۹
آب موجود نرمال	۳۹/۱۲	۲۶۶/۸۳	۱۲۶/۰۸	۳۶/۲۱	۷۲/۴۶	۵۰/۴۵	۱۵۱/۴۸	۱۴۲/۵۶
آب موجود پایدار	۳۶/۴۲	۲۰۷/۳۷	۱۲۲/۱۲	۳۲/۲۴	۶۷/۰۲	۳۵/۵۸	۹۵/۸۲	۷۸/۸
تغییرات ذخیره	۲/۵۷	-۲۵/۶۱	۳/۸۳	۰/۸۲	-۶/۴۶	-۹/۵۲	-۴۵/۸	-۱۹/۵۵
مدیریت نرمال	۶/۵	-۹	۳	۲	-۸/۹	-۱۸/۵	-۳۰	-۱۴
مدیریت پایدار	-۰/۳۸	-۴۱	-۰/۱	-۹/۷	-۱۷/۷	-۶۸	-۱۰۶	-۱۰۶

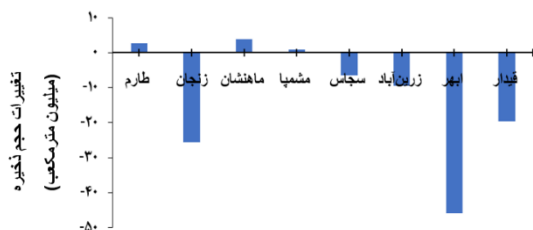
سطح مدیریت نرمال و پایدار ۱۸/۵- و ۶۸- درصد شده است (جدول ۲).

آبخوان آبرفتی ابهر: آبخوان آبرفتی ابهر با وسعت ۶۵۷/۶ کیلومتر مربع یکی از آبخوان‌های بزرگ استان است. براساس مؤلفه‌های بیلان (Consulting Rey-Ab Engineers, 2023) مجموع تخلیه و تغذیه به آبخوان برابر با ۲۰۶/۱۲ و ۱۶۰/۳۲ میلیون مترمکعب است که موجب تغییرات ذخیره ۴۵/۸۰- میلیون مترمکعب شده

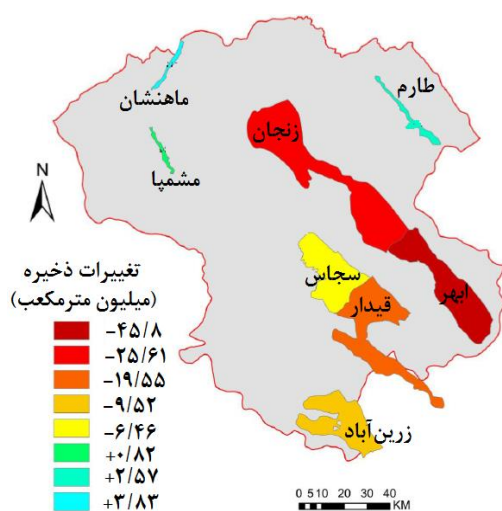
آبخوان زرین‌آباد: براساس مؤلفه‌های بیلان (Consulting Engineers, 2023e Sefidroud-Gilan)

مجموع تخلیه و تغذیه آبخوان (مساحت ۴۹۵/۴ کیلومتر مربع) برابر با ۶۲/۱۸ و ۵۲/۶۶ میلیون مترمکعب است که تغییرات ذخیره ۹/۵۲- میلیون مترمکعب در سال را به همراه داشته است (جدول ۲). در این آبخوان، نیاز آبی محیط و برداشت از آب زیرزمینی برابر با ۱/۳۴ و ۵۹/۷۷ میلیون مترمکعب در سال است که منجر به

ماسه ریزدانه تا دانه درشت) تقریباً مشابه است، به نحوی که تغییرات قابلیت انتقال آبخوان‌ها (۱۰۰-۴۰۰۰ مترمربع در روز) نیز به هم نزدیک است.



