2019, Vol.6, No.1, Pages 67 to 76
Journal of Water and Sustainable Development

سال ششم، شماره ۱، ۱۳۹۸، صفحات ۶۷ تا ۷۶
نشریه آب و توسعه پایدار

Article Type: Conceptual

نوع مقاله: مفهومی

Deep Groundwater Resources: Characteristics and Constraints

A. Kavousi Heidari[1*], R. Roozbahani[2], M. Eftekhari[3]

1,2,3- Research Assistant Prof., Water Research Institute, Ministry of Energy, Tehran, Iran.

*(Corresponding Author Email: : a.kavousi@wri.ac.ir)

Received: 16-01-2019
Accepted: 03-03-2019

Abstract

As a consequence of the increase in water demand due to population growth, and decrease in available conventional water resources because of climate change, unconventional water resources, specifically deep groundwater resources, have become the focus of attention. Due to the lack of required information, reconnaissance and exploration investigations of the resources, in order to demonstrate the country assets in this regard, was under taken by governmental authorities. Currently, two separate projects, namely “Potentiality of favorable zones for deep groundwater, at country scale” and “Exploration of Sistan deep groundwater”, are in progress. The focus of the aforementioned projects are mainly on the discovery of deep aquifers and assessments of the relevant exploitable water volumes. Focusing on other aspects of the resources, such as social, environmental, renewability, and water quality issues must also be taken into account. This paper gives an overview of deep groundwater characteristic, as well as exploitation constraints and considerations, reviewing the relevant research worldwide.

Keywords: Megawatershed, Non-renewability, Environmental hazards, Hydrochemistry.

منابع آب زیرزمینی ژرف: ویژگی‌ها و محدودیت‌ها

علیرضا کاوسی حیدری[1*]، رضا روزبهانی[2]، مرتضی افتخاری[3]

۱، ۲ و ۳- استادیار پژوهشی، موسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران.

*(نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: : a.kavousi@wri.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۰/۲۶
تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۲/۱۲

چکیده

افزایش تقاضای آب به دلیل رشد جمعیت و کاهش منابع آب متعارف در دسترس به دلیل تغییرات اقلیمی، موجب شده منابع آب غیرمتعارف کشور و به‌طور ویژه منابع آب زیرزمینی ژرف در کانون توجهات قرار گیرند. عدم وجود اطلاعات کافی درباره منابع آب ژرف موجب شد انجام مطالعات شناسایی و اکتشافی این منابع با هدف تبیین وضعیت کشور از نظر وجود آن‌ها در دستور کار دستگاه‌های مختلف حاکمیتی قرار گیرد. در حال حاضر دو مطالعه اصلی مجزا با عناوین "پهنه‌بندی مناطق مستعد آب ژرف کشور" و "اکتشاف منابع آب ژرف سیستان" در این زمینه در حال انجام است که در مطالعات مذکور بیشتر برروی شناسایی موقعیت آبخوان‌های ژرف و حجم آب قابل بهره‌برداری از آن‌ها تمرکز شده است. باتوجه‌به وجود تجارب جهانی در زمینه بهره‌برداری از منابع آب ژرف، ضرورت دارد سایر جنبه‌های مهم مربوط به این منابع مانند مسائل اجتماعی، زیست‌محیطی، تجدیدپذیری، کیفیت آب و غیره توجه جدی شود. در این مقاله تحقیقات انجام‌شده در سایر مناطق جهان بررسی و ویژگی‌های منابع آب ژرف، محدودیت‌ها و ملاحظات حاکم بر بهره‌برداری از این منابع آبی تشریح شده است.

واژه‌های کلیدی: ابرحوضه، تجدیدناپذیری، مخاطرات زیست‌محیطی، هیدروشیمی.

DOI: 10.22067/jwsd.v6i1.78601

مقدمه

شناسایی، اکتشاف و بهره‌برداری از منابع آب ژرف در چند دهه اخیر مورد توجه بسیاري از کشورهای واقع در مناطق خشک و فراخشک جهان به ویژه در خاورمیانه و شمال آفریقا بوده است. در این مناطق که عمدتاً دسترسی به منابع آب سطحی و زیرزمینی کم‌عمق فراهم نیست، آب ژرف بخش قابل توجهي از مصارف آب (به‌ویژه در بخش شرب) را تامین نموده و فرصتی برای ارتقا رفاه اجتماعی و توسعه اقتصادی در شرایط کمبود شدید آب را فراهم نموده است. بررسی‌های انجام‌شده در کشورهای بهره‌بردار منابع آب ژرف نشان می‌دهد اگر توسعه بهره‌برداری از این منابع بر اساس معیارهای خاصی صورت پذیرد ریسک‌های بهره‌برداری (حتی از انواع تجدیدناپذیر) این منابع قابل مدیریت بوده و جامعه می‌تواند به‌صورت پایدار از آن‌ها بهره‌مند شود (Foster و Louks، ۲۰۰۶). شناخت همه جوانب مربوط به منابع آب ژرف اعم از توسعه روش‌شناسی صحیح برای شناسایی و اکتشاف و تبیین مسائل زیست‌محیطی، اقتصادی، اجتماعی و حقوقی مترتب بر بهره‌برداری و سپس در نظرگیری دقیق آن‌ها اهمیت زیادی دارد.

اگرچه موضوع استفاده از منابع آب ژرف در سال‌های اخیر به‌طور جدی در کشور مطرح شده اما ابعاد مختلف این منابع آب برای جامعه علمی و مدیریتی کشور به میزان لازم و کافی مورد بحث و بررسی علمی قرار نگرفته است. به نظر می‌رسد عمده اطلاعات و موضوعات مطروحه در این زمینه برخواسته از فضاهای هیجانی ژورنالیستی و سیاسی بوده و برخی موضوعات شاید مهمتر از بهره‌برداری این منابع مانند مسائل زیست‌محیطی، حقوقی، اجتماعی و غیره که ضامن استفاده پایدار از آن‌ها می‌باشد مورد غفلت قرار گرفته است. در این مقاله تلاش شده است ضمن ارائه ویژگی‌ها و مشخصه‌های این منابع آبی محدودیت‌ها و ملاحظات حاکم بر بهره‌برداری از آن‌ها ارائه شود.

ویژگی‌های منابع آب ژرف

منابع آب ژرف دارای ویژگی‌های مشخصی هستند که بر مبنای آن‌ها این منابع از سایر منابع آب زیرزمینی تفکیک می‌شود. در این بخش از مقاله به تشریح ویژگی‌های اصلی منابع آب ژرف در جنبه‌های مختلف پرداخته شده است.

