ارزیابی پایداری توسعه آب زیرزمینی در سفره چندلایه (مطالعه موردی: آبخوان استان گلستان)

ایمان کریمی راد[۱] کیومرث ابراهیمی[۲]* ،شهاب عراقی نژاد[۳]

تاریخ ارسال:۱۳۹۶/۰۸/۰۹
تاریخ پذیرش:۱۳۹۷/۰۶/۲۷

مقاله برگرفته از رساله دکتری ایمان کریمی‌راد

چکیده

ارزیابی یک سامانه به مجموعه‌ای از شاخص‌ها که بیانگر وضعیت حال و آینده آن باشد، نیاز دارد. آبخوان‌های چندلایه به دلیل تفاوت در فرآیندهای تغذیه و تخلیه‌ی هر لایه، دارای پیچیدگی‌های خاصی است. هدف از این مقاله بررسی پایداری سفره‌های آزاد و تحت‌فشار آبخوان آبرفتی استان گلستان است. آمار مورد استفاده شامل مقادیر بارندگی ماهانه ۱۹ ایستگاه باران‌سنجی، مقادیر رقوم سطح آب ۱۹ چاه مشاهده‌ای در سفره آزاد و سطح پیزومتریک ۱۹ چاه در سفره تحت‌فشار می‌باشد. در این مقاله از ترکیب یازده شاخص که بر اساس داده‌های موجود در منطقه انتخاب شده‌اند، به منظور ارزیابی پایداری استفاده شد. نتایج نشان داد با وجود عدم معناداری روند بارندگی، روند کاهشی در سطح ایستابی لایه آزاد و سطح پیزومتریک لایه تحت فشار وجود دارد. شاخص پایداری آبخوان برای لایه‌های آزاد و تحت‌فشار به ترتیب برابر ۰/۸۹ و ۱/۰۱ است که ناپایداری هر دو لایه و ناپایدارتر بودن لایه تحت‌فشار را نشان می‌دهد. البته شرایط ناپایدار لایه تحت‌فشار تحت پوشش ذخایر آب زیرزمینی غیرتجدیدشونده موجود در آن قرار گرفته است. بر اساس شاخص قابلیت توسعه بهره‌برداری برابر ۰/۲۶، طرح‌های توسعه منابع آب با در نظر گرفتن محدودیت‌های موجود در کمیت و کیفیت آب قابل اجرا است. همچنین شاخص توان بازیابی آبخوان برابر ۲/۸۲ نشان می‌دهد هر دو لایه توان بازیابی خوبی دارند و در صورت بهبود عوامل محیطی تاثیرگذار، با سرعت نسبتاً بالایی به حالت پایدار بازمی‌گردند. بر اساس نتایج، منطقه مورد مطالعه با وضعیت کمبود آب مواجه است که به معنای محدودیت در توسعه اقتصادی، سلامت و بهداشت جوامع انسانی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی؛ استان گلستان؛ سفره آزاد؛ سفره تحت‌فشار؛ شاخص پایداری، فالکنمارک

[۱] دانشجویی دکتری، گروه آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، تلفن: ۰۹۱۱۷۰۰۵۱۰۹. IKarimirad@ut.ac.ir

[۲] استاد، گروه آبیاری و آبادانی ، دانشگاه تهران، کرج، ایران، ، تلفن: ۰۹۱۲۲۵۷۶۶۵۷. EbrahimiK@ut.ac.ir (نویسنده مسئول)

[۳]دانشیار، گروه آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، تلفن: ۰۹۱۲۶۰۵۲۶۴۸. Araghinejad@ut.ac.ir

مقدمه

آب نقش مهمی در توسعه شهری و روستایی به خصوص در کشورهای خشک و نیمه خشک ایفا می‌کند. رشد جمعیت به همراه مصرف‌گرایی، توسعه زمین‌های کشاورزی و مناطق شهری و محدودیت منابع آب سطحی منجر به برداشت فزاینده از آبخوان‌ها شده است. آب زیرزمینی معمولا در مقایسه با آب سطحی، کیفیت بهتری دارد، حساسیت کمتری به آلودگی و نوسانات فصلی و طولانی مدت نشان می‌دهد و به طور یکنواخت‌تری در سطح یک منطقه وسیع پراکنده است (Udmale et al., 2014). مصرف بیش از حد آب زیرزمینی ممکن است چشمه‌ها و جریان پایه آبراهه‌ها را تحت تاثیر قرار داده و به خصوص با افت سطح پیزومتریک سفره‌های تحت‌فشار، باعث نشست زمین شود. محدودیت منابع آبی در مناطق خشک و نیمه خشک به طور طبیعی باعث کاهش کمیت و کیفیت منابع آب و خاک می‌گردد که بر این اساس پایداری منابع آب ازدو جنبه کیفی و کمی قابل بررسی است (فلاح و همکاران، ۱۳۹۱). توسعه پایدار آب‌های زیرزمینی و حفاظت محیط زیست یک فرآیند چند وجهی است. هدف اصلی این فرآیند اطمینان پیدا کردن از کمیت، کیفیت، ایمنی و پایداری آب‌های زیرزمینی به عنوان منبعی راهبردی برای زندگی (مصارف شرب و بهداشتی)، توسعه اقتصادی (مصارف کشاورزی و صنعتی) و جزئی مهم از اکوسیستم است (Vrba et al., 2007).

برای ارزیابی یک سامانه نیاز به مجموعه‌ای از شاخص‌ها است که بتواند آن را از جنبه‌های مختلف بررسی نماید و انعکاس‌دهنده مسایل حال و بیانگر ناپایداری در آینده باشد (صباغ زاده و همکاران، ۱۳۹۰). شاخص‌ها به عنوان ابزاری برای ساده‌سازی، کمی‌سازی، انتقال مفاهیم، رده‌بندی و مقایسه منابع مختلف بکار می‌روند و با ارزیابی تاثیر سیاست‌ها و طرح‌ها، به توسعه اقدامات جدید کمک می‌کند (Vrba et al., 2007).