شکل ۲- تغییرات حجم ذخیره آبخوان‌های آبرفتی استان زنجان



شکل ۳- نقشه تغییرات حجم ذخیره آبخوان‌های آبرفتی استان زنجان

میزان نفوذ بارش به آب زیرزمینی در دو آبخوان ماهنشان و مشمیا ۵ درصد بارش و در آبخوان‌های طارم، زنجان، ابهر، قیدار، زرین‌آباد و سجاس بیشتر (۸-۱۳ درصد بارش) است؛ بنابراین با توجه به بارش کمتر و درصد نفوذ کمتر بارش در آبخوان‌های ماهنشان و مشمیا نسبت به سایر مناطق، خطرپذیری کم‌آبی ناشی از بارش در این دو آبخوان بیشتر از بقیه مناطق است؛ البته در دو آبخوان ماهنشان و مشمیا به دلیل نفوذ قابل توجه آب آبیاری و تغذیه توسط رودخانه و برداشت مناسب از منابع آب، تغییرات ذخیره در آن‌ها مثبت است. در همه مناطق، آبرفت‌های عهد حاضر که آبخوان‌ها را تشکیل داده‌اند، توسط سازندهای کربناته لار، قم، میلا، الیکا و روته، دولومیت‌های سلطانیه، توف‌های سازند کرج،

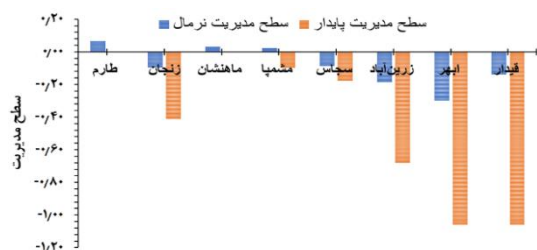
است (جدول ۲). در آبخوان ابهر، نیاز آبی محیط و برداشت از آب زیرزمینی برابر با ۰/۰۶ و ۱۹۷/۲۸ میلیون مترمکعب در سال است که منجر به سطح مدیریت نرمال و پایدار ۰/۳- و ۱/۰۶- درصد شده است (جدول ۲).

آبخوان آبرفتی قیدار: براساس مؤلفه‌های بیلان (Rey- Consulting Engineers, 2023 Ab) تغذیه آبخوان برابر با ۱۶۵/۵ و ۱۴۵/۹۵ میلیون مترمکعب است که موجب تغییرات ذخیره حدود ۱۹/۵۵- میلیون مترمکعب شده است (جدول ۲). همچنین نیاز آبی محیط و برداشت از آب زیرزمینی برابر با ۰/۳۹ و ۱۶۲/۱۱ میلیون مترمکعب در سال است که منجر به سطح مدیریت نرمال و پایدار ۰/۱۴- و ۱/۰۶- درصد شده است (جدول ۲).