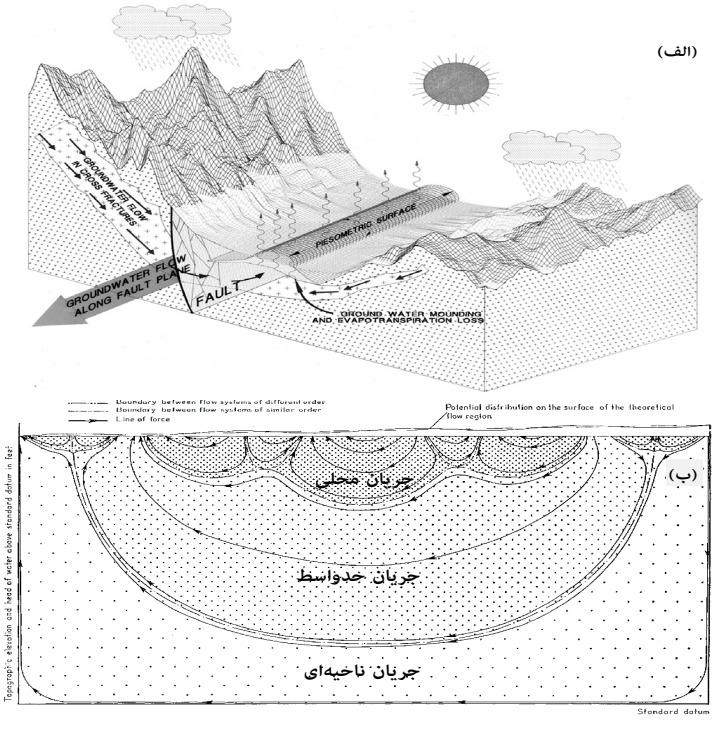
۱- ژرفا

عمق قرارگیري منابع آب ژرف به شرایط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکي منطقه وابسته است لذا حد ژرفای مطلقی بین منابع آب زیرزمینی معمول (آزاد و محبوس) و ژرف نمی‌توان در نظر گرفت. در یک تعریف ساده منابع آب ژرف را می‌توان منابع آب زیرزمینی (غالباً محبوسی) در نظر گرفت که در اعماق زیرین منابع آب زیرزمینی کشف شده و در حال حاضر از آن استفاده می‌شود. بر این اساس در نقاط مختلف جهان اعماق متفاوتی برای عمق تشکیل و قرارگیری آبخوان‌های ژرف گزارش شده است. در بنگلادش به دلیل بالا بودن سطح آب زیرزمیني منابع آب موجود ژرفای بیش از ۱۵۰ متر جز منابع آب ژرف در نظر گرفته شده است (Hoque و Burgess، ۲۰۱۲)؛ ژرفای این منابع در نواحی خشک خاورمیانه (مانند عربستان و اردن) ۱۲۰۰ متر و در شمال آفریقا (مانند مصر، لیبي، الجزایر و تونس) بین ۸۰۰ تا ۱۶۰۰ متر گزارش شده است (Bisson و Lehr، ۲۰۰۴).

۲- ابرحوضه و جریان ناحیه‌ای

واژه ابرحوضه[1] یک واژه کلیدی در تبیین مدل مفهومی آبخوان‌های ژرف است. طبق تعریف ابرحوضه عبارت است از آبخوان‌های بسیارعمیق متشکل از رسوبات گراولی با سنگ مادر درز و شکافی واجد یا فاقد ساختارهای رسوبی که از نظر تغذیه، ذخیره، انتقال و به دام افتادن آب‌های زیرزمینی ژرف به‌صورت یکپارچه عمل می‌نماید (Bisson، ۲۰۰۵). اولین‌بار بیسون در سال ۱۹۸۷ واژه ابرحوضه را برای تعریف منابع آب ژرف غیرفسیلی به‌کار برد (Bisson و Lehr، ۲۰۰۴). در مدل مفهومی ارائه شده توسط بیسون ارتفاعات یک ابرحوضه در تغذیه آبخوان ژرف نقش دارند و جریان آب زیرزمینی در آبخوان می‌تواند در راستای شکستگی‌ها و گسل‌های مهم به‌وجود آید که در شکل (۱-الف) ارائه شده است (Bisson، ۱۹۹۲). مرزهای یک ابرحوضه اغلب با مرزهای حوضه‌های آبریز آب‌های سطحی همخوانی ندارند و ابرحوضه می‌تواند در ارتفاعات چندین حوضه آبریز سطحی تغذیه شود (Bisson، ۲۰۰۵). وجود ابرحوضه‌ها در آفریقا، آسیا، اقیانوسیه، خاورمیانه، اروپا، آمریکای شمالی، آمریکای جنوبی و کارائیب عمدتاً توسط بیسون و یا همکاران ایشان گزارش شده است (Bisson، ۱۹۹۲؛ Bisson، ۲۰۰۲؛ Bisson و Lehr، ۲۰۰۴؛ Bisson، ۲۰۰۵).

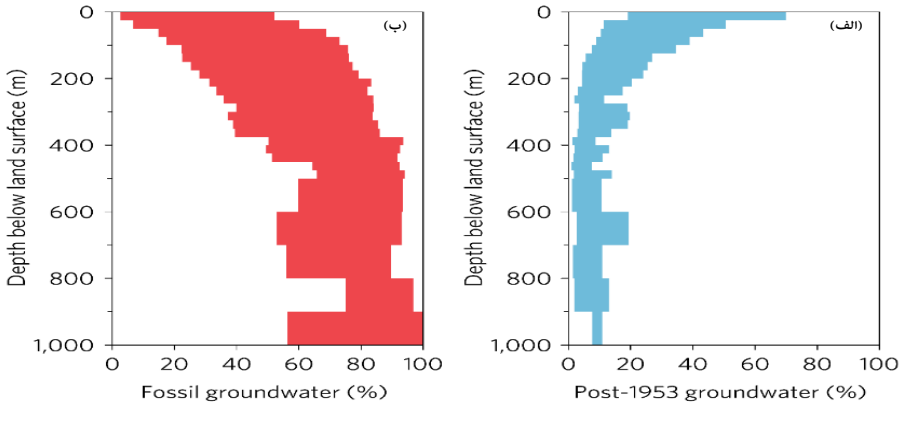
ابرحوضه به لحاظ مفهوم شباهت زیادی به جریان ناحیه‌ای در مدل مفهومی جریان آب زیرزمینی توث (Tóth، ۱۹۶۳) دارد. براساس این مدل مفهومی که در علم هیدروژئولوژی بیش از نیم‌قرن قدمت دارد سه نوع زیرسامانه جریان محلی، میانی و ناحیه‌ای[2] در یک سامانه آب زیرزمینی در نظر گرفته شده به‌طوری‌که جریان ناحیه‌ای آب زیرزمینی بیانگر مسیرهای حرکت آب در بیشترین اعماق آبخوان است. در زیرسامانه جریان ناحیه‌ای خطوط جریان، به‌صورت مشابه با مفهوم ابرحوضه ارائه شده توسط بیسون می‌توانند از مرزهای حوضه‌های آبریز سطحی تبعیت ننموده و در برخی موارد آن‌ها را قطع نمایند (شکل ۱-ب).



شکل ۱- (الف) مدل مفهومی ابرحوضه (Bisson، ۱۹۹۲)، (ب) زیرسامانه‌های جریان محلی، حد واسط و ناحیه‌ای در مدل مفهومی جریان آب زیرزمینی توث (Tóth، ۱۹۶۳)؛ فاصله محل تغذیه-تخلیه و ژرفای گردش جریان در زیرسامانه جریان ناحیه‌ای زیاد بوده و چندین زیرسامانه جریان محلی و حتی حدواسط را در برمی‌گیرد.