بررسی وضعیت و روند تغییرات کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی همواره مورد توجه محققین بوده است؛ به عنوان مثال رحمتی و همکاران (۱۳۹۳) با بررسی تغییرات مکانی و زمانی سطح آب زیرزمینی در دشت کرمانشاه با بهره‌گیری از روش‌های زمین آمار، به این نتیجه دست یافت که متوسط سطح ایستابی در طول دوره آماری ۹/۹ متر (۰/۴۹ متر در سال) افت داشته و این در شرایطی است که میزان افت در بعضی نقاط دشت بیش از ۳۰ متر است. همچنین میرعباسی زارعی و بهرامی (۱۳۹۵) با بررسی تغییرات کمی و کیفی آب زیرزمینی دشت فسا در دو دهه اخیر به این نتیجه دست یافتند که متوسط افت سطح ایستابی ۰/۹۵ متر در سال بوده است. جلیلی و همکاران (۱۳۹۵) نیز دشت اسلام آباد استان کرمانشاه را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد در شش سال منتهی به سال آبی ۹۳-۹۲، سطح آبخوان ۶/۶۱ متر (متوسط ۱/۱ متر) افت داشته است.

با وجود مطالعات گسترده بر روی نوسانات سطح آب زیرزمینی، به ارزیابی برآیند این نوسانات و میزان پایداری آبخوان‌ها در کشور توجه قابل توجهی نشده است. در این زمینه تحقیقاتی با استفاده از شاخص‌های پایداری صورت گرفته که به طور کلی در آن‌ها استفاده همزمان از چند شاخص بیشتر معمول است؛ زیرا با بکارگیری یک شاخص به ندرت می‌توان به نتیجه دقیق دست یافت. Shiklomanov (2000) سرانه منابع آب جهان را با استفاده از FI ارزیابی کرد. نتایج تحقیق وی نشان داد در میان کم‌آب‌ترین مناطق جهان، غرب آسیا که ایران در آن واقع شده است، پس از شمال آفریقا و جنوب آسیا با سرانه ۲۱۱۰ مترمکعب در رتبه سوم قرار دارد. Lambán et al. (2011) شاخص‌های پایداری از قبیل

AS[۱] و GAD[۲] را در یک آبخوان کوچک کربناته به مساحت ۲۶ کیلومترمربع واقع در استان سویل[۳]اسپانیا و دارای اقلیم نیمه خشک بکار گرفتند. ایشان به این نتیجه رسیدند که آبخوان مورد مطالعه تحت تاثیر برداشت شدید است به نحوی که ادامه روند بهره‌برداری، آبخوان را از لحاظ کمی و کیفی با ناپایداری مواجه خواهد کرد. Shrestha and Udmale (2014) منابع آب زیرزمینی حوضه آبریز دوبدوبهی[۴] در ایالت ماهاراشترا[۵] هند را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان شاخص‌های FI[۶]، RGPC[۷]، DAG[۸]، AS و GAD را برای آبخوان مذکور به ترتیب برابر ۵۳۷، ۴۹۰، ۸۷/۵، ۷۱/۵ و ۶۴/۵ محاسبه کرده و نتیجه‌گیری کردند با وجود شناسایی بخش‌هایی از منطقه که برداشت بیش از حد از آب زیرزمینی دارند، کل حوضه در وضعیت توسعه پایدار قرار دارد. Anbazhagan and Jothibasu (2016) از AS و GAD برای ارزیابی پایداری در زیرحوضه اوپاراودای[۹] واقع در هند استفاده کردند. این مطالعه نشان داد که تنها در ۲۹ درصد از منطقه مورد مطالعه توسعه بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی امکان‌پذیر است.

مطالعه‌ای برای بررسی پایداری منابع آب در مورد آبخوان مطبق استان گلستان یافت نشد. تنها کریمی راد و همکاران (۱۳۹۴) لایه‌های آبخوان مذکور را مورد مطالعه قرارر داده‌اند و در آن تاثیر نوسان اقلیمی را بر این آبخوان با استفاده از شاخص منبع آب زیرزمینی[۱۰] (GRI) و تحلیل همبستگی مورد ارزیابی قرار گرفت. ایشان نتیجه گرفتند که سفره تحت‌فشار قابل اطمینان‌تر بوده و با تاخیر بیشتری به نوسانات اقلیمی واکنش نشان داده و زودتر بازیابی می‌شود. با این وجود اهمیت آب زیرزمینی در سامانه منابع آب این استان، انجام مطالعات ارزیابی پایداری و قابلیت توسعه آنرا ضروری نموده است. با وجود خصوصیات متفاوت محیط متخلخل، رژیم تغذیه و تخلیه و میزان دسترسی غیر همسان به هر یک از لایه‌های آبخوان، فرآیندهای ژئوهیدرولوژیکی متفاوتی ایجاد شده است. این شرایط لزوم بررسی جداگانه هر لایه را نشان می‌دهد زیرا در نظر گرفتن این آبخوان به عنوان یک پیکره آبی واحد می‌تواند موجب عدم تشخیص ناپایداری یک لایه در وضعیتی که مجموع آبخوان پایدار است، شود. از اینرو هدف اصلی مقاله حاضر ارزیابی پایداری سفره آب زیرزمینی چندلایه شامل لایه‌های آزاد و تحت‌فشار واقع در استان گلستان است.

مواد و روش‌ها

خصوصیات منطقه مورد مطالعه

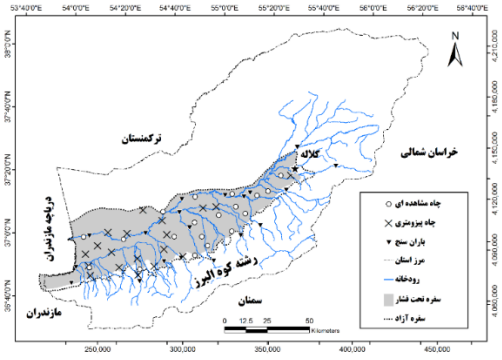
استان گلستان بین عرض‌های شمالی ۳۶ درجه و ۴۴ دقیقه و ۳۸ درجه و ۵ دقیقه و طول‌های شرقی ۵۳ درجه و ۵۱ دقیقه و ۵۶ درجه قرار گرفته است. اقلیم این منطقه بر اساس روش دومارتن از نیمه خشک در شمال تا نیمه مرطوب در جنوب و جنوب غرب تغییر می‌کند (مصطفی زاده و شیخ، ۱۳۹۱). آبخوان آبرفتی استان گلستان با مساحت ۴۷۲۰ کیلومترمربع شامل لایه‌های آزاد و تحت‌فشار منطبق است (شکل ۱). سفره تحت‌فشار به استثنای حدود ۴۰۰ کیلومترمربعاز بخش جنوبی در زیر سفره آزاد گسترش دارد. این آبخوان بخش عمده نیاز شرب و ۶۵ درصد از نیاز کشاورزی را تامین می‌کند (کنکاش عمران، ۱۳۸۸). تقریباً تمام ظرفیت این آبخوان در بخش‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد.