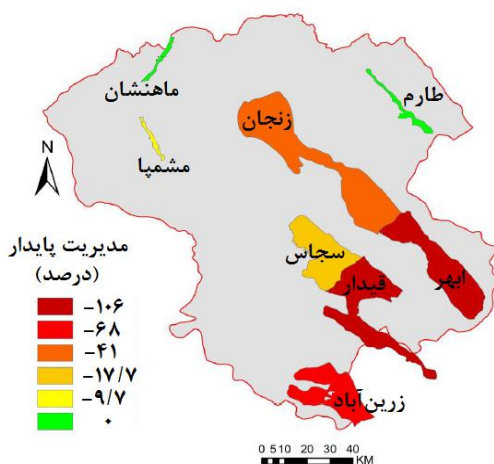
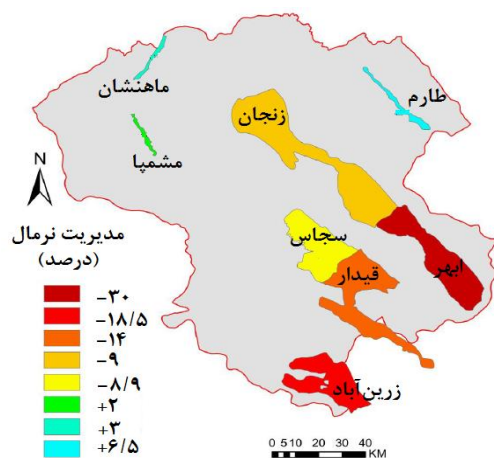
تغییرات حجم ذخیره آبخوان‌های آبرفتی زنجان، سجاس، زرین‌آباد، ابهر و قیدار منفی بوده و درمقابل آبخوان‌های ماهنشان، مشمیا و طارم دارای تغییرات حجم ذخیره مثبت هستند (شکل‌های ۲ و ۳). در سه آبخوان طارم، ماهنشان و مشمیا که آبخوان‌های کوچکی هستند، قسمت عمده تغذیه آبخوان از آب برگشتی کشاورزی و نفوذ از جریان‌های سطحی تأمین می‌شود؛ به طوری که در آبخوان‌های طارم، ماهنشان و مشمیا حدود ۸۵، ۹۵ و ۸۳/۵ درصد از تغذیه کل از این دو منبع تأمین می‌شود. همچنین در آبخوان‌های طارم، ماهنشان و مشمیا حدود ۹۰، ۹۸ و ۹۵ درصد تخلیه کل توسط چاه‌ها صورت می‌گیرد. در این سه آبخوان با توجه به وسعت کم برداشت و تغذیه مناسب، تغییرات ذخیره مثبت است. در آبخوان‌های زنجان، سجاس، زرین‌آباد، ابهر و قیدار اگرچه سهم آب برگشتی کشاورزی و نفوذ آب سطحی در تغذیه کل مناسب است، به دلیل برداشت زیاد آب توسط چاه‌ها در وسعت زیاد، ذخیره آبخوان کاهش یافته است.

متوسط سالانه بارش در آبخوان‌های طارم، زنجان، ماهنشان، سجاس، زرین‌آباد، ابهر، قیدار و مشمیا به ترتیب برابر با ۲۹۵، ۳۰۵، ۲۵۵، ۳۶۵، ۳۵۰، ۳۵۴، ۳۴۰ و ۲۲۰ میلی‌متر است. در همه آبخوان‌ها به دلیل واقع شدن در بستر رودخانه، جنس رسوبات آبخوان

ماهنشان و مشمپا فاقد چاه مشاهده‌ای هستند و بنابراین سطح آب برای آن‌ها ترسیم نشده است.



شکل ۴- سطح مدیریت پایدار و نرمال آبخوان‌های آبرفتی استان زنجان



شکل ۵- نقشه تغییرات سطح مدیریت نرمال و پایدار آبخوان‌های آبرفتی استان زنجان

سطح آب زیرزمینی در آبخوان‌های ابهر، زنجان، سجاس، طارم، قیدار و زرین‌آباد به ترتیب ۰/۰۴، ۰/۳۱۹، ۰/۰۷۳، ۰/۰۱۶، ۰/۰۲۸ و ۰/۰۵۴ متر در ماه طی دوره ۱۳۹۶-۱۳۸۵ افت داشته است که معادل افت ۰/۸۷، ۳/۸۳،

شیل‌های دولومیتی سازند کهر، گرانیته‌ها و آندزیت‌ها و کنگلومرای پلیوسن احاطه شده‌اند. سازندهای کربناته و ماسه‌سنگ‌های پلیوسن منابع خوبی برای تغذیه آبخوان‌های آبرفتی محسوب می‌شوند.