۳- تجدیدپذیری، زمان ماندگاری و منشأ

شیب هیدرولیکی آب زیرزمینی در آبخوان‌های ژرف اغلب بسیار کم و نزدیک به صفر است؛ در نتیجه سرعت جریان آب زیرزمینی در این آبخوان‌ها اغلب بسیار اندک و در حد چند متر در سال گزارش شده است (جدول ۱). از طرفی مسیر گردش آب زیرزمینی در یک آبخوان ژرف به‌گونه‌ای است که فاصله محل تغذیه تا تخلیه می‌تواند بالغ بر صدها کیلومتر باشد. باتوجه‌به سرعت جریان کم و طولانی بودن مسیر جریان، متوسط زمان ماندگاری آب زیرزمینی[۳] در این منابع اغلب بسیار زیاد است. Jasechko و همکاران (۲۰۱۷) مقادیر ایزوتوپی (پایدار و ناپایدار) کربن (n=6455) و تریتیوم (n=5661) چاه‌ها در نقاط مختلف جهان را بررسی کردند و نشان دادند زمان ماندگاری آب زیرزمینی با افزایش عمق به شدت افزایش می‌یابد. بر مبنای نتایج آن‌ها بیش از ۵۰ درصد کل چاه‌هایی که عمق بیش از ۲۵۰ متر دارند دارای مؤلفه آبی غالب با زمان ماندگاری قبل از دوره هولوسن (۱۲۰۰۰ سال قبل) هستند (شکل ۲). بررسی‌ها نشان می‌دهد متوسط زمان ماندگاری آب زیرزمینی در آبخوان‌های ژرف اغلب بسیار طولانی است و حتی به بیش از یک‌میلیون سال می‌رسد (جدول ۱).



شکل ۲- تغییرات مولفه آبی دارای زمان ماندگاری (الف) جدیدتر از سال ۱۹۵۳، یعنی با قدمت کمتر از ۶۵ سال و (ب) قدیمی‌تر از دوره هولوسن، یعنی با قدمت بیش از ۱۲۰۰۰ سال، نسبت به عمق (Jasechko و همکاران، ۲۰۱۷)

جدول ۱- متوسط زمان ماندگاری و سرعت جریان آب زیرزمینی در برخی آبخوان‌های ژرف معروف جهان

نام آبخوان ژرف*	کشور(ها)	سرعت جریان (متر بر سال)		متوسط زمان ماندگاری		مرجع
		روش ایزوتوپی	روش مدل‌سازی	مدت (سال) *	روش سن‌سنجی	
Great Artesian Basin	استرالیا	۰/۱۳۳ تا ۰/۴۳۳	-	۷۰۰،۰۰۰ تا ۱،۰۶۰،۰۰۰	^{4}He و ^{36}Cl	Mahara و همکاران (۲۰۰۹)
Continental Intercalaire	الجزایر و تونس	۳ تا ۶	۲۰ تا ۴۰	۲۵،۰۰۰ تا ۳۰،۰۰۰	^{14}C و ^{13}C	Edmunds و همکاران (۲۰۰۳)
		-	-	بیش از ۵۰۰،۰۰۰	^{36}Cl	Petersen و همکاران (۲۰۱۸)
Eocene Sands	فرانسه	-	۵	۲۰،۰۰۰ تا ۲۵،۰۰۰	^{14}C	André و همکاران (۲۰۰۵)
Sherwood Sandstone	انگلستان	۰/۶	۰/۲	کمتر از ۱۰۰،۰۰۰	^{14}C	Edmunds و Smedley (۲۰۰۰)؛ Bath و همکاران (۱۹۸۷)
Bangal Aquifer	بنگلادش	-	۴/۴	۳،۰۰۰ تا ۹،۰۰۰	^{14}C	Hoque و Burgess(۲۰۱۲)

* با توجه به گسترش فضایی زیاد آبخوان‌های ژرف و نوع روش سن‌سنجی، متوسط زمان ماندگاری آب زیرزمینی برآورد شده می‌تواند متفاوت باشد. به‌طور کلی هرچه نمونه اخذ شده از محل‌های تغذیه اصلی آبخوان فاصله بیشتری داشته باشند، متوسط زمان ماندگاری برآوردی بیشتر خواهد بود.

منابع آب زیرزمینی از دیدگاه عامه اغلب تجدیدپذیر[۴] در نظر گرفته می‌شوند؛ اما در برخی موارد متوسط زمان ماندگاری آب در این منابع به‌ویژه در ژرفای زیاد زمین، صدها و هزاران سال بوده که در مقایسه با دوره زمانی فعالیت‌های بشر به‌ویژه در ارتباط با برنامه‌ریزی منابع آب بسیار طولانی است. براساس تعریف پیشنهادی یونسکو در مطالعه منابع آب ژرف اغلب استناد می‌شود منابع آب زیرزمینی که دوره تجدید آن‌ها بیش از ۵۰۰ سال باشد تجدیدناپذیر[۵] در نظر گرفته می‌شوند. به‌عبارت‌دیگر در یک آبخوان تجدیدناپذیر نرخ تجدیدپذیری[۶] کمتر از ۰/۲ درصد در سال منظور شده است (Foster و Loucks، ۲۰۰۶). بر این اساس منابع آب ژرف تجدیدپذیر را می‌توان دسته‌ای از منابع آب زیرزمینی در نظر گرفت که زیر آبخوان‌های کم‌عمق در حال برداشت کنونی و در ژرفای زمین قرار گرفته است. این منابع دارای منشأ آب جوی هستند و در چرخه هیدرولوژیکی با نرخ تجدیدپذیری اندک (که باید بیشتر از ۰/۲ درصد در سال باشد) مشارکت دارند. لازم به ذکر است طبق تعریف یونسکو بیشتر منابع آب ژرف کشف شده جهان در دسته منابع آبی تجدیدناپذیر قرار دارند و این منابع را باتوجه‌به منشأ آن‌ها می‌توان به دو گروه کلی دسته‌بندی نمود:

الف- منابع آب ژرف تجدیدناپذیر فسیلی یا آب سازندی[۷] که در زمان رسوب‌گذاری در میان فضاهای خالی لایه‌های رسوبی به دام افتاده و به وسیله ساختارهای زمین‌شناسی محبوس شده است. کیفیت آب این منابع اغلب از نظر شرب و حتی کشاورزی نامطلوب است.

ب- منابع آب ژرف تجدیدناپذیر دارای منشأ بارش‌های جوی اقلیم دیرینه[۸] با متوسط زمان ماندگاری بیش از ۵۰۰ سال)، باتوجه‌به شرایط اقلیمی محلی در اعصار گذشته در واحدهای رسوبی و یا سنگی (رسوبی، آذرین و یا دگرگونی) تغذیه و به وسیله ساختارهای زمین‌شناسی محبوس شده است[۹]. بیشتر منابع آب ژرف کشف‌شده در دنیا جز این گروه می‌باشند.

تعیین متوسط زمان ماندگاری و منشأ منابع آب ژرف با سنجش ایزوتوپ‌های پایدار و ناپایدار (اکسیژن، هیدروژن، کربن و غیره) و مقادیر و نسبت‌های یونی انجام می‌شود (Edmunds و همکاران، ۲۰۰۳؛ Guendouz و همکاران، ۲۰۰۳؛ André و همکاران، ۲۰۰۵؛ Moussa و همکاران، ۲۰۱۱؛ Hoque و Burgess، ۲۰۱۲؛ Novikov و Sukhorukova، ۲۰۱۵؛ Petersen و همکاران، ۲۰۱۸). الگوی پیچیده جریان آب زیرزمینی در آبخوان‌های ژرف توسط ساختارهای زمین‌شناسی کنترل می‌شود و تعیین منشأ آب‌های زیرزمینی مسیرهای اصلی جریان و چگونگی اختلاط این آب‌ها را با مشکل مواجه می‌نماید (André و همکاران، ۲۰۰۵).