---

۱ پایداری آبخوان
۲ قابلیت توسعه بهره‌برداری
3 Seville
4 Dhubdhubhi
5 Maharashtra
۶ فامکنمارک
۷ سرانه آب زیرزمینی تجدیدشونده
۸ وابستگی کشاورزی به آب زیرزمینی
9 Uppar Odai
10 Groundwater resource index

بنابراین نوسانات سطح آب زیرزمینی باید پایش و با مدیریت مناسب کنترل شود تا از بروز خطر جدی برای منبع اصلی آب منطقه جلوگیری گردد (Koohestani et al., 2013). از لایه‌های آزاد و تحت‌فشار در سامانه آب زیرزمینی استان گلستان در سراسر دشت برداشت می‌شود. لایه آزاد در کل سطح دشت تغذیه می‌شود، در حالی که تغذیه لایه تحت‌فشار محدود به مناطق کوهستانی جنوب و جنوب شرقی است که لایه محصورکننده وجود ندارد.

در مقاله حاضر مقادیر بارندگی ماهانه ۱۹ ایستگاه در دوره زمانی بلندمدت بین سال‌های ۱۳۵۵ و ۱۳۹۲ مورد بررسی قرار گرفت. همچنین از مقادیر رقوم سطح آب ۱۹ چاه مشاهده‌ای در سفره آزاد با دوره آماری ۳۸ ساله (۱۳۵۵ تا ۱۳۹۲) و ۱۹ چاه پیزومتریک سفره تحت‌فشار با دوره آماری ۱۴ ساله (از سال ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۲) در بررسی نوسانات سطح آبخوان استفاده شد. ایستگاه‌ها به نحوی انتخاب شدند که توزیع مناسبی در سطح منطقه داشته باشند. این داده‌ها توسط شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان اندازه‌گیری و ثبت شده است. خصوصیات ژئوهیدرولوژیک هر یک از لایه‌های آبخوان در جدول ۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است طبق دستوالعمل FAO آب تجدیدشونده برابر تفاضل تغذیه و خروجی زیرزمینی و زهکشی است.



شکل (۱): جانمایی آبخوان آبرفتی در استان گلستان

جدول (۱): خصوصیات ژئوهیدرولوژیک آبخوان استان گلستان (کنکاش عمران، ۱۳۹۲)

خصوصیات آبخوان	سفره آزاد	سفره تحت‌فشار
حجم دینامیک/آب تجدیدشونده (میلیون مترمکعب در سال)*	۵۱۳	۳۹۷
حجم استاتیک (غیرتجدیدشونده) (MCM/year)	۱۵۳۳	۱۱۲۱
تغذیه (MCM/year)	۸۵۲	۳۹۸
تخلیه زیرزمینی (MCM/year)	۳۹۹	۲
تخلیه به دریا (MCM/year)	۲	۲
برداشت کل (MCM/year)	۳۵۸	۴۰۱
برداشت از منابع غیرتجدیدشونده (MCM/year)	۰	۳
ضخامت متوسط (m)	۱۵	۱۵۰
متوسط افت در ۱۰ سال اخیر (m)	۰/۰۴۷	۰/۷۲۶
مساحت آبخوان (Km^2)	۴۳۹۳	۴۰۵۰
مساحت پهنه شور آبخوان (Km^2)	۱۴۰۲	۰

*** بر اساس دستورالعمل FAO (2003)[1] محاسبه شده است.**

[1] FAO (food and agriculture organization)

در مقاله حاضر از روش رایج ریشه واحد دیکی- فولر[۱] (ADF) برای آزمون ایستایی سری‌های زمانی استفاده شد (Dickey and Fuller, 1979). همچنین مولفه روند معنی‌دار توسط آزمون من- کندال[۲] (Mann, 1945) استخراج گردید. به منظور ارزیابی پایداری آبخوان و با توجه به داده‌های موجود در منطقه، یازده شاخص که در مطالعات گذشته به دفعات مورد استفاده قرار گرفته‌اند، انتخاب شد. این شاخص‌ها علاوه بر FI[۳]، RGPC[۴]، DAG[۵]، AS[۶] و GAD[۷]، عبارتند از وابستگی به آب زیرزمینی (DG[۸])، نقش آب زیرزمینی در آب شرب (RGSD[۹])، پایداری کیفیت آب زیرزمینی (SGQ[۱۰])، فشار بر منابع آب زیرزمینی غیرتجدیدشونده (PNRG[۱۱])، توان بازیابی آبخوان (ARP[۱۲]) و نرخ میرایی آبخوان (GDR[۱۳]). در بین شاخص‌های ذکر شده دو شاخص اول (FI و RGPC) بیشتر به میزان در دسترس بودن منابع آبی در منطقه مورد مطالعه می‌پردازد، سه شاخص بعدی نیز در محاسبات خود مجموعه آبخوان چندلایه را به صورت یک پیکره آبی واحد در نظر می‌گیرد و شاخص‌های دیگر هر لایه از آبخوان را جداگانه مورد بررسی قرار می‌دهند.