همه آبخوان‌های آبرفتی استان دارای سطح مدیریت پایدار منفی هستند (شکل‌های ۴ و ۵). آبخوان‌های زنجان، سجاس، ابهر، زرین‌آباد و قیدار سطح مدیریت نرمال منفی و آبخوان‌های طارم، ماهنشان و مشمپا مدیریت نرمال مثبت را دارند. تغییرات ذخیره در آبخوان‌ها با سطح مدیریت نرمال کاملاً منطبق است (جدول ۲). در سه آبخوان طارم، ماهنشان و مشمپا مدیریت پایدار منفی است (نشان‌دهنده اضافه‌برداشت)، اما مدیریت نرمال آن‌ها مثبت است. این امر نشان می‌دهد آب خالص ورودی زیرزمینی از اطراف علاوه بر تأمین مقداری از اضافه‌برداشت از آبخوان، ذخیره آبخوان را نیز افزایش داده است؛ برای مثال در آبخوان طارم، تخلیه آب زیرزمینی و آب موجود پایدار برابر با ۳۶/۵۶ و ۳۶/۴۲ میلیون مترمکعب است؛ بنابراین ۰/۱۴ میلیون مترمکعب اضافه برداشت صورت می‌گیرد (مدیریت پایدار منفی). ورودی خالص آب زیرزمینی برابر با ۲/۷ میلیون مترمکعب است که ۰/۱۴ میلیون مترمکعب آن صرف جبران اضافه‌برداشت و مابقی آن (۲/۵۶ میلیون مترمکعب) در آبخوان ذخیره‌شده و موجب تغییرات مثبت ذخیره آبخوان (مدیریت نرمال مثبت) شده است. سطح آب زیرزمینی در آبخوان زنجان طی دوره ۲۰۱۸-۲۰۰۴ حدود ۸ متر افت داشته (به دلیل اضافه‌برداشت) و موجب فرونشست زمین به مقدار ۴۰ میلی‌متر در سال شده است (Dastjerdy and Emadi, 2020, Mohammadi Arasteh and Shoaie, 2020, Panahi et al., 2018). میزان پایداری آبخوان‌های ابهر و قیدار از حدود ۷۵-۵۰ درصد در سال ۲۰۱۰ به صفر درصد در سال ۲۰۱۸ کاهش یافته است (Samani et al., 2021). سطح آب در آبخوان‌های زنجان، سجاس، زرین‌آباد، ابهر و قیدار ۴/۳، ۴، ۲/۹، ۱/۸ و ۳/۲ متر طی سال آبی ۱۳۸۷-۱۳۸۶ افت داشته است (Abdinejad, 2011). در این مطالعه تغییرات ماهانه سطح آب برای آبخوان‌های استان در شکل ۶ نشان داده شده است. آبخوان‌های

نرمال و پایدار منفی بوده و نشانگر کلاس مدیریتی «سوءمدیریت» است. مدیریت نرمال و پایدار در آبخوان زنجان به ترتیب برابر با ۹- و ۴۱- درصد، در آبخوان سجاس ۸/۹- و ۱۷/۷- درصد، در آبخوان زرین آباد ۱۸/۵- و ۶۸- درصد، در آبخوان ابهر ۳۰- و ۱۰۶- درصد و در آبخوان قیدار ۱۴- و ۱۰۶- درصد است. توصیه می‌شود برای بهبود مدیریت آبخوان‌ها، با استفاده از راهکارهایی مانند تصفیه پساب، کاهش سطح زیرکشت، افزایش راندمان آبیاری و کشت محصولات با نیاز آبی کمتر مقدار برداشت از آب زیرزمینی کاهش یابد.

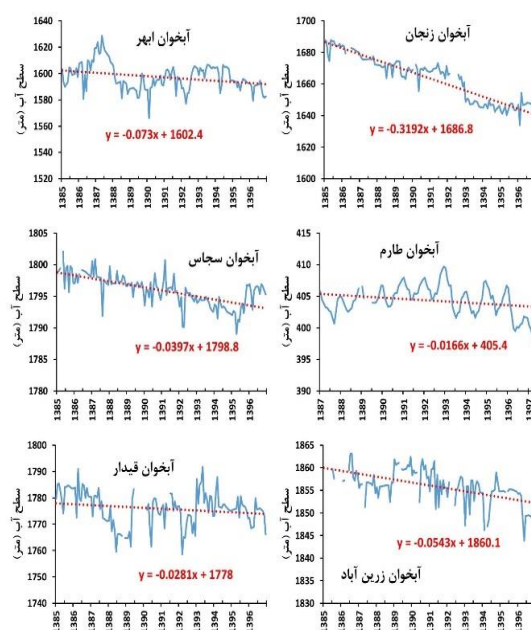
سیاسگزاری

نویسندگان از دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان کمال تشکر را داشته و از شرکت مدیریت منابع آب ایران و شرکت آب منطقه‌ای زنجان برای در اختیار گذاشتن اطلاعات مورد نیاز تشکر می‌کنند.