۴- ابعاد

حجم ذخیره، گسترش فضایی و ضخامت اشباع منابع آب ژرف کشف‌شده در جهان قابل توجه است؛ به‌طوری‌که برای برخی از آبخوان‌های ژرف گسترش فضایی بیش از یک‌میلیون کیلومترمربع، ضخامت اشباع چند صد تا چند هزار متر و حجم ذخیره آبی در حد ده‌ها هزار میلیارد مترمکعب گزارش شده است (جدول ۲). مساحت زیاد و ضخیم بودن لایه اشباع برخی آبخوان‌های ژرف موجب شده حجم ذخیره قابل بهره‌برداری این آبخوان‌ها بسیار قابل توجه برآورد شود (جدول ۲). آبخوان ژرف ماسه‌سنگی تجدیدناپذیر Nubian وسیع‌ترین آبخوان شناخته شده جهان با وسعت ۲/۲۰۰ میلیون کیلومترمربع بخش وسیعی از کشورهای مصر، لیبی، سودان و چاد، که میزان بارش کنونی آن‌ها کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر در سال است را پوشش می‌دهد (Foster و Loucks، ۲۰۰۶). در جدول (۲) مشخصات ابعادی برخی آبخوان‌های ژرف مهم کشف شده جهان ارائه شده است.

جدول ۲- ابعاد برخی منابع آب ژرف بزرگ جهان، که اغلب به‌صورت تجدیدناپذیر هستند
(Foster و Loucks، ۲۰۰۶؛ Margat و Van der Gun، ۲۰۱۳؛ McGuire، ۲۰۱۷)

ردیف	نام آبخوان	کشور(ها)	وسعت (Km^2)	حداکثر ضخامت آبخوان (m)	ذخیره آبی قابل بهره‌برداری (Mm^3)	بهره‌برداری کنونی (Mm^3/a)
۱	Nubian Sandstone	مصر، لیبی، سودان و چاد	۲،۲۰۰،۰۰۰	۳،۵۰۰	۱۴،۴۶۰،۰۰۰	۲،۱۷۰
۲	Great Artesian Basin	استرالیا	۱،۷۰۰،۰۰۰	۳،۰۰۰	۱۷۰،۰۰۰	۶۰۰
۳	Amazon Basin	برزیل، کلمبیا، پرو و بولیوی	۱،۵۰۰،۰۰۰	۷،۰۰۰	۳۲،۵۰۰،۰۰۰ *	؟
۴	Guaraní Aquifer System	برزیل، آرژانتین، پاراگوئه و اروگوئه	۱،۱۹۵،۰۰۰	۸۰۰	۵۷،۰۰۰،۰۰۰ *	؟
۵	North Western Sahara	الجزایر، لیبی و تونس	۱،۰۰۰،۰۰۰	۱،۶۰۰	۱،۲۸۰،۰۰۰	۲،۵۶۰
۶	Maranhão Basin	برزیل	۷۰۰،۰۰۰	۸،۰۰۰	۱۷،۵۰۰،۰۰۰ *	؟
۷	Chad Basin	نیجر، نیجریه، چاد، سودان، کامرون و لیبی	۶۰۰،۰۰۰	۷،۰۰۰	۱۷۰ تا ۳۵۰،۰۰۰	۲۵۰
۸	Iullemeden Multilayer Continental	مالی، نیجر و نیجریه	۵۰۰،۰۰۰	۱،۵۰۰	۲۵۰،۰۰۰ تا ۲،۰۰۰،۰۰۰	۲۲۵
۹	(Ogallala (High Plains	ایالات متحده آمریکا (هشت ایالت)	۴۵۰،۰۰۰	۳۶۶	۳،۶۷۶،۰۰۰۰ تا ۴،۰۰۹،۰۰۰	۲۶،۹۰۰
۱۰	Murzuk–Djado Basin	الجزایر، لیبی و نیجر	۴۵۰،۰۰۰	۲،۵۰۰	۶۰ تا ۸۰،۰۰۰	۱،۷۵۰
۱۱	Sudd Basin–Umm Ruwaba	سودان و اتیوپی	۳۶۵،۰۰۰	۳،۰۰۰	۱۱۰،۰۰۰ *	؟
۱۲	Various	عربستان، بحرین، قطر و امارات	۲۲۵،۰۰۰ تا ۲۵۰،۰۰۰	۶،۵۰۰	۵۰۰،۰۰۰ تا ۲،۸۱۵،۰۰۰	۱۳،۷۹۰
۱۳	Maastrichtian	موریتانی، سنگال و گامبیا	۲۰۰،۰۰۰ تا ۳۰۰،۰۰۰	۵۰۰	۴۸۰ تا ۵۸۰،۰۰۰	۲۶۵
۱۴	Paris Basin	فرانسه	۱۹۰،۰۰۰	۳،۲۰۰	۵۰۰،۰۰۰ تا ۱۰۰۰،۰۰۰	۷۰
۱۵	Central Kalahari Karroo Sand.	بوتسوانا	۸۰،۰۰۰	۷،۰۰۰	۸۶،۰۰۰	۲،۸۹۰
۱۶	West Siberian Artesian Basin	روسیه	۳،۲۰۰	۶،۰۰۰	۱،۰۰۰،۰۰۰،۰۰۰ *	؟

* کل حجم ذخیره آب تئوریک

۵- کیفیت

ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی حاصل برآیند کلیه عواملی است که از زمان تراکم آب در جو، عبور آب از زون‌های غیراشباع و اشباع تا لحظه خروج آب از منطقه تخلیه آبخوان عمل می‌نمایند. عوامل متعددی همچون ترکیب شیمیایی آب بارش، جنس زمین (بدنه آبخوان)، اختلاط، زمان ماندگاری آب زیرزمینی، تبخیر و شرایط فیزیکوشیمیایی محیطی بر کیفیت منابع آب زیرزمینی مؤثر است، در ادامه اثرات این عوامل بر کیفیت منابع آب ژرف به اختصار تشریح می‌شود (Freeze و Cherry، ۱۹۷۹؛ Drever، ۱۹۹۷؛ Domenico و Schwartz، ۱۹۹۷).

الف- ترکیب شیمیایی آب بارش: مواد محلول در آب بارش می‌تواند به آب زیرزمینی منتقل شود و میزان مواد محلول در آن را افزایش دهد. همچنین در صورت بالا بودن اسیدیته (یعنی اسیدی بودن بارش)، قابلیت انحلال آب بارش بیشتر خواهد بود و در نتیجه مواد بیشتری در مسیر حرکت آب در زیرزمین حل خواهد شد. اثر این عامل بر کیفیت آب زیرزمینی به‌ویژه از نوع ژرف قابل اغماض است.

ب- تبخیر: پدیده تبخیر موجب افزایش غلظت مواد محلول در آب باقیمانده می‌شود. این پدیده بر منابع آب جوی، سطحی و زیرزمینی (حداکثر تا عمق یکی دو متر) اثرگذار است؛ بنابراین اثر آن بر کیفیت آب‌های زیرزمینی ژرف قابل توجه نخواهد بود.