۱- شاخص فالکنمارک

شاخص فالکنمارک با رابطه ۱ محاسبه و شرایط آبی یک منطقه را بر اساس سرانه آب تجدیدشونده تقسیم‌بندی می‌کند (Falkenmark, 1989).

$$\text{FI (مترمکعب بر نفر بر سال)} = \frac{\text{منابع آب شیرین تجدید شونده (میلیون مترمکعب)}}{\text{جمعیت}} \quad (۱)$$

که در آن: منابع آب شیرین تجدیدشونده حاصل جمع منابع آب سطحی قابل بهره‌برداری و تغذیه سفره‌های آزاد و تحت فشار منهای زهکشی و خروجی زیرزمینی این سفره‌ها است.

۲- شاخص سرانه آب زیرزمینی تجدیدشونده

هدف این شاخص تخمین میزان کل آب زیرزمینی تجدیدشونده‌ای است که می‌تواند در یک منطقه برای مصارف شرب، کشاورزی، صنایع و اکوسیستم مورد استفاده قرار گیرد (Vrba and Lipponen, 2007). این شاخص بر اساس رابطه ۲ قابل محاسبه است:

$$\text{RGPC (مترمکعب بر نفر بر سال)} = \frac{\text{منابع آب زیرزمینی تجدید شونده (میلیون مترمکعب)}}{\text{جمعیت}} \quad (۲)$$

که در آن: منابع آب زیرزمینی تجدیدشونده بدون در نظر گرفتن آب‌های شور و لب‌شور است.

۳- شاخص وابستگی به آب زیرزمینی

این شاخص نسبت میزان مصرف آب زیرزمینی به کل منابع آب را بیان می‌کند (بیکی خشک، ۱۳۹۰).

که در آن: حجم بهره‌برداری از آبخوان به کل برداشت از آب زیرزمینی به وسیله چاه، قنات و چشمه برای استفاده در بخش‌های مختلف است.

[1] Augmented Dickey–Fuller test
[2] Mann-Kendall
[3] Falkenmark index
[4] Renewable groundwater resources per capita
[5] Dependence of agriculture to groundwater
[6] Aquifer sustainability
[7] Groundwater abstraction development
[8] Dependence to Groundwater
[9] Role of groundwater in the supply of drinking
[10] Sustainability of groundwater quality
[11] Pressure on non-renewable resources of groundwater
[12] Aquifer recovery potential
[13] Groundwater decay rate

۴- شاخص وابستگی کشاورزی به آب زیرزمینی

میزان وابستگی بخش کشاورزی به آب‌های زیرزمینی با این شاخص و به صورت زیر بیان می‌شود (Karimirad et al., 2017b):

$$DAG\ (\text{درصد}) = \frac{\text{آب زیرزمینی مورد استفاده برای کشاورزی (میلیون مترمکعب)}}{\text{حجم کل آب مورد استفاده در بخش کشاورزی (میلیون مترمکعب)}} \quad (۴)$$

۵- شاخص نقش آب زیرزمینی در آب شرب

این شاخص جهت نشان دادن میزان وابستگی به آب زیرزمینی برای تامین آب شرب در مقایسه با آب سطحی مناسب است (Vrba and Lipponen, 2007):

$$RGSD\ (\text{درصد}) = \frac{\text{میزان مصرف شرب از آب‌های زیرزمینی (مترمکعب میلیون)}}{\text{کل مصرف شرب (مترمکعب میلیون)}} \quad (۵)$$

۶- شاخص پایداری آبخوان

این شاخص بیانگر بخشی از آب آبخوان است که از آن برداشت می‌شود (Vrba and Lipponen, 2007):

که در آن: تغذیه شامل تغذیه حاصل از بارش، نفوذ از جریان‌های سطحی، آب برگشتی مزارع، نشت از شبکه توزیع آب شهری و شبکه جمع‌آوری فاضلاب می‌باشد. برداشت از منابع آب زیرزمینی نیز مقدار آب استحصالی توسط چاه، چشمه و یا قنات را نشان می‌دهد.

۷- شاخص پایداری کیفیت آب زیرزمینی

برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی سبب کاهش کیفیت و در نتیجه به هم خوردن تعادل بین آب شور و آب شیرین و پیشروی آب شور در بستر سفره‌های زیرزمینی آب شیرین می‌شود که آغازی جدی برای نمکزایی و در نهایت تخریب اراضی، کویر شدن و بیابان زایی است (نجف زاده و همکاران، ۱۳۹۴). یکی از موارد موثر در کیفیت آب شوری است که این شاخص به آن می‌پردازد (Karimirad et al., 2017b):

$$SGQ = \text{مساحت پهنه شور} / \text{مساحت کل آبخوان} \quad (۷)$$

$$DG\ (\text{درصد}) = \frac{\text{حجم بهره‌برداری از آبخوان (میلیون مترمکعب)}}{\text{بهره‌برداری از آب‌های سطحی و زیرزمینی (میلیون مترمکعب)}} \quad (۳)$$

۸- شاخص قابلیت توسعه بهره‌برداری

این شاخص قابلیت توسعه آبخوان مورد مطالعه را با رابطه۸ محاسبه می‌کند(Vrba and Lipponen, 2007):

$$GAD = \frac{\text{کل آب زیرزمینی برداشت شده (میلیون مترمکعب)}}{\text{منابع آب زیرزمینی قابل بهره‌برداری (میلیون مترمکعب)}} \quad (۸)$$

که در آن: منابع آب زیرزمینی قابل بهره‌برداری، کل میزان آبی است که با در نظر گرفتن شرایط اقتصادی، فناوری، حقوقی و زیست‌محیطی آبخوان می‌توان از آن برداشت نمود (GIWG, 2004).

۹- فشار بر آب زیرزمینی غیرتجدیدشونده

منابع آب زیرزمینی غیرتجدیدشونده منابعی هستند که در طول دوران زمین‌شناسی ذخیره شده و در دوره‌های زمانی معمول جایگزین نمی‌شوند.

(۹)

$$PNRG = \frac{\text{برداشت سالانه از منابع غیرتجدیدشونده (میلیون مترمکعب)}}{\text{کل منابع غیرتجدیدشونده آب‌های زیرزمینی (میلیون مترمکعب)}}$$

که در آن: کل منابع آب زیرزمینی غیرتجدیدشونده از تفاوت حجم آبخوان و منابع تجدیدشونده به دست می‌آید (Vrba and Lipponen, 2007).