منابع

1. Abdinejad, P., 2011. Investigating the status of groundwater tables in important plains of Zanjan province (for proper management of groundwater resources in those areas). *Second National Conference on Applied Water Resources Research, Zanjan*. [In Persian].
2. Ashraf, S., Nazemi, A. and AghaKouchak, A., 2021. Anthropogenic drought dominates groundwater depletion in Iran. *Scientific reports*, 11(1), p.9135.
3. Dastjerdy, M. and Emadi, S.R., 2020. Investigating the Subsidence of Zanjan Plain and its Relationship with the Drop in the Level of Groundwater Levels using Radar Images of Envisat Satellite between 2003 and 2010. *Hydrophysics*, 6(1): 67-82. [In Persian].
4. Ghazali, S., 2012. The relation between Parishan Lake water level and adjacent groundwater under groundwater over-exploitation. *Journal of Agricultural Economics Researches*, 4: 121-135. [In Persian].
5. Haghghi, A.T. and Kløve, B., 2017. Design of environmental flow regimes to maintain lakes and wetlands in regions with high seasonal irrigation demand. *Ecological engineering*, 100: 120-129.
6. Mohammadi Arasteh, S. and Shoaie, S.M., 2020. An assessment of the effects of excessive groundwater abstraction on the quality of

۰/۴۸، ۰/۲، ۰/۳۳ و ۰/۶۵ متر در سال است؛ بنابراین سوءمدیریت در این آبخوان‌ها موجب کاهش سطح آب زیرزمینی شده است. در آبخوان طارم مدیریت نرمال و تغییرات سطح آب برای دوره بیلان (منتهی به سال ۱۳۹۵) مثبت است (شکل ۶)؛ اما به نظر می‌رسد در سال‌های اخیر (۱۳۹۵-۱۳۹۷) سطح مدیریت تغییر کرده باشد، به طوری که موجب کاهش سطح آب شده است.



شکل ۶- تغییرات ماهانه سطح آب زیرزمینی در آبخوان‌های آبرفتی استان زنجان

نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهد تغییرات حجم ذخیره در آبخوان‌های طارم، زنجان، ماهنشان، مشمیا، سجاس، زرین‌آباد، ابهر و قیدار به ترتیب برابر با ۲/۵۷، ۲۵/۶۱، ۳/۸۳، ۰/۸۲، ۶/۴۶، ۹/۵۲، ۴۵/۸۰ و ۱۹/۵۵ میلیون مترمکعب در سال است؛ در نتیجه آبخوان‌های طارم، ماهنشان و مشمیا دارای تغییرات ذخیره مثبت هستند. در آبخوان‌های ماهنشان، مشمیا و طارم مدیریت نرمال مثبت (به ترتیب ۳، ۲ و ۶/۵ درصد)، اما مدیریت پایدار منفی (به ترتیب ۰/۱، ۹/۷ و ۰/۳۸ درصد) است که بیانگر کلاس مدیریتی «شبه پایدار» است. در آبخوان‌های زنجان، سجاس، ابهر، قیدار و زرین‌آباد هر دو مدیریت