ج- لیتولوژی: جنس واحدهای زمین‌شناسی در مسیر جریان زیرسطحی (در منطقه اشباع و غیراشباع) را می‌توان مهم‌ترین عامل مؤثر بر ترکیب هیدروشیمیایی آب زیرزمینی (ژرف یا کم‌عمق) دانست. میزان مواد محلول آب زیرزمینی در تماس با ماسه‌سنگ‌های سیلیسی با درجه خلوص بالا و اغلب سنگ‌های آذرین و دگرگونی چندان افزایش نمی‌یابد؛ زیرا کانی‌هایی که قابلیت انحلال زیاد دارند، در سنگ‌های مزبور کمتر یافت می‌شود. به‌علت وجود کانی‌های با قابلیت انحلال زیاد (نظیر ژیپس و انواع کانی‌های تبخیری) میزان مواد محلول آب در تماس با برخی واحدهای زمین‌شناسی (اغلب رسوبی) می‌تواند افزایش یابد، به‌طوری‌که میزان مواد محلول در منابع آب زیرزمینی (کم‌عمق یا ژرف) می‌تواند بیشتر از آب دریا باشد.

د- اختلاط: ترکیب آب‌های زیرزمینی که منشأهای مختلفی دارند، علاوه‌بر ایجاد یک ترکیب شیمیایی جدید برای آب حاصله (بر مبنای نسبت اختلاط)، می‌تواند منجر به افزایش قابلیت انحلال آب زیرزمینی شده و در نتیجه افزایش مواد محلول آب را به همراه داشته باشد. پدیده اختلاط می‌تواند ترکیب شیمیایی آب‌های زیرزمینی ژرف را به شدت تحت تأثیر قرار دهد.

و- زمان ماندگاری: طولانی بودن مسیر تغذیه-تخلیه و کند بودن سرعت جریان آب زیرزمینی موجب طولانی شدن زمان ماندگاری آب در محیط زیرزمینی می‌شود. با افزایش زمان ماندگاری به‌دلیل افزایش مدت‌زمان تماس آب با رسوبات و سنگ‌ها زمان کافی برای انجام فعل و انفعالات شیمیایی و به اشباع رسیدن آب نسبت به یون‌های مختلف وجود دارد. بنابراین به‌عنوان یک قاعده کلی غلظت مواد محلول آب‌های زیرزمینی قدیمی نسبت به آب زیرزمینی جدید اغلب بیشتر است. اثر این عامل بر افزایش میزان مواد محلول در آب‌های زیرزمینی به‌گونه‌ای است که در یک آبخوان ژرف مناطق کم‌عمق‌تر با زمان ماندگاری کمتر دارای مواد محلول کمتری است (Edmunds و Smedley، ۲۰۰۰).

منابع آب ژرف با زمان ماندگاری زیاد (اغلب تجدیدناپذیر) در اثر تماس طولانی‌مدت با بدنه آبخوان ممکن است باعث کاهش شدید کیفیت شوند. به‌طوری‌که غلظت برخی یون‌ها در این آب‌ها می‌تواند بسیار بیش از حد مجاز شده و حتی مواد رادیواکتیو و برخی عناصر و فلزات سنگین که قابلیت انحلال پایینی دارند به میزان زیاد در آن‌ها یافت شود. غلظت بالای یون‌هایی از قبیل فلوئور، لیتیوم، وانادیم، آهن، منگنز، سیلیس، آرسنیک، کروم، استرانسیوم، نیترات و مواد رادیواکتیو در برخی منابع آب ژرف جهان که زمان ماندگاری زیادی داشتند گزارش شده است (Guendouz و همکاران، ۲۰۰۳؛ Edmunds و همکاران، ۲۰۰۳؛ Halim و همکاران، ۲۰۱۰؛ Yousafzai و همکاران، ۲۰۱۰؛ Alaya و همکاران، ۲۰۱۴).

۵- شرایط فیزیکوشیمیایی محیطی: متغیرهای محیطی فیزیکی (دما و فشار) و شیمیایی (اسیدیته و شرایط اکسیداسیون و احیا) بر انحلال و رسوب‌گذاری املاح مختلف در آب زیرزمینی تاثیرگذار هستند. در منابع آب ژرف این عوامل می‌توانند موجب افزایش قابل توجه غلظت برخی از عناصر (نظیر کروم) شوند.

محدودیت‌ها و ملاحظات بهره‌برداری

باتوجه‌به مشخصه‌های آبخوان‌های ژرف که به آن‌ها اشاره شد بهره‌برداری از این منابع با محدودیت‌ها و ملاحظات خاصی روبه‌رو است که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود.

۱- ملاحظات سیاسی-اجتماعی

با توجه‌به گستره وسیع آبخوان‌های ژرف چالش‌های سیاسی (بین کشوری) و اجتماعی (بین استان‌ها) برای بهره‌برداری از منابع آب ژرف دور از انتظار نیست. بسیاری از آبخوان‌های ژرف مهم کشف‌شده در جهان گستره سطحی و حجم ذخیره آب قابل توجهی دارند که اغلب بین دو یا چند کشور مشترک می‌باشند (جدول ۲). بنابراین بهره‌برداری از این منابع آبی مشترک اغلب در چارچوب قواعد و حقوق بین‌الملل مربوطه میسر خواهد بود.

سازمان یونسکو در سال ۲۰۰۳ کارگروه مدیریت منابع آب زیرزمینی مرزی (مشترک) بین‌المللی (ISRAM)[۱۰] را برای مدیریت آبخوان‌های مرزی و مشترک تشکیل داده است (Vrba و Verhagen، ۲۰۱۱). این کارگروه در اواخر سال ۲۰۰۸ مصوبه شماره A/RES/63/124 در خصوص نحوه بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی مرزی و مشترک را در جلسه شصت و سوم مجمع عمومی سازمان ملل متحد به تصویب رساند، که طی مصوبه شماره A/RES/71/150 در سال ۲۰۱۶ به‌روزرسانی شد. مصوبه مزبور رویکرد بین‌المللی حاکم برای بهره‌برداری پایدار و منصفانه از آبخوان‌های مرزی مشترک را تبیین نموده است. در راستای اجرای این مصوبه کشورهای الجزایر، بنین، بورکینافوسو، مالی، موریتانی، نیجر و نیجریه در سال ۲۰۱۴ یک معاهده همکاری برای مدیریت بهره‌برداری از آبخوان‌های ژرف Iullemeden و Taoudeni/ Tanezrouftبه امضا رسانده‌اند (www.un.org).

۲- کیفیت و آلودگی

آب‌های زیرزمینی ژرف می‌توانند شیرین، لب‌شور، شور و یا حتی بسیار شور باشند. این منابع در برخی مناطق نظیر شمال شرق آفریقا و کشورهای عربی با وجود تجدیدناپذیر بودن به دلیل کیفیت بالا و میزان مواد محلول کم (که در برخی موارد کمتر از ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر است) برای تامین آب شرب و کشاورزی بهره‌برداری می‌شوند. درصورتی‌که غلظت مواد محلول منابع

آب ژرف زیاد باشد ممکن است بهره‌برداری از آن‌ها حتی برای مصارف کشاورزی مقدور نباشد. Alaya و همکاران (۲۰۱۴) ترکیب شیمیایی آبخوان ژرف Djeffara در جنوب شرق تونس را طبق استانداردهای موجود برای مصارف شرب و حتی کشاورزی آب نامناسب تشخیص دادند.