۱۰- شاخص توان بازیابی آبخوان

این شاخص توانایی بازگشت به وضعیت نرمال آبخوان را نشان می‌دهد (Vrba and Lipponen, 2007):

$$ARP = \frac{\text{حجم استاتیک آبخوان (میلیون مترمکعب)}}{\text{تغذیه طبیعی آبخوان (میلیون مترمکعب)}} \quad (۱۰)$$

که در آن: حجم استاتیک به بخشی از آبخوان گفته می‌شود که حاوی آب غیرتجدیدشونده است.

۱۱- شاخص میرایی آبخوان

بیکی خشک (۱۳۹۰) جهت برآورد سال‌های قابل اتکا به آبخوان شاخص میرایی آبخوان را توسعه داد:

(۱۱)

$$GDR = \frac{\text{متوسط ضخامت سفره (متر)}}{\text{متوسط افت آبخوان در ده سال اخیر (متر)}} \times \frac{2}{3}$$

حدود مشخص شده برای شاخص‌های AS، FI، ARP، DG و DAG در جدول ۲ ارائه شده است.

(۶)

$$AS = \frac{\text{کل آب زیرزمینی برداشت شده (میلیون مترمکعب)}}{\text{تغذیه آب زیرزمینی (میلیون مترمکعب)}}$$

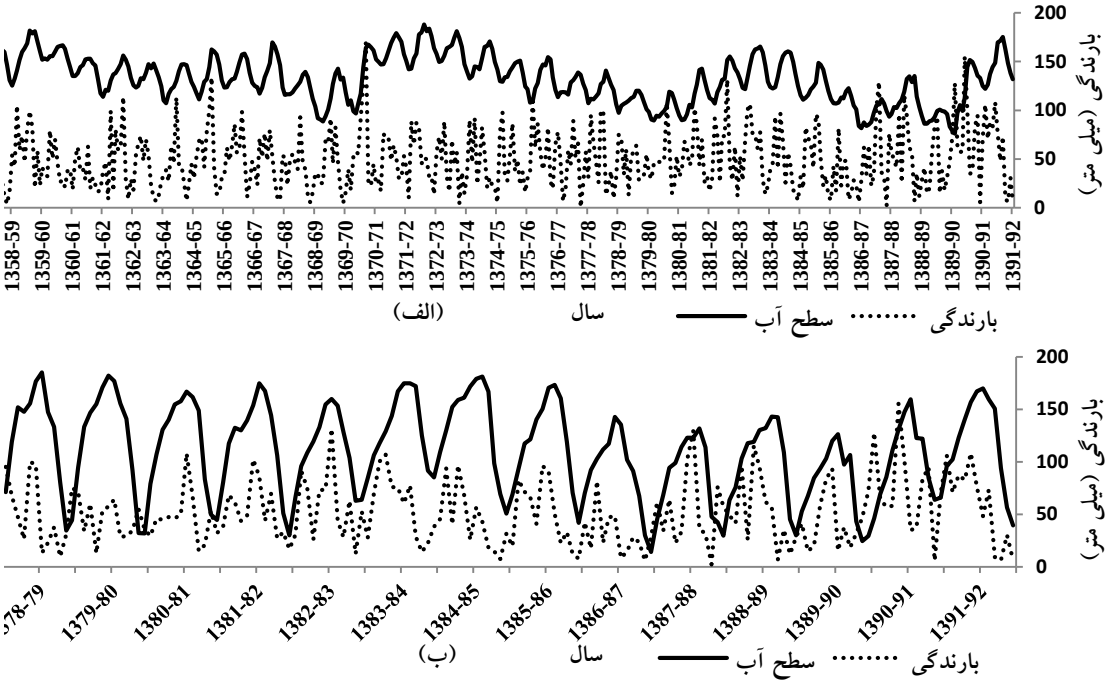
جدول (۲): حدود شاخص‌های AS، FI، ARP، DG و GAD

محدوده شاخص AS	وضعیت پایداری آبخوان	FI (مترمکعب به ازای هر نفر در سال)	شرایط	محدوده شاخص ARP	پتانسیل بازیابی آبخوان
AS < ۱	بحرانی	۱۷۰۰>	بدون تنش	ARP < ۱۰	زیاد
۱ > AS > ۰/۸	بسیار ناپایدار	۱۷۰۰-۱۰۰۰	تحت تنش	۱۰ < ARP < ۳۰	متوسط
۰/۸ > AS > ۰/۶	ناپایدار	۱۰۰۰-۵۰۰	کمبود آب	۳۰ < ARP < ۵۰	کم
۰/۶ > AS > ۰/۴	کمی پایدار	۵۰۰<	کمبود مطلق آب	ARP < ۵۰	بدون توان بازیابی
AS < ۰/۴	پایدار				

محدوده شاخص DG (درصد)	وابستگی به آب زیرزمینی	محدوده شاخص GAD (درصد)	قابلیت توسعه
G < ۲۵	زیاد	GAD < ۲۵	دارای قابلیت توسعه
۲۵ < G < ۵۰	متوسط	۲۵ < GAD < ۴۰	قابلیت توسعه محدود
۵۰ > G	کم	۴۰ > GAD	فاقد قابلیت توسعه

نتایج و بحث

نمودار سری‌های زمانی بارندگی ماهانه، سطح آب سفره آزاد و سطح پیزومتریک سفره تحت‌فشار، در شکل ۲ نشان داده شده است که هر نمودار میانگین ۱۹ سری داده ثبت شده در ایستگاه‌ها و چاه‌های مربوطه می‌باشد.



شکل (۲): نمودار تغییرات سطح آب (الف) سفره آزاد و (ب) سفره تحت‌فشار

جدول ۲- الف نتایج حاصل از آزمون ایستایی ADF را در سطح اطمینان ۹۵ درصد و ایستایی همه سری‌های زمانی را نشان می‌دهد. همچنین در این جدول نتایج آزمون من-کندال در سطح معناداری ۹۵ درصد و مقدار عددی شیب سن[1] که در صورت معنادار بودن روند سری زمانی، نشان دهنده میزان و چگونگی (صعودی یا نزولی بودن) آن است، نیز نشان داده شده است. بر این اساس، بارندگی فاقد روند معنادار می‌باشد و سطح پیزومتریک سفره تحت‌فشار با نرخ متوسط ۱۲ میلی‌متر بر ماه در حال افت است. این در حالی است که نرخ تغییرات سطح آب

[1] Sen slope

در سفره آزاد در کل دوره آماری (۳۸ سال) به طور متوسط تنها یک میلی‌متر بر ماه بوده و در طول دوره مشابه با سفره تحت‌فشار (۱۴ سال اخیر) فاقد روند می‌باشد.