- into risk indexing through a fuzzy catastrophe scheme. *Water resources management*, 34: 175-194.
18. Samani, S., Moghaddam, H.K., and Zareian, M.J., 2021. Evaluating time series integrated groundwater sustainability: a case study in Salt Lake catchment, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 80(17), p.603.
 19. Sefidroud-Gilan Consulting Engineers., 2023a. Water resources report for the Sefidroud basin and the Talesh-Anzali rivers (the Tarem-Khalkhal area). *Water Resources Management Company*, 5. [In Persian].
 20. Sefidroud-Gilan Consulting Engineers., 2023b. Water resources report for the Sefidroud basin and the Talesh-Anzali rivers (the Zanjan area). *Water Resources Management Company*, 5. [In Persian].
 21. Sefidroud-Gilan Consulting Engineers., 2023c. Water resources report for the Sefidroud basin and the Talesh-Anzali rivers (the Mahneshan-Anguran area). *Water Resources Management Company*, 5. [In Persian].
 22. Sefidroud-Gilan Consulting Engineers., 2023d. Water resources report for the Sefidroud basin and the Talesh-Anzali rivers (the Sojas area). *Water Resources Management Company*, 5. [In Persian].
 23. Sefidroud-Gilan Consulting Engineers., 2023e. Water resources report for the Sefidroud basin and the Talesh-Anzali rivers (the Goltappeh-Zarrin Abad area). *Water Resources Management Company*, 5. [In Persian].
 24. Sima, S., Rosenberg, D.E., Wurtsbaugh, W.A., Null, S.E. and Kettenring, K.M., 2021. Managing Lake Urmia, Iran for diverse restoration objectives: Moving beyond a uniform target lake level. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 35, p.100812.
 25. Vanham, D., Hoekstra, A.Y., Wada, Y., Bouraoui, F., De Roo, A., Mekonnen, M.M. and Bidoglio, G., 2018. Physical water scarcity metrics for monitoring progress towards SDG target 6.4: An evaluation of indicator 6.4. 2 "Level of water stress". *Science of the total environment*, 613: 218-232.
 26. Woldeamlak, S.T., Batelaan, O. and De Smedt, F., 2007. Effects of climate change on the groundwater system in the Grote-Nete catchment, Belgium. *Hydrogeology Journal*, 15: 891-901.
 27. Zanjani Jam, M. and Soufi, M., 2005. Investigating the relationship between climate and aquifer regions in Zanjan province. *National Erosion and Sediment Conference*. [In Persian].
 7. Moshir Panahi, D., Kalantari, Z., Ghajarnia, N., Seifollahi-Aghmiuni, S. and Destouni, G., 2020. Variability and change in the hydro-climate and water resources of Iran over a recent 30-year period. *Scientific reports*, 10: 1-9.
 8. Naderi, M. and Hajiketabi, M., 2023. Quantification of normal and sustainable management practices for groundwater resources: example of the arid Najafabad alluvial aquifer in Isfahan Province, Iran. *Hydrogeology Journal*, 31(2): 195-218.
 9. Naderi, M. and Raeisi, E., 2018. Management strategies of a critical aquifer under the climate change in Jahrum of South-Central Iran. *Sustainable Water Resources Management*, 4: 1077-1090.
 10. Naderi, M., 2020. Assessment of water security under climate change for the large watershed of Dorudzan Dam in southern Iran. *Hydrogeology Journal*, 28(5): 1553-1574.
 11. Naderi, M., 2021. Assessing level of water resources management based on water supply and availability concepts. *Journal of Cleaner Production*, 305, p.127086.
 12. Noori, R., Maghrebi, M., Mirchi, A., Tang, Q., Bhattarai, R., Sadegh, M., Noury, M., Haghghi, A.T., Kløve, B. and Madani, K., 2021. Anthropogenic depletion of Iran's aquifers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118.
 13. Panahi, M., Misagi, F. and Asgari, P., 2018. Simulation and estimate of groundwater level fluctuations using GMS (case study: Zanjan plain). *Environmental Sciences*, 16(1): 1-14. [In Persian].
 14. Rey-Ab Consulting Engineers., 2023. Preparation of the water resources report for the water year 1397-1398 in the Lake Urmia basin. *Water Resources Management Company*, 3. [In Persian].
 15. Rodrigues, D.B., Gupta, H.V. and Mendiondo, E.M., 2014. A blue/green water-based accounting framework for assessment of water security. *Water Resources Research*, 50(9): 7187-7205.
 16. Sadeghfam, S., Ehsanitarbar, A., Khatibi, R. and Daneshfaraz, R., 2018. Investigating 'risk' of groundwater drought occurrences by using reliability analysis. *Ecological Indicators*, 94: 170-184.
 17. Sadeghfam, S., Khatibi, R., Daneshfaraz, R. and Borhan Rashidi, H., 2020. Transforming vulnerability indexing for saltwater intrusion groundwater resources of the Zanjan Plain, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 79(523): 1-13.