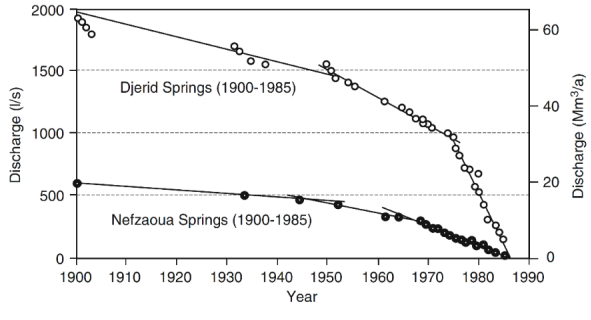
برخی عناصر کمیاب، فلزات سنگین و مواد رادیواکتیو در غلظت‌های خطرناک بیش از حدمجاز مصارف مختلف در آب‌های ژرف ممکن است وجود داشته باشد. لازم به ذکر است منابع آب ژرف شور و بسیار شور اگرچه به لحاظ منبع آبی اقتصادی نیستند اما به‌دلیل وجود برخی عناصر ارزشمند در غلظت‌های بالا می‌توانند ارزش فرآوری مواد معدنی را داشته باشند. در منطقه داشلی برون در استان گلستان طی مطالعات اکتشافی ژئوفیزیکی و حفاری نفتی در اعماق ۲۲۰۰ متری شورابه‌هایی با مقادیر قابل توجه ید کشف و بهره‌برداری شد (Oskooi و Mansoori، ۲۰۱۴).

برداشت از منابع آب زیرزمینی ژرف که اغلب املاح بیشتری نسبت به سایر منابع آبی دارند، می‌تواند در دراز مدت باعث افزایش شوری منابع خاک و آب (سطحی و زیرزمینی کم‌عمق) شود. Aly (۲۰۱۵) افزایش شوری خاک و آب زیرزمینی کم‌عمق در واحه Siwa در غرب مصر را گزارش نمود. لازم به ذکر است در صورت نیاز به تصفیه آب ژرف لب‌شور یا دارای آلودگی فلزات سنگین و رادیواکتیو تبعات زیست‌محیطی پساب تولیدی بسیار چالش‌زا است.

۳- مخاطرات زیست‌محیطی

واکنش آبخوان‌های کم‌عمق نسبت به تنش (یعنی برداشت از ذخیره به وسیله چاه) سریع و به‌صورت افت سطح آب زیرزمینی یا سطح پیزومتریک است. درحالی‌که واکنش هیدرولیکی منابع آب ژرف نسبت به برداشت آب کندتر از منابع آب زیرزمینی کم‌عمق‌تر بوده و اغلب بعد از چندین سال نمایان می‌شود (Vrba و Verhagen، ۲۰۱۱). برداشت آب زیرزمینی از آبخوان ژرف مخاطرات زیست‌محیطی را به همراه دارد که به شرح ذیل است:

الف- کاهش آبدهی و خشک‌شدن چشمه‌ها و چاه‌های مرتبط: با برداشت آب از آبخوان ژرف آبدهی چشمه‌ها و چاه‌های مرتبط که به‌صورت طبیعی آن را زهکشی می‌کنند کاهش خواهد یافت. برداشت آب از آبخوان ژرف North WesternSahara آفریقا منجر به کاهش آبدهی چشمه‌های مرتبط با این آبخوان در درازمدت شده است (شکل ۳). بررسی سری زمانی نرخ بهره‌برداری و تعداد چاه‌ها و چشمه‌های آرتزین مرتبط با آبخوان ژرف Djeffara در شمال آفریقا نشان می‌دهد با وجود اینکه نرخ بهره‌برداری از این آبخوان از سال ۱۹۵۰ تا ۲۰۰۸ تقریباً ثابت بوده و افزایش نیافته اما با افت فشار آبخوان در درازمدت تعداد منابع آب آرتزین منطقه به‌شدت کاهش یافته است (Foster و Loucks، ۲۰۰۶).



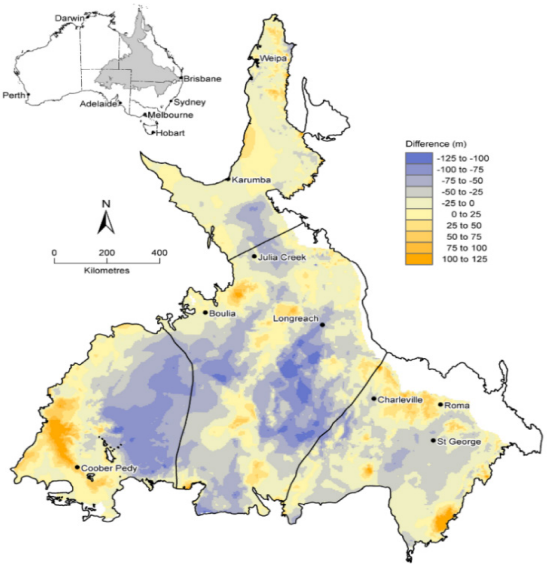
شکل ۳- کاهش آبدهی و خشک شدن چشمه‌های خروجی آبخوان ژرف North Western Sahara در آفریقا (Foster و Loucks، ۲۰۰۶).

ب- تغییر رژیم هیدرولیکی آبخوان‌های کم‌عمق (آبرفتی) و کاهش نرخ تغذیه از سنگ کف آن‌ها: آبخوان‌های ژرف عموماً از نوع تحت‌فشار می‌باشند (Bisson و Lehr، ۲۰۰۴). بنابراین اگر بار هیدرولیکی و شرایط زمین‌شناسی در یک منطقه به‌گونه‌ای باشد که آبخوان ژرف تغذیه‌کننده یک آبخوان کم‌عمق از طریق سنگ کف باشد با افت فشار در آبخوان ژرف میزان نرخ تغذیه از سنگ کف آبخوان کم‌عمق کاهش خواهد یافت. بنابراین اگر بار هیدرولیکی در آبخوان ژرف بر اثر بهره‌برداری کمتر از بار هیدرولیکی در آبخوان کم‌عمق شود جهت جریان طبیعی می‌تواند معکوس شده و آبخوان کم‌عمق موجب تغذیه آبخوان ژرف شود. در چنین شرایطی ذخیره آبی آبخوان کم‌عمق (که کیفیت بهتری دارد) به اعماق بیشتر نفوذ کرده و شدت افت سطح آب زیرزمینی در این آبخوان بیشتر خواهد شد. احتمال بروز این وضعیت در مورد آبخوان ژرف GAB استرالیا مورد توجه قرار گرفته است. شکل (۴) اختلاف بار هیدرولیکی بخشی از این آبخوان نسبت به آبخوان کم‌عمق بالایی آن را نشان می‌دهد. در شکل نامبرده بخش‌های دارای اختلاف بار هیدرولیکی منفی (با تُناژ رنگی آبی) و مثبت (با تُناژ رنگی نارنجی) به‌ترتیب بیانگر احتمال وجود جریان قائم رو به پایین (تغذیه آبخوان ژرف) و جریان قائم رو به بالا (تغذیه آبخوان کم‌عمق بالایی) می‌باشند (Smerdon و همکاران، ۲۰۱۲).

ج- فرونشست زمین: فشار روباره[11] سطح زمین در ناحیه اشباع بر روی آب زیرزمینی (آب منفذی) و اجزای بدنه آبخوان تحمل می‌شود. آب زیرزمینی به‌وسیله چاه موجب کاهش فشار آب منفذی، افزایش فشار در بدنه آبخوان و در نتیجه فرونشست غیرالاستیک (برگشت‌ناپذیر) فضاهای خالی می‌شود که در سطح زمین نیز نمود می‌یابند (Hawkins، ۲۰۰۵). شواهد فرونشست زمین در اثر بهره‌برداری گسترده (در حد یک میلیون مترمکعب بر روز) از میدان چاه آب Tazerbo در آبخوان ژرف Nubian، در جنوب شرق لیبی گزارش شده است (Alfarrah و همکاران، ۲۰۱۷).