جدول (۳): نتایج آزمون‌های ایستایی و روند

الف) آزمون ایستایی ADF

سری زمانی	آماره	حد آستانه	نتیجه
بارندگی	-۴/۴۱	-۳/۴۲	سری زمانی ایستا است
سطح آب سفره آزاد	-۳/۲۶	-۳/۱۳	سری زمانی ایستا است
سطح پیزومتریک سفره تحت‌فشار	-۳/۷	-۳/۴۴	سری زمانی ایستا است

	سری زمانی	P-Value	نتیجه آزمون	شیب سن
ب) آزمون من-کندال	بارندگی	۰/۱۹۸۲	سری زمانی روند ندارد	-
	سطح آب سفره آزاد	۰/۰۰۰۰	سری زمانی روند دارد	-۰/۰۰۱
	سطح پیزومتریک سفره تحت‌فشار	۰/۰۰۳	سری زمانی روند دارد	-۰/۰۱۲

مقادیر FI و RGPC به ترتیب برابر ۸۵۵ و ۵۱۲ مترمکعب بر سال برای هر نفر است که بمعنی کم‌آبی منطقه است. شاخص‌های محاسبه شده دیگر در جدول ۳ ارائه شده است. لازم به ذکر است، بر اساس بیلان دشت، در محاسبه FI منابع سطحی قابل بهره‌برداری به میزان ۶۱۰ میلیون متر مکعب لحاظ گردیده است. همچنین در محاسبه DG و DAG میزان مصرف کشاورزی از منابع آب زیرزمینی، کل مصرف کشاورزی و کل حجم بهره‌برداری از آب‌های سطحی و زیرزمینی، به ترتیب ۶۳۴، ۹۷۷ و ۱۱۹۸ میلیون متر مکعب در نظر گرفته شده است. مقدار مصرف شرب از منابع آب زیرزمینی و کل مصرف شرب نیز به ترتیب ۱۲۳ و ۱۵۷ میلیون متر مکعب است (کنکاش عمران، ۱۳۹۲).

جدول (۴): شاخص‌های وضعیت و پایداری لایه‌های آزاد و تحت‌فشار

ردیف	شاخص	آبخوان چندلایه		تفسیر
		لایه آزاد	لایه تحت‌فشار	
۱	DG(درصد)		۶۳/۳۷	وابستگی به آب زیرزمینی بیشتر از آب سطحی است
۲	DAG(درصد)		۶۴/۸۸	کشاورزی بیشتر به آب زیرزمینی وابسته است تا آب سطحی
۳	RGSD(درصد)		۷۷/۹۴	آب شرب بیشتر از آب زیرزمینی تامین می‌شود تا آب سطحی
۴	AS	۰/۸۹	۱/۰۱	لایه آزاد بسیار ناپایدار است و لایه تحت‌فشار وضعیت بدتر و بحرانی دارد
۵	SGQ(درصد)	۰/۳۲	۰	تقریباً یک سوم مساحت سفره آزاد شور شده است
۶	GAD(درصد)	۰/۳۲	۰/۲۶	در توسعه بهره‌برداری از هردو لایه آزاد و تحت‌فشار باید محدودیت‌هایی لحاظ شود
۷	PNRG(سال)	۰	۳۳۲	آب غیرتجدیدشونده سفره تحت‌فشار در سه قرن آینده به طور کامل تخلیه می‌شود
۸	ARP	۱/۸	۲/۸۲	هردو لایه به سرعت بازیابی می‌شوند
۹	GDR(سال)	۲۱۳	۱۳۸	با وجودروند فعلی، سفره آزاد کمتر ۷۵ سال پس از سفره تحت‌فشار تخلیه می‌شود

با توجه به نتایج به دست آمده، هر دو سفره ناپایدار بوده و سفره تحت‌فشار ناپایدارتر است (شاخص AS)، هر چند این شرایط تحت پوشش ذخایر آب زیرزمینی غیرتجدیدشونده موجود در آن قرار دارد. از نظر کیفیت وضعیت برعکس بوده و سفره آزاد در حال شور شدن است.لازم به ذکر است که جمعیت و اقلیم عوامل موثر بر FI است و متغیرهایی از قبیل فرهنگ و سبک زندگی را در نظر گرفته نمی‌شود و مقدار محاسبه شده میانگین بوده و مقیاس زمانی و مکانی ندارد، لذا کمبود در فصول خشک و یا در بخشی از منطقه در آن نادیده گرفته می‌شود.در منطقه مورد مطالعه وابستگی به آب زیرزمینی از آب سطحی بیشتر است (شاخص DG) و این شرایط در بخش‌های شرب و کشاورزی حاکم می‌باشد (RGSD و DAG). بر اساس شاخص GAD، طرح‌های توسعه منابع آب با در نظر گرفتن محدودیت‌های موجود در کمیت و کیفیت آب قابل اجرا است. همچنین شاخص ARP نشان‌دهنده توان بازیابی هر دو لایه، در صورت بهبود عوامل محیطی تاثیرگذار، است. برآورد شاخص‌های GDR و PNRG برای تخلیه کامل بخش غیرتجدیدشونده سفره تحت‌فشار به ترتیب یک و سه قرن است که در مقایسه با مدت زمان تشکیل آن بسیار کوتاه است.

نتیجه‌گیری

بررسی‌های کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی می‌تواند کمک شایانی در مدیریت و برنامه‌ریزی استفاده از این منابع آبی نماید (یزدانی و منصوریان، ۱۳۹۳). بررسی آبخوان چند لایه استان گلستان، بر اساس شاخص‌های مختلف، وضعیت فعلی و چشم‌انداز آینده هر یک از لایه‌های آن را از نقطه نظر پایداری نشان داد. از یازده شاخص محاسبه شده شاخص‌های FI، RGPC، DG، DAG و RGSD وضعیت فعلی

منطقه از نظر منابع آب و اهمیت اجرای اقدامات مدیریتی را تعیین کرد. شش شاخص بعدی (AS، SGQ، GAD، PNRG، ARP و GDR) وارد جزئیات بیشتری شده و جنبه‌های کمی و کیفی پایداری هر یک از لایه‌های آزاد و تحت‌فشار را مورد بررسی قرار داد. مقدار FI از میزان برآورد شده توسط Shiklomanov (2000) به عنوان متوسط غرب آسیا، بسیار کمتر است که بیانگر کم‌آب‌تر بودن استان گلستان نسبت به میانگین منطقه غرب آسیا است. بر این اساس منطقه با وضعیت کمبود آب مواجه است که به معنای وجود محدودیت در توسعه اقتصادی و ضمانت سلامت انسان می‌باشد. از سوی دیگر ناپایداری هر دو سفره آزاد و تحت‌فشار، ادامه روند بهره‌برداری فعلی از منابع آب زیرزمینی را با چالش مواجه ساخته است و ناپایدارتر بودن سفره تحت‌فشار، با توجه به شرایط ژئومورفولوژیک آبخوان، پتانسیل نشست دشت را بالا برده است. از نظر کیفیت وضعیت برعکس بوده و سفره آزاد در حال شور شدن است. البته بر طبق نتایج Karimirad et al. (2017a) سفره تحت‌فشار نیز دارای پتانسیل شور شدن می‌باشد. لازم به ذکر است وضعیت پایداری کلی آبخوان (مجموع سفره‌های آزاد و تحت‌فشار) مشابه آبخوانی است که توسط Lambán et al. (2011) (AS=۹۶/۱) ارزیابی شد. با توجه به شاخص‌ها، منطقه مورد مطالعه در مقایسه با مطالعه Shrestha and Udmale (2014) که در آن FI و RGPC به ترتیب برابر ۵۳۷، ۴۹۰ است، میزان دسترسی بیشتری به آب دارد ولی با توجه به DAG، وابستگی کشاورزی به آب زیرزمینی در این منطقه بیشتر است (۸۷/۵۲ در برابر ۶۴/۸۸) که باعث اضافه برداشت به ویژه از لایه تحت‌فشار شده و اثر آن در شاخص AS منعکس شده است (AS=۷۱/۴۶). ذخایر آب زیرزمینی غیرتجدیدشونده موجود درسفره تحت‌فشار این وضعیت را پوشانده است به طوری که کریمی راد و همکاران (۱۳۹۴) سفره تحت‌فشار را قابل اطمینان‌تر ارزیابی نمودند. در استان گلستان کشاورزی محور توسعه قرار گرفته است و وابستگی هر دو بخش شرب و کشاورزی به آب زیرزمینی (شاخص‌های RGSD و DAG)، می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که در واقع آب زیرزمینی زیربنای توسعه این استان است. تخلیه سفره و تبعات بعدی آن می‌تواند تاثیرات شدیدی بر جوامع انسانی ساکن در منطقه داشته باشد که از آن جمله می‌توان به عدم وجود آب در فصول خشک و ایجاد فروچاله‌ها اشاره کرد. در این شرایط تغییر محور توسعه اقتصادی استان از کشاورزی به بخش‌هایی که مصرف آب کمتری دارند از جمله صنعت و خدمات تغییر و اصلاح الگوی کشت قابل توصیه است.

تقدیر و تشکر

از دانشگاه تهران و شرکت آب منطقه‌ای گلستان برای فراهم نمودن امکانات و داده‌های لازم جهت انجام این تحقیق و تهیه مقالات مربوطه تشکر می‌شود.

منابع

بیکی خشک، ا. و ک. ابراهیمی. ۱۳۹۰. مدیریت آب زیرزمینی با رویکرد توسعه پایدار. پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران. ص ۸۳-۷۸ و ۹۳-۸۵.

جلیلی، خ.، ح. مرادی و ا. بزرگ حداد. ۱۳۹۵. تحلیل بیلان آب زیرزمینی مبتنی بر دیدگاه کشاورزی پایدار در دشت اسلام آباد. مجله مهندسی آبیاری و آب، سال ۷، شماره ۲۵، ص ۱۲۷-۱۱۰.

رحمتی، م.، ح. مرادی و ر. امیدی پور. ۱۳۹۳. ارزیابی تغییرات مکانی و زمانی سطح آب زیرزمینی در دشت کرمانشاه. مجله مهندسی آبیاری و آب، سال پنجم، شماره ۱۸، ص ۱۶-۱.

زارعی، ع. و م. بهرامی. ۱۳۹۵. بررسی تغییرات کمی و کیفی آب زیرزمینی دشت فسا- فارس. مجله مهندسی آبیاری و آب، سال ششم، شماره ۲۴، ص ۱۱۳-۱۰۳.

صباغ زاده، ه.، م. خلقی، ش. کاوه کار، ر. یاری، ف. زارع و س. جوادی. ۱۳۹۰. معرفی شاخص‌های آب زیرزمینی در تعیین توسعه و پایداری منابع آب. دومین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران، ۲۹-۲۸ اردیبهشت، زنجان، ایران.

فلاح، س.، م. قبادی نیا، م. شکرگزار دارابی و ش. قربانی دشتکی. ۱۳۹۱. بررسی پایداری منابع آب زیرزمینی دشت داراب استان فارس. پژوهش آب در کشاورزی، جلد ۲۶، شماره ۲، ص ۱۷۲-۱۶۱.

کریمی راد، ا.، ک. ابراهیمی و ش. عراقی نژاد. ۱۳۹۴. بررسی اثر نوسانات اقلیمی بر سفره‌های آب زیرزمینی چندلایه (مطالعه موردی: دشت گرگان). مدیریت آب و آبیاری، دوره ۵، شماره ۲، ص ۲۷۵-۲۶۱.