۴- ملاحظات اقتصادی

منابع آب ژرف در اعماق زیاد زمین واقع شده است در نتیجه هزینه‌های شناسایی، اکتشاف، حفاری، بهره‌برداری و تصفیه آب آن‌ها بیشتر از هزینه‌های مشابه برای منابع آب سطحی و زیرزمینی کم‌عمق است. بیشتر منابع آب ژرف مهم جهان (که در زمره منابع آب تجدیدناپذیر به‌شمار می‌روند) در مناطق خشک و نیمه‌خشک با منابع آب سطحی و زیرزمینی کم‌عمق تجدیدپذیر ناچیز کشف شده است. بنابراین ارزش واقعی آب برای استمرار حیات و توسعه انسانی در این مناطق نسبت به هزینه‌های صرف شده برای دسترسی به آن قابل توجه می‌باشد. برآورد قیمت تمام شده آب در برخی پروژه‌های اکتشاف آب ژرف بیانگر توجیه‌پذیری موردی بهره‌برداری از این منابع است. Bisson (۲۰۰۲) در پروژه تأمین آب ترینیداد و توباگو هزینه استحصال هر مترمکعب آب را کمتر از ۱۵ سنت برآورد کردند؛ به‌طوری‌که هزینه سرانه استحصال آب برای تأمین نیاز شهری، صنعت و تولید غذای یک جمعیت ۲۵۰ هزار نفری در مطالعه ایشان کمتر از ۲۰ دلار در سال گزارش شده است.



شکل ۴- اختلاف بار هیدرولیکی آبخوان ژرف Great Artesian Basin استرالیا در ناحیه Cadna-owie Hooray با آبخوان‌های کم‌عمق بالایی؛ اعداد مثبت بیانگر بیشتر بودن بار هیدرولیکی آبخوان‌های کم‌عمق نسبت به آبخوان ژرف می‌باشند و بالعکس (Smerdon و همکاران، ۲۰۱۲)

جمع‌بندی

منابع آب ژرف ویژگی‌های متمایزی نسبت به سایر منابع آب زیرزمینی دارند. این ویژگی‌ها شامل ابعاد قابل توجه (حجم ذخیره و گستره سطحی) و زمان ماندگاری زیاد (تجدیدناپذیری) می‌باشد. اگرچه این منابع آب در قسمت‌های خشک و فراخشک جهان به‌طور گسترده بهره‌برداری می‌شوند اما بهره‌برداری از آن‌ها تاکنون در کشور صورت نگرفته است و انجام کارهای مطالعاتی در این زمینه از سال ۱۳۹۴ آغاز شده است. مطالعه منابع آب ژرف در کشور در حال حاضر در دو رویه مجزا در حال پیگیری است. رویه اول توسط وزارت نیرو در حال انجام است مطالعات شناسایی در قالب پهنه‌بندی مناطق مستعد آب‌های ژرف کشور را در دستور کار دارد که وضعیت کل کشور را از نظر وجود مناطق دارای پتانسیل آب ژرف تعیین خواهد نمود. رویه دوم توسط معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری در حال پیگیری است و شامل مطالعات اکتشافی موردی مبتنی بر به‌کارگیری تمامی ابزارهای اکتشافی در منطقه سیستان است. به‌عبارت دیگر در این رویه مناطقی که به واسطه شواهد موجود و یا انجام مطالعات دیگر (همچون اکتشافات نفت و گاز) احتمال وجود منابع آب ژرف شیرین در آن وجود دارد انتخاب و در طی زمان کوتاهی مطالعات اکتشافی لازم از جمله لرزه‌نگاری، ژئوفیزیک و حفاری در آن‌ها صورت می‌گیرد. باتوجه‌به اینکه انجام مطالعات اکتشافی و پهنه‌بندی آب ژرف در جهان به‌صورت یکپارچه انجام می‌شود؛ بهره‌گیری از نتایج مطالعات اکتشافی (رویه دوم) برای تدقیق مطالعات پهنه‌بندی آب ژرف (رویه اول) بسیار سودمند خواهد بود.

بهره‌برداری از منابع آب ژرف نیازمند تدوین سیاست‌های راهبردی و ضوابط معینی است که کلیه ابعاد حقوقي، اجتماعي، اقتصادي و زیست‌محیطی مترتب بر بهره‌برداري را با در نظر گرفتن رویکرد توسعه پایدار در نظر بگیرد. گام برداشتن در مسیر بهره‌برداری از منابع آب ژرف بدون داشتن چنین برنامه‌ای کشور را با هزینه‌ها و چالش‌های اجتماعی و زیست‌محیطی جدی روبه‌رو خواهد کرد. لذا ضروری است ضوابط و سیاست‌های لازم هم‌زمان با انجام مطالعات شناسایی و اکتشافی برای این منابع آبی غیرمتعارف تهیه و تدوین شوند.

پی‌نوشت

1- Megawatershed

2- Local, intermediate, and regional groundwater flow sub-systems

۳- به فاصله زمانی بین لحظه ورود آب بارش به درون زمین در منطقه تغذیه تا لحظه خروج آن از منطقه تخلیه آبخوان، زمان ماندگاری (Residence time) آب زیرزمینی گفته می‌شود (Kazemi و همکاران، ۲۰۰۶). با توجه به این که آب‌های خروجی

از منطقه تخلیه آبخوان مربوط به زمان‌های تغذیه مختلفی بوده که از مسیرهایی با طول و سرعت جریان متفاوت منشأ می‌گیرند، عملاً آب خروجی از یک آبخوان دارای مولفه‌های آبی با زمان‌های ماندگاری مختلف است. بنابراین متوسط زمان ماندگاری (Mean residence time)، که برابر با میانگین وزنی زمان‌های ماندگاری مولفه‌های آب خروجی از آبخوان می‌باشد، در مطالعات آب زیرزمینی مد نظر قرار می‌گیرد (Goode، ۱۹۹۶).

4- Renewable

5- Non-renewable

۶- طبق تعریف، نرخ تجدیدپذیری برابر با نسبت حجم تغذیه سالانه به کل حجم ذخیره آبخوان است. این متغیر دارای واحد year-1 است و با دوره تجدید (با واحد year) نسبت عکس دارد (Foster و Loucks، ۲۰۰۶). دوره تجدید را می‌توان با متوسط زمان ماندگاری آب زیرزمینی معادل دانست.

7- Formation water

8- Paleoclimate

۹- برخی محققین، منابع آب ژرف با منشأ بارش جوی بسیار قدیمی را نیز جزء دسته منابع آب فسیلی به حساب آورده‌اند (Mazor، ۲۰۰۴؛ Foster و Loucks، ۲۰۰۶؛ Jasechko و همکاران، ۲۰۱۷). به عقیده این دسته از محققین منابع آب ژرف تجدیدناپذیر با منشأ جوی قدیمی بیانگر شرایط اقلیم دیرینه است که هزاران سال پیش وجود داشته و برخی از این منابع در مناطقی کشف شده که امروزه دارای شرایط آب و هوایی خشک یا به شدت خشک با تغذیه طبیعی بسیار کم هستند. لذا محققین مزبور با الهام از علم دیرینه‌شناسی این دسته از منابع آب ژرف را "فسیلی" اطلاق نموده‌اند. برای نمونه Jasechko و همکاران (۲۰۱۷)آب‌های زیرزمینی با زمان ماندگاری بیش از ۱۲۰۰۰ سال را که در دوره قبل از هولوسن (عهد حاضر) تغذیه شده‌اند را به عنوان منابع آب زیرزمینی فسیلی معرفی نموده‌اند.