مصطفی زاده، ر. و و. شیخ. ۱۳۹۰. ارزیابی تراکم شبکه باران‌سنجی استان گلستان با استفاده از روش همبستگی مکانی. پژوهش‌های آبخیزداری، شماره ۹۳، ص ۸۷-۷۹.

مهندسین مشاور کنکاش عمران. ۱۳۸۸. بهنگام سازی تلفیق مطالعات منابع آب حوزه ی آبریز رودخانه‌های قره سو و گرگان. دفتر مطالعات پایه منابع آب.

مهندسین مشاور کنکاش عمران. ۱۳۹۲. بیلان آب منابع آب محدوده‌های مطالعاتی حوزه آبریز قره سو و گرگان. دفتر مطالعات پایه منابع آب.

نجف زاده، ه.، غ. زهتابیان، ح. خسروی و ع. گلکاران. ۱۳۹۴. تأثیر عوامل اقلیمی و زمین شناسی بر کمّیت و کیفیت منابع آب زیرزمینی دشت مه ولات. مجله اکوهیدرولوژی، دوره ۲، شماره ۳، ص ۳۳۶-۳۲۵.

یزدانی، و. و ح. منصوریان. ۱۳۹۳. پهنه‌بندی پتانسیل بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های کمی و کیفی آبخوان دشت نیشابور. مجله مهندسی آبیاری و آب، سال ۴، شماره ۱۵، ص ۱۳۲-۱۱۸.

Anbazhagan S. and A. Jothibasu. 2016. Groundwater sustainability indicators in parts of Tiruppur and Coimbatore districts, Tamil Nadu. Geological Society of India, 87(2): 161-168.

Dickey D. A. and W. A. Fuller. 1979. Distribution of the estimators for autoregressive time series witha unit root. Am Statis Assoc, 74: 423-431.

Falkenmark M. 1989. The massive water scarcity threatening Africa-why isn't it being addressed. Ambio, 18(2): 112-118.

Food and Agriculture Organization. 2003. Review of world water resources by country. Water Reports, 23p.

Groundwater Indicators Working Group. 2004. Development of groundwater indicators for second edition of the world Water Resources. United Nations Environmental, Scientific and Cultural Organization, Paris.

Karimirad I., K. Ebrahimi and S. Araghinejad. 2017a. Impact of land-use change on a multilayer aquifer in south-eastern coast of Caspian Sea. 10th World Congress on Water Resources and Environment, July 5-9, Athens, Greece.

Karimirad I., K. Ebrahimi and S. Araghinejad. 2017b. Evaluation of groundwater sustainability in a multilayer aquifer. 37th IAHR (International Association of Hydraulic Engineering and Research) World Congress, August 14-18, Kuala Lumpur, Malaysia.

Koohestani N., H. M. Meftah and A. Dehghani. 2013. Numerical simulation of groundwater level using MODFLOW software (a case study: Narmab watershed, Golestan province). Int J Advanced Biological and Biomedical Research, 1(8): 858-873.

Lambán L. J., S. Martos, M. Rodríguez-Rodríguez and J. C. Rubio. 2011. Application of groundwater sustainability indicators to the carbonate aquifer of the Sierra de Becerrero (Southern Spain). Environmental Earth Sciences, 64(7): 1835-1848.

Mann H. B. 1945. Nonparametric tests against trend. Econometrica. The Econometric Society, 245-259.

Shiklomanov A. 2000. Appraisal and assessment of world water resources. Water International, 25(1): 11-32.

Shrestha S. and P. Udmale. 2014. Evaluation of sustainability of groundwater resources in a semi-arid region of the Maharashtra state of India. Int J Water Resources and Environmental Engineering, 6(7): 203-211.

Udmale, P., S. Shrestha, Y. Ichikawa and S. Manandhar. 2014. Assessing groundwater resource and its sustainability in drought prone area of India. J Japan Society of Civil Engineers, 70(4): I_235-I_240.

Vrba J., R. Hirata, J. Girman, N. Haie, A. Lipponen, T. Shah and B. Wallin. 2007. Groundwater resources sustainability indicators. United Nations Environmental, Scientific and Cultural Organization, Paris.

Vrba J. and A. Lipponen. 2007. Groundwater resource sustainability indicators. Groundwater Indicators Working Group.

Evaluation of Sustainability of Groundwater development in a Multilayer Aquifer (case study: Aquifer of Golestan province)

Iman Karimirad[1] Kumars Ebrahimi[2] and Shahab Araghinejad[3]

ABSTRACT

Evaluation of a system needs a combination of indicators that can show their current situation and future. Multilayer aquifers are more complicated due to different recharge and discharge processes of each layer. This paper aims to evaluate sustainability of phreatic and confined layers of an alluvial aquifer in Golestan province. The relevant data includes monthly precipitation of 19 rain gauges, groundwater level of the phreatic layer in 19 observational wells and piezometric level of 19 wells in the confined layer. In this paper combination of eleven indices that selected according to available data in the region, is used to assess sustainability. Results show in spite of detecting no significant trend in the precipitation data, there is descending trend in the water table of phreatic layer and piezometric level of confined one. Aquifer sustainability index of phreatic and confined layers are 0.89 and 1.01, respectively, that means unsustainability of both layers and worse condition of confined layer. Of course unsustainability of the confined layer has been covered by existed non-renewable groundwater resources. According to groundwater abstraction development index equal to 0.26, implementation of water resources development plans is allowed with considering limitations in terms of water quantity and quality. Also 2.82 as the aquifer recovery potential index revealed if driver factors change toward providing sustainable conditions, both layers can be recovered soon. It can be concluded that the region is facing water scarcity that is a limitation to economic development and human health and well-being.

Keywords: **Confined Aquifer, Falkenmark, Golestan Province, Groundwater, Phreatic Aquifer, Sustainability indices**

[1] Ph.D Student, Irrigation & Rehabilitation Group, University of Tehran, Karaj, Iran
Emial: IKarimirad@ut.ac.ir
[2]Professor, Department of Irrigation and Reproduction, University of Tehran, Karaj, Iran
[3] Associate Professor, Department of Irrigation and Reproduction, University of Tehran, Karaj, Iran, Araghinejad@ut.ac.ir