10- International Shared (transboundary) Aquifer Resources Management

11- Overburden pressure

منابع

Alaya M.B., Saidi S., Zemni T. and Zargouni F. 2014. Suitability assessment of deep groundwater for drinking and irrigation use in the Djeffara aquifers (Northern Gabes, south-eastern Tunisia). Environmental earth sciences, 71(8): 3387-3421.

Alfarrah N., Berhane G., Hweesh A. and Walraevens K. 2017. Sinkholes Due to Groundwater Withdrawal in Tazerbo Wellfield, SE Libya. Groundwater, 55(4): 593-601.

Aly A.A. 2015. Hydrochemical characteristics of Egypt western desert oases groundwater. Arabian Journal of Geosciences, 8(9): 7551-7564.

André L., Franceschi M., Pouchan P. and Atteia O. 2005. Using geochemical data and modelling to enhance the understanding of groundwater flow in a regional deep aquifer, Aquitaine Basin, south-west of France. Journal of Hydrology, 305(1-4): 40-62.

Bath A.H., Milodowski A.E. and Strong G.E. 1987. Fluid flow and diagenesis in the East Midlands Triassic sandstone aquifer. Geological Society, London, Special Publications, 34(1): 127-140.

Bisson R.A. 1992. Megawatersheds Development Feasibility Study of Ethiopia, Report and Maps, for U.S. Office of Foreign Disaster Assistance (OFDA). Bisson Exploration Services Company.

Bisson R.A. 2002. Hydrogeological reassessment of Trinidad. Earthwater Technology, Trinidad and Tobago LLC, WASA's Trinidad Groundwater Development Project.

Bisson R.A. and Lehr J.H. 2004. Modern groundwater exploration: discovering new water resources in consolidated rocks using innovative hydrogeologic concepts, exploration, drilling, aquifer testing and management methods. John Wiley & Sons.

Bisson R.A. 2005. Megawatersheds. Water Encyclopedia, 5: 266-273.

Domenico P.A. and Schwartz F.W. 1997. Physical and chemical hydrogeology. New York: Wiley.

Drever J. 1997. The geochemistry of natural waters: surface and groundwater environments. Upper Saddle River.

Edmunds W.M. and Smedley P.L. 2000. Residence time indicators in groundwater: the East Midlands Triassic sandstone aquifer. Applied Geochemistry, 15(6): 737-752.

Edmunds W.M., Guendouz A.H., Mamou A., Moulla A., Shand P. and Zouari K. 2003. Groundwater evolution in the Continental Intercalaire aquifer of southern Algeria and Tunisia: trace element and isotopic indicators. Applied Geochemistry, 18(6): 805-822.

Foster S. and Loucks D.P. 2006. Non-renewable groundwater resources: a guidebook on socially-sustainable management for water-policy makers. Unesco.

McGuire V.L. 2017. Water-level and recoverable water in storage changes, High Plains aquifer, predevelopment to 2015 and 2013–15(No. 2017-5040). US Geological Survey.

Moussa A.B., Zouari K. and Jlassi F. 2011. The hydrogeology of the deep groundwater system in the Hammamet–Nabeul regional basin, north-eastern Tunisia: a hydrochemical and isotopic approach. Carbonates and evaporites, 26(4): 327-338.

Novikov D.A. and Sukhorukova A.F. 2015. Hydrogeology of the northwestern margin of the West Siberian Artesian Basin. Arabian Journal of Geosciences, 8(10): 8703-8719.

Oskooi B. and Mansoori I. 2015. Iodine-bearing saline aquifer prospecting using magnetotelluric method in Golestan plain, NE Iran.Arabian Journal of Geosciences, 8(8): 5959-5969.

Petersen J.O., Deschamps P., Hamelin B., Fourré E., Gonçalvès J., Zouari K. and Team A. 2018. Groundwater flowpaths and residence times inferred by 14C, 36Cl and 4He isotopes in the Continental Intercalaire aquifer (North-Western Africa). Journal of Hydrology, 560: 11-23.

Smerdon B.D., Ransley T.R., Radke B.M. and Kellett J.R. 2012. Water resource assessment for the Great Artesian Basin. A report to the Australian Government from the CSIRO Great Artesian Basin Water Resource Assessment. CSIRO Water for a Healthy Country Flagship, Australia.

Tóth J. 1963. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. Journal of geophysical research, 68(16): 4795-4812.

http://www.un.org/en/ga/sixth/71/transboundary_aquifers.shtml (visited 5 December 2018).

Vrba J. and Verhagen B.T. 2011. Groundwater for emergency situations: a framework document. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO).

Yousafzai A., Eckstein Y. and Dahl P.S. 2010. Hydrochemical signatures of deep groundwater circulation in a part of the Himalayan foreland basin. Environmental Earth Sciences, 59(5): 1079-1098.

Freeze R.A. and Cherry J.A. 1979.Groundwater. Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall.

Goode D.J. 1996. Direct simulation of groundwater age. Water resources research, 32(2): 289-296.

Guendouz A., Moulla A.S., Edmunds W.M., Zouari K., Shand P. and Mamou A. 2003. Hydrogeochemical and isotopic evolution of water in the Complexe Terminal aquifer in the Algerian Sahara. Hydrogeology journal, 11(4): 483-495.

Halim M.A., Majumder R.K., Nessa S.A., Hiroshiro Y., Sasaki K., Saha B.B. and Jinno K. 2010. Evaluation of processes controlling the geochemical constituents in deep groundwater in Bangladesh: spatial variability on arsenic and boron enrichment. Journal of hazardous materials, 180(1-3): 50-62.

Hawkins A.B. 2005. ENGINEERING GEOLOGY | Subsidence, In R.C. Selley, L. Robin, M. Cocks and Ian R. Plimer (eds.) Encyclopedia of Geology, Elsevier, Oxford, Pages 9-14, ISBN 9780123693969

Hoque M.A. and Burgess W.G. 2012. 14C dating of deep groundwater in the Bengal Aquifer System, Bangladesh: Implications for aquifer anisotropy, recharge sources and sustainability. Journal of Hydrology, 444: 209-220.

Jasechko S., Perrone D., Befus K.M., Cardenas M.B., Ferguson G., Gleeson T., Luijendijk E., McDonnell J.J., Taylor R.G., Wada Y. and Kirchner J.W. 2017. Global aquifers dominated by fossil groundwaters but wells vulnerable to modern contamination.Nature Geoscience, 10(6): 425.

Kazemi G.A., Lehr J.H. and Perrochet P. 2006. Groundwater age. John Wiley & Sons.

Mahara Y., Habermehl M.A., Hasegawa T., Nakata K., Ransley T.R., Hatano T. and Yasuda H. 2009. Groundwater dating by estimation of groundwater flow velocity and dissolved 4He accumulation rate calibrated by 36Cl in the Great Artesian Basin, Australia. Earth and Planetary Science Letters, 287(1-2): 43-56.

Margat J. and Van der Gun J. 2013.Groundwater around the world: a geographic synopsis. CRC Press.

Mazor E. 2004. Global water dynamics: shallow and deep groundwater, petroleum hydrology, hydrothermal fluids, and landscaping. CRC Press.